

Dynamic Monitoring and Maintenance of Elevation Datum Based on CORS Station Network in Shandong Province, China

Jie Xu¹ Li Meng²

1. Shandong Provincial Institute of Land Surveying and Mapping, Jinan, Shandong, 250102, China

2. Shandong Urban Construction Vocational College, Jinan, Shandong, 250103, China

Abstract

For the difficulty to dynamically monitor and maintain the elevation datum in modern surveying datum system construction in Shandong Province, China because of land subsidence and other factors. Based on the coordinate time series analysis results of CORS continuous observation data and the observation data of land water storage, atmospheric and sea level changes, this paper obtains the normal height variation of CORS stations and improves the availability of elevation datum under the objective existence of land subsidence. The experimental results showed that: the difference between the normal height change determined by CORS station and the normal height change of two stages of leveling is less than or close to the normal high error of leveling, which shows that CORS station network has a higher accuracy in the dynamic maintenance of regional elevation datum.

Keywords

CORS station network; Shandong Province, China; elevation datum; dynamic monitoring

基于 CORS 站网的中国山东省高程基准动态监测与维护

徐杰¹ 孟黎²

1. 山东省国土测绘院, 中国·山东 济南 250102

2. 山东城市建设职业学院, 中国·山东 济南 250103

摘要

针对中国山东省在现代测绘基准体系建设中的高程基准因地面沉降等因素影响而难以动态监测与维护的问题, 论文以 CORS 连续观测数据的坐标时间序列分析成果和陆地水储量、大气及海平面变化等观测资料为数据基础, 获取 CORS 站点的正常高变化, 提升地面沉降客观存在条件下高程基准的可用性。实验结果显示: 利用 CORS 站确定的正常高变化与两期水准测量的正常高变化的差值低于或接近水准正常高中误差, 表明了 CORS 站网在区域高程基准动态维持中具备较高的精度。

关键词

CORS 站网; 中国山东省; 高程基准; 动态监测

1 引言

中国许多省份和地区已经建设了相对完善的连续运行参考站网络^[1]。山东省卫星定位连续运行综合应用服务系统 (Shandong Continuously Operating Reference Station System, SDCORS) 于 2007 年正式启动, 2011 年正式建成^[2]。该系统纳入地市和行业已建 CORS, 可为山东省提供实时定位和区域参考框架服务, 并在建立和维持国家和区域坐标参考框架中发挥重要的作用^[3]。

坐标参考框架是地心坐标参考系统的物理实现, 构成坐标参考框架的物理点通常固定与地球表面。由于地球的动态性质框架点会随地球表面一起运动变化, 使得维持坐

标参考框架的精确性成为一个动态的问题^[4]。就高程基准而言, 引起站点在高程方向变化的地球物理因素主要分为两大类, 一类是潮汐形变, 主要包括固体地球潮汐, 海洋负荷潮和极潮; 另一类是地球表面大气以及各态水质量迁移引起的地表质量负载变化^[5], 主要有大气压负载、水文负载、非潮汐海洋负载等, 这些负载具有明显的季节性变化特征 (非线性周期性变化)。针对第一类潮汐形变, 在 CORS 站的原始数据处理时, 已经通过相应的数学模型对其进行了补偿和改正, 而第二类形变目前主要采用负荷格林函数处理, 利用卫星对地观测数据集相关地球物理模型, 改正非构造形变对 CORS 站坐标时间序列