引文格式:蒋涛,朱照荣,党亚民,等.联合GNSS基准站和地表质量负荷数据的区域高程参考框架动态维持[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(4):657-667.DOI:10.13203/j.whugis20240070

Citation:JIANG Tao,ZHU Zhaorong,DANG Yamin,et al.Dynamic Maintenance of Regional Height Reference Frame Based on GNSS Reference Stations and Surface Mass Loading Data[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(4):657-667.DOI:10.13203/j.whugis20240070

联合GNSS基准站和地表质量负荷数据的区域高程参考框架动态维持

蒋 涛[1,2,3] 朱照荣[4] 党亚民[1,3] 张锡越[4] 杨 强[1,3]

1 中国测绘科学研究院,北京,100830

2 北京房山人卫激光国家野外科学观测研究站,北京,100830

3 空间基准全国重点实验室,北京,100830

4 北京市测绘设计研究院,北京,100038

摘 要:为降低区域高程参考框架维持的工作量和成本,提升其现势性,提出了一种以全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)基准站为核心节点,对区域高程参考框架进行动态维持的方法,利用基准站数据和地表质量负荷数据(陆地水储量、海底压力和大气压)确定测站的正常高变化,对测站正常高进行动态修正。利用中国北京市沉降区5个GNSS基准站超过8 a的GNSS数据、地表质量负荷数据及多期水准网数据对该方法进行验证,结果表明:多年GNSS与地表质量负荷数据联合确定的正常高变化精度优于11 mm,大部分测站精度优于5 mm,正常高变化的1个月外推误差最大为13 mm。采用移去-恢复法和质量负荷格林函数积分方法,由地表质量负荷数据推算基准站高程异常变化并进行相应改正,能显著提升正常高变化的确定精度。优选具有长期连续观测、数据质量良好的GNSS基准站,实现区域高程参考框架动态维持。

关键词:GNSS基准站;高程参考框架;地面沉降;地表质量负荷

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-06-13

DOI:10.13203/j.whugis20240070 **文章编号**:1671-8860(2026)04-0657-11

Dynamic Maintenance of Regional Height Reference Frame Based on GNSS Reference Stations and Surface Mass Loading Data

JIANG Tao[1,2,3] *ZHU Zhaorong*[4] *DANG Yamin*[1,3] *ZHANG Xiyue*[4] *YANG Qiang*[1,3]

1 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

2 Beijing Fangshan Satellite Laser Ranging National Observation and Research Station, Beijing 100830, China

3 State Key Laboratory of Spatial Datum, Beijing 100830, China

4 Beijing Institute of Surveying and Mapping, Beijing 100038, China

Abstract: **Objectives**: Regional height reference frame is usually maintained by geodetic leveling network. However, leveling observation is characterized by heavy workload, high cost and low efficiency, which makes the height reference frame quite difficult to maintain, especially in the area of land subsidence. We present a method to dynamically maintain the regional height reference frame based on the combination of GNSS (global navigation satellite system) reference station and surface mass loading data aiming to reduce the workload and cost and improve the timeliness. **Methods**: In this method, GNSS reference stations are selected as the core nodes of the regional height reference frame, GNSS observations and surface mass loading data (land water storage, sea level height and atmospheric pressure) are used to determine the normal height changes and then update the normal heights at these core stations. The normal height change is

基金项目:国家自然科学基金(42074020);空间基准全国重点实验室自主研究课题(SKLSD2025-ZZ-09);中国测绘科学研究院基本科研业务费项目。

第一作者:蒋涛,博士,研究员,研究方向为重力场与垂直基准。jiangtao@casm.ac.cn

composed of change in geodetic height and height anomaly. The GNSS reference stations are taken as the core nodes of height control network, geodetic height changes of these stations are obtained by GNSS coordinate time series analysis using least squares method. Height anomaly changes at these stations are computed using the remove-restore method and local Green's function integration based on surface mass loading data. **Results**: The method is validated using GNSS observations over 8 years at 5 reference stations, surface mass loading data and multi-session geodetic leveling data in the subsidence area of Beijing. The numerical results demonstrate that the accuracy of the normal height changes determined from the combination of GNSS data and surface mass loading data is better than 11 mm, with most stations achieving accuracy better than 5 mm. The maximum extrapolation error for one month of normal height changes is 13 mm. **Conclusions**: By applying the height anomaly change corrections that derived from the surface mass loading data using the remove-compute-restore technique and the Green's function integral method, the accuracy of normal height changes can be significantly improved. By selecting the GNSS reference stations with long-term continuous observations and good data quality as the core stations, the dynamic maintenance of regional height reference frame can be realized.

Key words: GNSS reference station; height reference frame; land subsidence; surface mass loading

高程参考框架是高程基准的具体实现,目前中国的高程参考框架主要依靠各个等级的水准网进行维持并实现高程传递[1],另外一种重要的高程测定模式是全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)结合高精度似大地水准面模型测定待求点的正常高。随着似大地水准面模型精度和分辨率的持续提升,GNSS结合似大地水准面模型有望逐步取代基于水准网的高程传递模式[2]。然而,现阶段由水准网构成的高程控制网在高程参考框架维持和工程应用服务中仍然不可或缺,由于地下水开采、城市建设、矿产资源开发和地壳运动等多方面因素的影响,中国许多地区出现了不同程度的地面沉降,造成区域高程控制网成果难以反映实际情况,严重制约了高程参考框架的现势性和应用服务能力,有必要对高程参考框架进行定期维持更新,以确保其现势性[3]。

高程控制网复测工作量大、成本高、观测周期长,尤其是在地面沉降频发、显著的地区,高程参考框架维持难度较大。中国已初步建立国家和多个区域(省市级)卫星导航定位连续运行基准站网,且仍在持续建设、完善之中。GNSS基准站网集成了GNSS、通信、气象数据采集等技术,它是GNSS实现高精度定位、导航与授时服务的网络化综合系统,也是建立坐标框架、监测地壳运动等科学和工程应用的重要基础设施。GNSS基准站数据产品主要包括:基准站地心坐标及速度、地球自转参数、跟踪站观测数据、精密星历、卫星钟差、气象参数、电离层模型、基准站坐标时间序列等。利用GNSS基准站数据能以毫米级精度全天候、连续监测地表点位的三维位置变化[4]。若能以基准站作为节点实现区域高程参考框架的动态维持,能够缩短水准联测距离、减少水准网复测周期,从而降低高程参考框架维持的工作量和成本,具有重要的工程实用价值。

目前,利用完善的GNSS坐标时间序列分析技术,能对基准站大地高的线性和非线性运动进行精准建模,获取高精度大地高变化[5-13]。中国高程系统采用正常高系统,大地高变化不等同于正常高变化,似大地水准面并不是一成不变的,陆地水文、大气压和非潮汐海洋变化等地表质量迁移、冰期均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)、构造性隆升、沉降以及地震等地球动力过程会引起不同程度和范围的似大地水准面变化[14],其中陆地水文、大气压和非潮汐海洋变化为年内周期变化的主要贡献,GIA等地球动力过程主要表现为长期性趋势,仅在南极、格陵兰岛和北美北部需要考虑,其他地区量级很小,无需考虑[15]。基于重力恢复及气候实验卫星月重力场模型的研究结果表明,在5~10 a的时间尺度上,欧洲、北美地区的大地水准面变化量级可达1 cm以上[15-20]。在当前精度水平上,一般认为似大地水准面变化等同于大地水准面变化。因此,利用GNSS数据对测站的正常高进行高精度动态维持,理论上应考虑似大地水准面(高程异常)变化。

本文提出了一种基于GNSS基准站数据的高程参考框架动态维持方法,以基准站作为区域高程控制网的核心节点,利用GNSS数据和地表质量负荷数据确定测站的正常高变化,对测站正常高进行动态修正,并利用中国北京市沉降区5

个GNSS基准站的多年观测数据和多期水准测量数据,对高程参考框架动态维持方法进行验证。

1　基本原理

利用GNSS基准站数据对高程参考框架进行动态维持的基本原理是:将基准站作为高程控制网的核心节点,利用GNSS数据解算坐标时间序列,对大地高进行时间序列分析得到测站的大地高变化,利用陆地水储量、海底压力和大气压等地表质量负荷数据推算得到测站的似大地水准面(高程异常)变化;两者结合得到测站的正常高变化,对利用水准测量手段测定的某个历元时刻的测站正常高进行动态修正,得到待求历元时刻的测站正常高。

根据两个历元时刻t_1、t_2的基准站大地高变化和高程异常变化,即可计算相应的正常高变化:

$$\Delta H(t_1,t_2)=\Delta h(t_1,t_2)-\Delta\zeta(t_1,t_2) \tag{1}$$

式中,ΔH为测站在时刻t_2相对于时刻t_1的正常高变化;Δh、$\Delta\zeta$分别表示相应的大地高变化和高程异常变化。对基准站大地高进行时间序列分析可以得到测站的大地高变化。根据地表质量负荷形变理论,利用地表质量负荷数据(陆地水储量、海底压力和大气压)能够推算测站的高程异常变化。

设时刻t_1的基准站正常高$H(t_1)$是利用水准测量测定、经水准网平差计算得到的正常高,则时刻t_2经动态修正后的GNSS基准站正常高$H(t_2)$为:

$$H(t_2)=H(t_1)+\Delta H(t_1,t_2) \tag{2}$$

若经动态修正后,基准站正常高的精度足够高,那么在该基准站的一定距离范围内,以该站作为高程起算点,进行水准联测能够得到待求点位的正常高。对于一个由GNSS基准站网覆盖的区域,依靠每个基准站经动态修正后的正常高,能够实现区域内高程参考框架的动态维持,这对地面沉降显著区域具有重要应用价值。欲测定区域内高程控制点的最新高程,从邻近的GNSS基准站联测即可得到,而不需要跨越数百千米、从沉降区域以外的稳定高程控制点起测,将显著降低地面沉降区域的高程参考框架维持成本和耗费时间。

2　方法和数据

2.1　GNSS基准站大地高时间序列分析方法

对GNSS基准站大地高进行时间序列分析的目的是获取表征大地高变化特征的拟合参数,根据拟合参数重构计算得到大地高时间序列。结合以往研究[6],基准站大地高时间序列采用如下函数模型来描述:

$$h(t_i)=a+bt_i+\sum_{m=1}^{M}A_m\sin\left(2\pi f_m t_i+\varphi_m\right)+\sum_{j=1}^{J}O_jV\left(t_i-\tau_j\right)+v_i \tag{3}$$

式中,t_i为坐标序列周解的历元时刻;$h(t_i)$为大地高;a为常数项;b为线性速度项;A_m和φ_m分别是频率为f_m的周期信号的振幅和相位;O_j是因各种原因造成的第j个阶跃式大地高突变;τ_j为发生大地高突变的历元时刻;V为Heaviside阶梯函数,发生突变前H值为0,发生突变后H值为1;v_i表示残余误差。

采用以上拟合模型对基准站大地高进行时间序列分析得到常数项、线性项和周期项等拟合参数,根据拟合参数即可内插或外推给定两个时刻的大地高变化:

$$\Delta h(t_1,t_2)=h(t_2)-h(t_1) \tag{4}$$

2.2　似大地水准面变化推算方法

对于中国绝大部分地区,似大地水准面变化的贡献分量主要包括陆地水储量变化(含地下水变化)、非潮汐海洋负荷变化和大气压变化。借鉴静态似大地水准面确定中的移去-恢复法,似大地水准面变化可划分为远区贡献和近区贡献。利用全球分布的质量元变化,进行球谐展开得到负荷球谐系数,结合负荷勒夫数进行球谐综合计算,可以得到全球范围质量元变化对待求点似大地水准面变化的远区贡献,即参考高程异常变化。由待求点一定范围内的地表质量元变化,结合全球质量元变化球谐展开模型,采用移去-计算-恢复法和质量负荷格林函数积分,求得待求点处频谱信息更为精细的似大地水准面变化。

2.2.1　全球地表质量负荷形变场的球谐分析与综合

地球表层陆地水储量、非潮汐海洋和大气压变化引起的地表质量负荷变化可用等效水高变化表示,地面点(r,θ,λ)处等效水高变化Δh_w可表示为规格化负荷球谐级数:

$$\Delta h_w(r,\theta,\lambda)=r\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\Delta C_{nm}^{w}\cos(m\lambda)+\Delta S_{nm}^{w}\sin(m\lambda)\right)\bar{P}_{nm}(\cos\theta) \tag{5}$$

式中,r、θ、λ分别为该点的地心距离、余纬度和经度;ΔC_{nm}^{w}、ΔS_{nm}^{w}为n阶m次规格化负荷球谐系数;

$\bar{P}_{nm}(\cos\theta)$为完全规格化缔合勒让德函数。利用全球分布的陆地水储量、海底压力和大气压等地表质量负荷变化数据,按照式(5)进行球谐分析,一般展开至180~360阶次,可得到各类数据对应的负荷球谐系数ΔC^{w}_{nm}、ΔS^{w}_{nm},其中海底压力数据对应的是非潮汐海洋负荷。

由地表质量负荷形变理论可知[21],由地表质量负荷变化引起的地表及其外部点位的高程异常变化$\Delta\zeta$为:

$$\begin{cases}\Delta\zeta=\dfrac{GM}{\gamma r}\sum\limits_{n=2}^{\infty}\left(\dfrac{a}{r}\right)^{n}(1+k_n)\cdot\\ \sum\limits_{m=0}^{n}(\Delta\bar{C}_{nm}\cos(m\lambda)+\Delta\bar{S}_{nm}\sin(m\lambda))\bar{P}_{nm}(\cos\theta)\\ \Delta\bar{C}_{nm}=\dfrac{3}{2n+1}\dfrac{\rho_w}{\rho_e}\Delta C^{w}_{nm}\\ \Delta\bar{S}_{nm}=\dfrac{3}{2n+1}\dfrac{\rho_w}{\rho_e}\Delta S^{w}_{nm}\end{cases}\tag{6}$$

式中,G为万有引力常数;M为地球总质量;ρ_w为水的密度;ρ_e为地壳平均密度;a为地球长半轴半径;γ为正常重力;k_n为n阶位负荷勒夫数。利用负荷球谐系数ΔC^{w}_{nm}、ΔS^{w}_{nm},按照式(6)进行球谐综合计算,即可得到地表待求点的参考高程异常变化。

2.2.2 区域地表质量负荷引起的似大地水准面变化

单位质量在地表某点引起的引力位,即引力位直接影响$U_D(\psi)$为[21]:

$$U_D(\psi)=\frac{ga}{M}\sum_n P_n(\cos\psi)\tag{7}$$

式中,g为重力值;ψ为计算点(r,θ,λ)与流动点(r',θ',λ')间的球面角距。

单位质量对固体地球产生负荷,地球因负荷产生形变,引起的引力位变化,即引力位间接影响$U_I(\psi)$为[21]:

$$U_I(\psi)=\frac{ga}{M}\sum_n k_n P_n(\cos\psi)\tag{8}$$

则单位质量引起的引力位总变化为直接影响和间接影响之和,结合Bruns公式,得到单位质量引起的似大地水准面变化,即似大地水准面对应的格林函数$U(\psi)$为[22]:

$$U(\psi)=U_D(\psi)+U_I(\psi)=\frac{a}{M}\left[\frac{1}{2\sin(\psi/2)}+\sum_n k_n P_n(\cos\psi)\right]\tag{9}$$

已知地表质量负荷引起的等效水高变化Δh_w,则似大地水准面变化$\Delta\zeta$为等效水高变化与格林函数的空间卷积:

$$\Delta\zeta=\rho_w\int_S \Delta h_w U(\psi)\mathrm{d}S\tag{10}$$

式中,dS为流动积分面元,积分半径一般取200~300 km。

采用移去-恢复法和质量负荷格林函数积分,分别利用陆地水储量、海底压力和大气压数据推算得到各负荷分量引起的GNSS基准站高程异常变化,再求和计算,即可得到总负荷引起的高程异常变化:

$$\Delta\zeta_T=\Delta\zeta_{\mathrm{Land}}+\Delta\zeta_{\mathrm{Air}}+\Delta\zeta_{\mathrm{Ocn}}\tag{11}$$

式中,$\Delta\zeta_T$为总负荷高程异常变化;$\Delta\zeta_{\mathrm{Land}}$为陆地水负荷引起的高程异常变化;$\Delta\zeta_{\mathrm{Air}}$为大气压负荷引起的高程异常变化;$\Delta\zeta_{\mathrm{Ocn}}$为海底压力变化引起的高程异常变化。

2.3 数据来源

为验证利用GNSS基准站数据维持高程参考框架的可行性和精度,考虑GNSS数据质量及完整度,选取北京市沉降区的5个GNSS基准站。这5个基准站均具备多期水准测量获取的正常高成果,可对由GNSS数据结合地表质量负荷数据(陆地水储量、海底压力和大气压数据)确定的正常高变化进行外部检核。

2.3.1 GNSS基准站数据

5个GNSS基准站分别为XIJI(西集)、NLSH(牛栏山)、CHPN(昌平)、CHAO(朝阳)和DSQI(东三旗)站,采用的是GPS数据,测站分布见图1,各基准站的GNSS数据时间段及水准联测时间见表1。综合考虑测站分布和观测数据质量等因素,选取中国及周边的12个国际GNSS服务(international GNSS service,IGS)跟踪站作为基准站网的基线解算基准,分别是AIRA、BADG、BJFS、PIMO、DAEJ、POL2、SHAO、TCMS、HYDE、TIXI、URUM和YSSK。为保证周边IGS站与全球框架的一致性,首先利用92个全球IGS站采用全球数据处理策略进行整体处理,获取周边IGS站在国际地球参考框架(international terrestrial reference frame,ITRF)2014中的瞬时历元坐标,平面精度达2~3 mm,高程精度达5 mm。再将5个基准站与周边IGS站联网解算,得到单日松弛解,基线解算采用GAMIT 10.70版软件。网平差采用GLOBK 5.12版软件,采用拟稳基准方法进行整网平差,得到5个基准站在

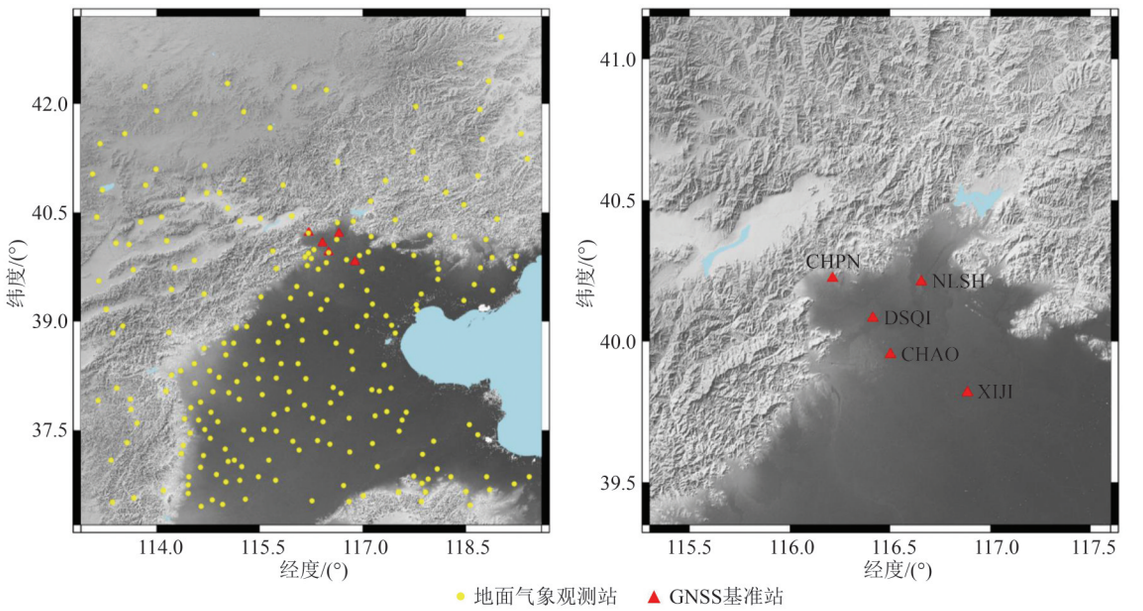


图 1　GNSS基准站和地面气象观测站分布

Fig. 1　Distribution of GNSS Reference Stations and Ground Meteorological Observation Stations

表 1　GNSS基准站数据时间段及水准联测时间

Table 1　Time Period of GNSS Reference Station Data and Its Leveling Measurement

GNSS基准站	GNSS数据时间段	水准联测时间
XIJI、NLSH	2012-01-01—2021-06-30	2012年、2016—2021年,共7期水准复测
CHPN、CHAO、DSQI	2016-01-01—2021-06-30	2016—2021年,共6期水准复测 2017—2021年,共5期水准复测

ITRF 2014框架下的三维坐标周解,历元归算至与水准测量时刻一致,站坐标的平均中误差在东、北方向为3 mm,高程方向为5 mm。

2.3.2　地表质量负荷数据

地表质量负荷数据的时间段为2012年1月至2021年6月。陆地水文数据采用全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system,GLDAS)的Noah模型数据产品,选取降雨量、土壤水分蒸发和蒸腾、地表径流以及地下水径流等参数,根据水平衡方程计算得到全球陆地水储量变化(含地下水变化),数据覆盖范围为经度[−179.875°,179.875°]、纬度[−59.875°,89.875°],数据格网间隔为0.25°×0.25°,时间间隔1个月。

海底压力数据采用美国喷气推进实验室海洋环流与气候同化项目(estimating the circulation and climate of the ocean,ECCO)发布的全球海底压力再分析产品中的近实时Kalman滤波数据版本kf080。该数据基于麻省理工学院通用环流模型原始方程的并行版本,利用卡尔曼滤波方法同化了海面高异常数据和原位温度剖面。数据覆盖范围为经度[−179.5°,179.5°]、纬度[−79.5°,8.5°],数据格网经度间隔为1°,纬度间隔在赤道±20°范围以外为1°,在赤道±20°范围内逐渐减小至0.3°,时间间隔12 h。

全球大气压数据采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)全球大气压模型,数据覆盖范围为[−180°,180°]、纬度[−90°,90°],格网间隔为0.125°×0.125°,时间间隔1个月。北京市及周边地区的大气压数据采用国家气象信息中心发布的中国地面气象观测历史数据集(月值),包括258个地面气象观测站的地面大气压观测数据,站点分布见图1。

2.3.3　水准网数据

北京市高程参考框架以水准网来维持,水准网以北京市玉渊潭水准原点为基准点,每年复测一次,北京市沉降区复测水准路线长度约1 100 km,其中一等水准路线约600 km,二等水准路线约500 km。水准网的节点包含XIJI、NLSH、CHPN、CHAO和DSQI 5个GNSS基准站,其中

XIJI、NLSH站具备2012年、2016—2021年共7 a的水准联测数据,CHPN、CHAO站具备2016至2021年共6 a的水准联测数据,DSQI站具备2017至2021年共5 a的水准联测数据(表1)。采用相同的策略对多期水准网观测数据进行处理,包括水准标尺长度改正、水准面不平行改正、重力异常改正、固体潮改正和海潮负荷改正,按照间接平差法进行平差计算,分别得到多期水准网中5个GNSS基准站的平差后正常高。

3 结果与分析

3.1 基于GNSS基准站数据的大地高变化

对5个GNSS基准站大地高周解进行时间序列分析:

1) 以基准站的大地高为观测值,按照式(3)组成观测方程,采用最小二乘方法求解得到常数项、线性项和周期项参数;

2) 利用拟合参数结合时间信息重构大地高时间序列,将其作为粗差探测的参考值,按3倍残差标准差探测并剔除原始时间序列中的粗差,迭代探测直至得到大地高时间序列;

3) 依据式(3)对大地高时间序列重新进行拟合估计,得到拟合系数,结合时间信息重构计算得到大地高时间序列。

图2给出了5个GNSS基准站的大地高时间序列分析与重构结果,为便于绘图展示,仅绘制了其线性速率项,对其常数项进行了平移。5个基准站的粗差剔除比例分别为:XIJI(3.2%)、NLSH(2.4%)、CHPN(3%)、CHAO(2.9%)、DSQI(2.4%)。可以看出,重构的GNSS大地高时间序列可较好地剔除粗差、平滑高频噪声,并内插填补数据中断,能很好地反映大地高周期性运动。

3.2 基于地表质量负荷数据的GNSS基准站高程异常变化

分别将陆地水储量、海底压力和大气压数据转换为相应的等效水高格网数据,将前3个月的等效水高平均值作为基准数据,求取每个月相对于该基准值的地表质量负荷变化(全球和区域等效水高变化格网数据)。利用式(5)对每个月的全球负荷变化格网进行球谐分析展开,得到360阶次负荷变化球谐系数模型;根据式(5)进行球谐综合计算得到数据点的参考等效水高,并按照式(6)进行球谐综合计算,得到负荷变化引起的GNSS基准站参考高程异常变化。采用移去-恢复法,首先从负荷变化数据中移去参考等效水高,得到残余负荷变化,按质量负荷格林函数积分公式(式(9)和式(10))计算基准站的残余高程异常变化(积分半径选取3°),再恢复基准站参考高程异常变化,分别得到陆地水储量、非潮汐海洋和大气压负荷变化对应的高程异常变化。将3种负荷变化引起的高程异常变化求和,即可得到总负荷引起的高程异常变化。

图3给出了研究区域内利用GLDAS数据计算的由陆地水储量变化引起的高程异常变化,5个GNSS基准站的高程异常变化统计信息见表2,图4为利用EIGEN-6C4重力场模型计算的区域高程异常,由于似大地水准面主要是长波占优特性,5个基准站的最大测站间距约为120 km,各测站的高程异常变化量级很接近。图5给出了CHPN站的高程异常变化时间序列,时间段为2012年1月至2021年6月。由图5可知,地表质量总负荷引起的高程异常呈明显的季节性变化,一般是1月至5月高程异常呈下降趋势,在4月至5月达到最小值;6月至12月高程异常呈上升趋势,在11月至12月达到最大值。对于同一测站,每年存在一定差异。高程异常的变化量级在−7~5.5 mm之间,主要来源于陆地水储量变化的贡献,图3中的区域分布结果与图5中的CHPN站结果具有一致性。对于高精度的GNSS基准站正常高变化确定,引入高程异常变化改正是有必要的。

3.3 GNSS基准站正常高变化确定与验证

根据两期水准测量中GNSS基准站的水准观测时刻,利用基准站大地高时间序列分析得到的线性速度项和非线性变化周期项参数,结合利用陆地水储量、海底压力和大气压变化等数据推算的高程异常变化,按照式(1)计算得到两期观测时刻对应的基准站正常高变化。将利用GNSS基准站数据确定的正常高变化与水准测量正常高变化进行比较,两者为不同观测技术得到的结果,相互独立,属于“双盲”检核,可以验证基准站正常高变化的精度。

表3~7分别为5个GNSS基准站的正常高变化精度验证结果,其中XIJI、NLSH站的正常高变化以2012年为基准时刻,CHPN、CHAO站以2016年为基准时刻,DSQI站以2017年为基准时刻。各参数定义如下:ΔH_L为水准测量正常高变化;$\sigma_{\Delta H_L}$为水准测量正常高变化中误差,由两期水准测量正常高的中误差按照误差传播定律估算;

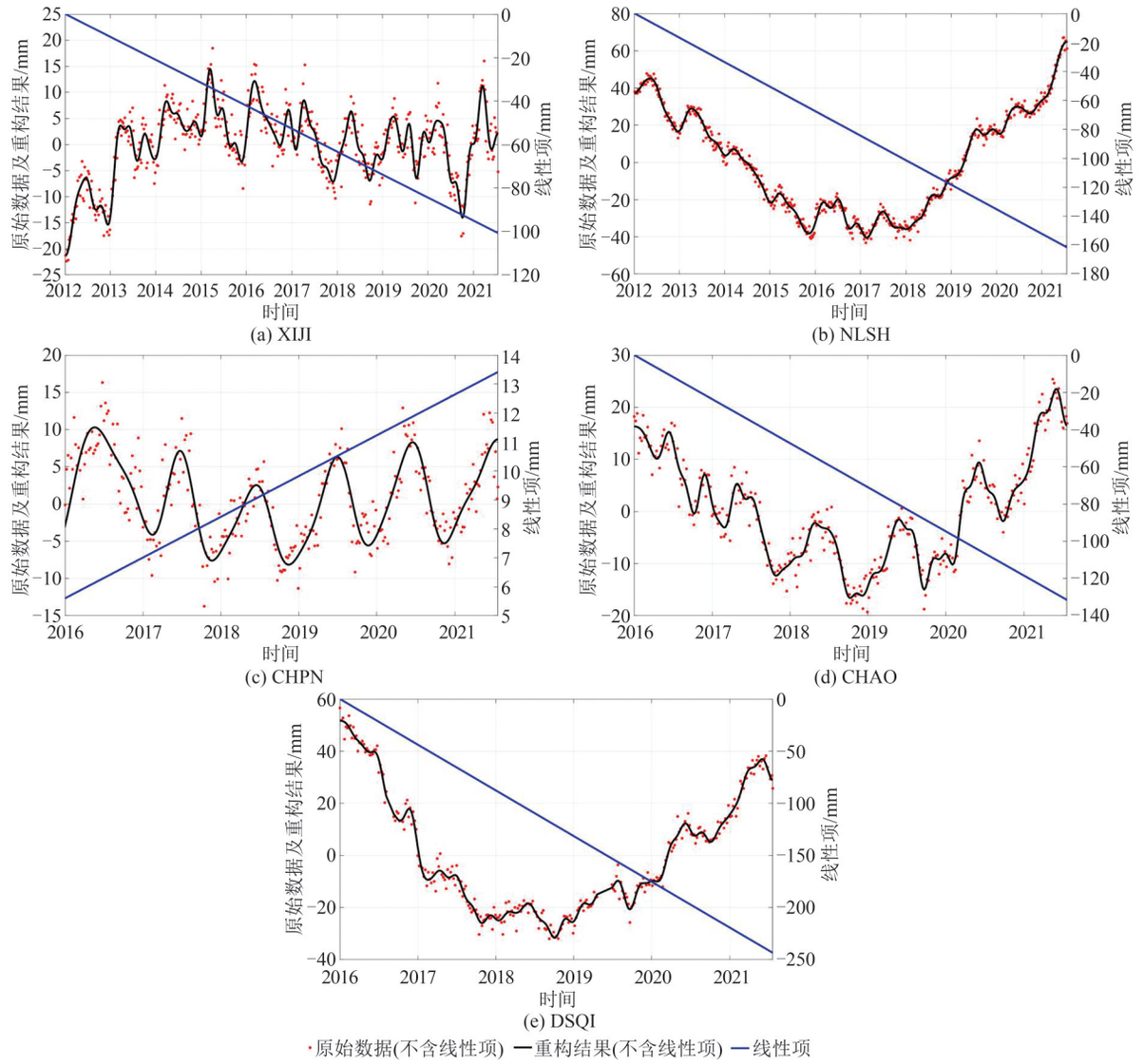


图 2　GNSS基准站的大地高时间序列分析与重构结果

Fig. 2　Analysis and Reconstruction Results of Geodetic Height Time Series at GNSS Reference Stations

$\Delta h-\Delta H_L$表示GNSS大地高变化与水准测量正常高变化的差异;$\Delta H-\Delta H_L$表示联合GNSS和地表质量负荷数据确定的正常高变化与水准测量正常高变化的差异;I表示施加高程异常改正后的正常高变化精度提升幅度。

由表3~7可知,XIJI、NLSH、CHPN、CHAO和DSQI这5个GNSS基准站,多年GNSS与地表质量负荷数据联合确定的正常高变化与水准测量正常高变化结果差值均小于11 mm,其中NLSH、CHPN、CHAO和DSQI站的正常高变化精度大部分优于5 mm,NLSH站各年的正常高变化结果符合最好。2016年、2017年XIJI站的正常高变化结果差异略大,达到了11 mm,2018年、2021年也达到了10 mm。检查5个基准站的原始大地高数据,计算大地高离散系数(离散系数=标准差/平均值,该指标反映了大地高的离散程度),XIJI、NLSH、CHPN、CHAO和DSQI这5个站点的离散系数分别为-0.99、-0.45、0.51、-0.47和-0.43,XIJI站的离散系数为其他4个站点的2倍左右,表明XIJI站的GNSS大地高波动较大,数据质量相对差一些,这导致XIJI站正常高变化结果精度略低。

逐测站、多年份的比较结果表明,对5个GNSS基准站的大地高变化进行高程异常变化改正后,26组高差结果中有24组实现了正常高变化确定精度的提升,其中22组的正常高变化确定精度提升幅度在10%以上,17组的精度提升幅度超过20%,这充分证明了采用移去-恢复法和质量负荷格林函数积分方法推算地表质量负荷变化引起高程异常变化的正确性和精度,要利用GNSS基准站数据实现测站的高精度正常高动态维持,有必要施加高程异常变化改正。

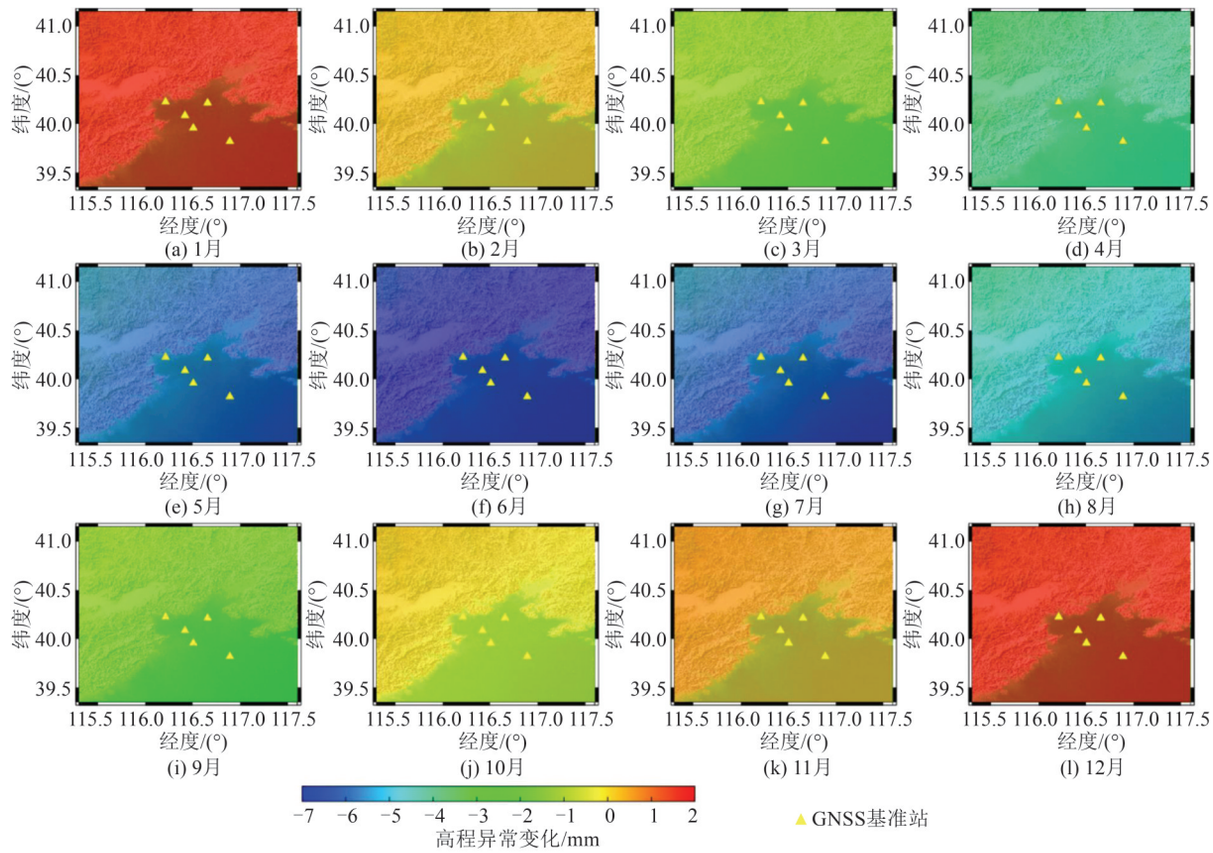


图3 陆地水储量变化引起的区域高程异常变化

Fig. 3 Regional Height Anomaly Changes Caused by Land Water Storage Variations

表2 GNSS基准站的高程异常变化统计/mm

Table 2 Statistics of Height Anomaly Changes at GNSS Reference Stations/mm

GNSS基准站	最大值	最小值	平均值	标准差
XIJI	5.2	−6.9	−1.0	3.4
NLSH	5.5	−6.3	−0.5	3.2
CHPN	5.5	−6.5	−0.6	3.3
CHAO	5.3	−6.6	−0.8	3.3
DSQI	5.4	−6.4	−0.5	3.2

3.4 GNSS基准站正常高变化外推精度分析

为了进一步研究分析GNSS基准站的高程基准动态维持能力,开展GNSS基准站正常高变化外推精度评估。分别对5个GNSS基准站的大地高变化进行时间序列分析,先基于最小二乘原理求解得到拟合参数,再重构计算得到大地高时间序列。为模拟GNSS基准站高程外推效果,分别舍弃2021年水准测量时刻前1个月、2个月和3个月的GNSS数据,进行正常高外推预测,以2021年水准观测时刻的正常高变化作为实测值进行外推精度检核,正常高变化外推结果精度见表8。

由表8可知,外推时间为1个月时,5个GNSS基准站的正常高变化外推均取得了较好的效果,XIJI、CHPN、CHAO站外推精度均优于5 mm,DSQI站外推误差最大,达到了−13 mm;当外推时间为2个月时,各测站的外推误差显著增大,有3个站误差接近或超过15 mm;当外推时间为3个月时,有4个站的外推误差接近或超过18 mm。结果表明,利用长期连续观测、数据质量良好的GNSS基准站数据,对基准站正常高进行1个月内的外推和预测是可行的。

4 结 语

本文提出了以GNSS基准站作为核心节点对区域高程参考框架进行动态维持的方法,该方法对GNSS基准站数据进行时间序列分析得到测站大地高变化,采用移去-恢复法和质量负荷格林函数积分方法,由陆地水储量、海底压力和大气压等地表质量负荷数据推算测站的高程异常变化,两者结合确定测站的正常高变化,从而对测站正常高进行动态修正。

利用北京市沉降区5个GNSS基准站的多年

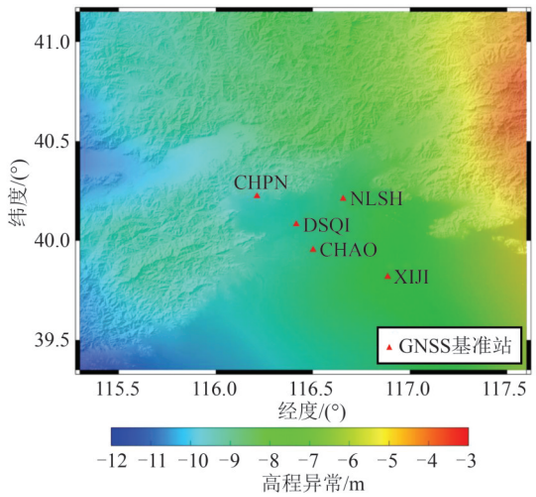


图4　利用EIGEN-6C4重力场模型计算的区域高程异常

Fig. 4　Regional Height Anomalies Based on Earth Gravity Field Model EIGEN-6C4

连续观测数据,联合GLDAS、ECCO全球海底压力、ECMWF全球大气压和北京市及周边区域实测大气压数据,确定了GNSS基准站的正常高变化。利用北京市沉降区一、二等水准复测数据对基于GNSS数据的正常高变化结果进行精度检核,结果表明:

1)多年GNSS与地表质量负荷数据联合确定的正常高变化与水准测量正常高变化比较,大部分差值小于5 mm,最大差值不超过11 mm,考虑到水准测量本身的误差,这一精度是相当可观的。在GNSS基准站具有长期连续观测数据、数据质量良好的情况下,利用GNSS数据确定的正常高变化对该测站的上一期水准测量正常高进行动态修正是可行的,能实现基于GNSS基准站数据的区域高程参考框架动态维持。

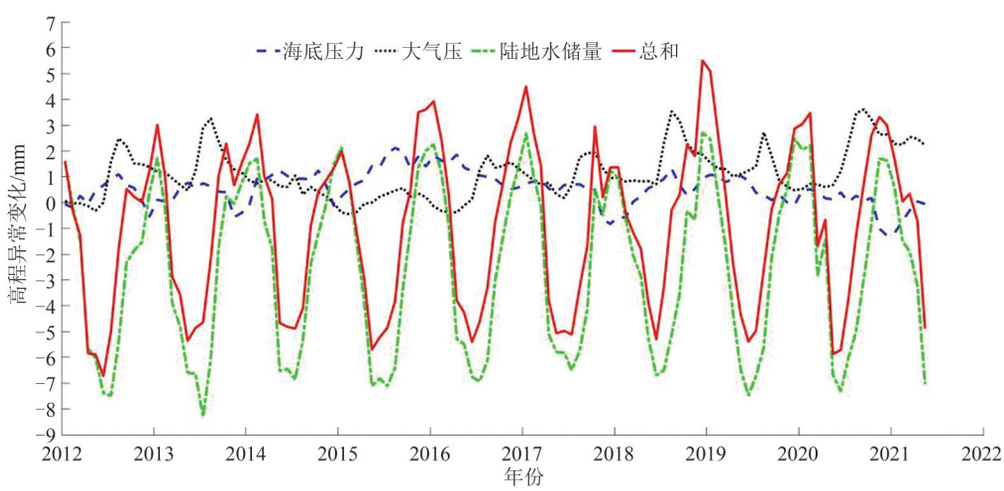


图5　地表质量负荷引起的GNSS基准站(CHPN)高程异常变化

Fig. 5　Height Anomaly Changes at GNSS Reference Station (CHPN) Caused by Surface Mass Loading

表3　XIJI站正常高变化精度验证结果/mm

Table 3　Accuracy Validation of Normal Height Changes at XIJI Station/mm

高差时间段	Δh	ΔH	ΔH_L	$\sigma_{\Delta H_L}$	$\Delta h-\Delta H_L$	$\Delta H-\Delta H_L$	I/%
2012—2016年	−31.3	−33.1	−44.0	6.5	12.7	10.9	14.2
2012—2017年	−40.2	−41.8	−53.0	7.3	12.8	11.2	12.5
2012—2018年	−54.3	−56.9	−67.0	7.2	12.7	10.1	20.5
2012—2019年	−67.6	−69.4	−74.0	7.4	6.4	4.6	28.1
2012—2020年	−84.8	−88.6	−85.0	6.5	0.2	−3.6	
2012—2021年	−79.6	−86.8	−97.0	6.6	17.4	10.2	41.4

2)采用移去-恢复法和质量负荷格林函数积分方法推算地表质量负荷变化引起的基准站高程异常变化,对基准站大地高变化进行高程异常变化改正后,92.3%结果的正常高变化确定精度提升幅度超过10%,65.4%结果的精度提升幅度在20%以上,证实了高程异常变化推算的正确性和施加该项改正的必要性。

3)利用GNSS时间序列分析和重构结果,对GNSS基准站正常高变化进行1个月以内的外推和预测是可行的,应慎重处理1个月以上的外推。

表4 NLSH站正常高变化精度验证结果/mm

Table 4 Accuracy Validation of Normal Height Changes at NLSH Station/mm

高差时间段	Δh	ΔH	ΔH_L	$\sigma_{\Delta H_L}$	$\Delta h-\Delta H_L$	$\Delta H-\Delta H_L$	I/%
2012—2016年	−134.4	−135.4	−138.0	5.5	3.6	2.6	27.8
2012—2017年	−163.3	−164.8	−162.0	5.7	−1.3	−2.8	
2012—2018年	−174.1	−179.2	−177.0	5.1	2.9	−2.2	24.1
2012—2019年	−161.5	−164.7	−164.0	5.1	2.5	−0.7	72.0
2012—2020年	−151.0	−151.8	−156.0	5.0	5.0	4.2	16.0
2012—2021年	−146.3	−152.8	−153.0	5.5	6.7	0.2	97.0

表5 CHPN站正常高变化精度验证结果/mm

Table 5 Accuracy Validation of Normal Height Changes at CHPN Station/mm

高差时间段	Δh	ΔH	ΔH_L	$\sigma_{\Delta H_L}$	$\Delta h-\Delta H_L$	$\Delta H-\Delta H_L$	I/%
2016—2017年	−17.9	−11.5	−2.0	4.0	−15.9	−9.5	40.3
2016—2018年	−12.8	−8.8	−2.0	3.7	−10.8	−6.8	37.0
2016—2019年	−5.4	−4.3	−2.0	3.7	−3.4	−2.3	32.4
2016—2020年	4.5	4.3	−1.0	3.5	5.5	5.3	3.6
2016—2021年	−1.1	−6.4	−4.0	3.5	2.9	−2.4	17.2

表6 CHAO站正常高变化精度验证结果/mm

Table 6 Accuracy Validation of Normal Height Changes at CHAO Station/mm

高差时间段	Δh	ΔH	ΔH_L	$\sigma_{\Delta H_L}$	$\Delta h-\Delta H_L$	$\Delta H-\Delta H_L$	I/%
2016—2017年	−31.2	−32.0	−32.0	6.8	0.8	0.0	100.0
2016—2018年	−66.2	−65.2	−63.0	6.8	−3.2	−2.2	31.3
2016—2019年	−86.7	−87.0	−87.0	6.0	0.3	0.0	100.0
2016—2020年	−111.6	−110.8	−104.0	6.0	−7.6	−6.8	10.5
2016—2021年	−110.4	−111.7	−114.0	6.6	3.6	2.3	36.1

表7 DSQI站正常高变化精度验证结果/mm

Table 7 Accuracy Validation of Normal Height Changes at DSQI Station/mm

高差时间段	Δh	ΔH	ΔH_L	$\sigma_{\Delta H_L}$	$\Delta h-\Delta H_L$	$\Delta H-\Delta H_L$	I/%
2017—2018年	−59.4	−59.9	−61.0	5.3	1.6	1.1	31.3
2017—2019年	−102.2	−101.6	−100.0	5.3	−2.2	−1.6	27.3
2017—2020年	−120.4	−120.8	−130.0	5.0	9.6	9.2	4.2
2017—2021年	−134.5	−140.7	−146.0	5.1	11.5	5.3	53.9

表8 GNSS基准站正常高变化外推精度/mm

Table 8 Accuracy of Extrapolated Normal Height Changes at GNSS Reference Stations/mm

站名	外推1个月	外推2个月	外推3个月
XIJI	−1.7	−7.9	−20.0
NLSH	−11.9	−16.8	−22.5
CHPN	−3.7	−7.9	−8.1
CHAO	−2.5	−14.9	−17.9
DSQI	−13.2	−21.8	−29.3

参 考 文 献

[1] 孔祥元,郭际明,刘宗泉.大地测量学基础[M].武汉:武汉大学出版社,2006.
KONG Xiangyuan, GUO Jiming, LIU Zongquan. Foundation of Geodesy[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006.

[2] 李建成.我国现代高程测定关键技术若干问题的研究及进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2007,32(11):980-987.
LI Jiancheng. Study and Progress in Theories and Crucial Techniques of Modern Height Measurement in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 980-987.

[3] 杨宏山,聂建亮.陕西地区垂直形变分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(11):1854-1859.
YANG Hongshan, NIE Jianliang. Analysis of Vertical Deformation in Shaanxi Area, China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(11): 1854-1859.

[4] 孙付平,贾彦锋,朱新慧,等.毫米级地球参考框架动态维持技术研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1688-1700.

SUN Fuping, JIA Yanfeng, ZHU Xinhui, et al. Advances in Dynamic Maintenance Technology of mm-Level Terrestrial Reference Frame[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1688-1700.

[5] PENNA N T, KING M A, STEWART M P. GPS Height Time Series: Short-Period Origins of Spurious Long-Period Signals[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B2): 2005JB004047.

[6] 袁林果,丁晓利,陈武,等. 香港GPS基准站坐标序列特征分析[J]. 地球物理学报,2008,51(5): 1372-1384.
YUAN Linguo, DING Xiaoli, CHEN Wu, et al. Characteristics of Daily Position Time Series from the Hong Kong GPS Fiducial Network[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(5): 1372-1384.

[7] KHODABANDEH A, AMIRI-SIMKOOEI A R, SHARIFI M A. GPS Position Time-Series Analysis Based on Asymptotic Normality of M-Estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(1): 15-33.

[8] SHEN Y Z, LI W W, XU G C, et al. Spatiotemporal Filtering of Regional GNSS Network's Position Time Series with Missing Data Using Principle Component Analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(1): 1-12.

[9] DIDOVA O, GUNTER B, RIVA R, et al. An Approach for Estimating Time-Variable Rates from Geodetic Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(11): 1207-1221.

[10] 姜卫平, 王锴华, 李昭, 等. GNSS坐标时间序列分析理论与方法及展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2112-2123.
JIANG Weiping, WANG Kaihua, LI Zhao, et al. Prospect and Theory of GNSS Coordinate Time Series Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2112-2123.

[11] KLOS A, BOS M S, BOGUSZ J. Detecting Time-Varying Seasonal Signal in GPS Position Time Series with Different Noise Levels[J]. *GPS Solutions*, 2017, 22(1): 21.

[12] 金波文, 王慧, 张建立, 等. 北极新奥尔松地区海平面变化和陆地垂直运动分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(4): 503-509.
JIN Bowen, WANG Hui, ZHANG Jianli, et al. Sea Level Change and Vertical Land Motion Along Ny-Alesund Coast in Arctic[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(4): 503-509.

[13] 马俊, 曹成度,姜卫平, 等. 利用小波包系数信息熵去除GNSS站坐标时间序列有色噪声[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(9): 1309-1317.
MA Jun, CAO Chengdu, JIANG Weiping, et al. Elimination of Colored Noise in GNSS Station Coordinate Time Series by Using Wavelet Packet Coefficient Information Entropy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(9): 1309-1317.

[14] 李建成, 李贤炮, 钟波. 利用GNSS地表形变反演区域陆地水储量变化的进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1724-1735.
LI Jiancheng, LI Xianpao, ZHONG Bo. Review of Inverting GNSS Surface Deformations for Regional Terrestrial Water Storage Changes[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1724-1735.

[15] JACOB T, WAHR J, GROSS R, et al. Estimating Geoid Height Change in North America: Past, Present and Future[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(5): 337-358.

[16] RANGELOVA E, SIDERIS M G. Contributions of Terrestrial and GRACE Data to the Study of the Secular Geoid Changes in North America[J]. *Journal of Geodynamics*, 2008, 46(3-5): 131-143.

[17] VAN DER WAL W, RANGELOVA E, SIDERIS M G, et al. Secular Geoid Rate from GRACE for Vertical Datum Modernization[C]//IAG Commission 2: Gravity Field,Chania, Crete, Greece, 2008.

[18] RANGELOVA E, VAN DER WAL W, SIDERIS M G. How Significant Is the Dynamic Component of the North American Vertical Datum?[J]. *Journal of Geodetic Science*, 2012, 2(4): 281-289.

[19] KRYNSKI J, KLOCH-GLOWKA G, SZELACHOWSKA M. Analysis of Time Variations of the Gravity Field over Europe Obtained from GRACE Data in Terms of Geoid Height and Mass Variation[C]//IAG General Assembly,Melbourne,Australia,2011.

[20] GODAH W, SZELACHOWSKA M, KRYNSKI J. On the Analysis of Temporal Geoid Height Variations Obtained from GRACE-Based GGMS over the Area of Poland[J]. *Acta Geophysica*, 2017, 65(4): 713-725.

[21] FARRELL W E. Deformation of the Earth by Surface Loads[J]. *Reviews of Geophysics*, 1972, 10(3): 761-797.

[22] VAN DAM T M, WAHR J, CHAO Y, et al. Predictions of Crustal Deformation and of Geoid and Sea-Level Variability Caused by Oceanic and Atmospheric Loading[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 129(3): 507-517.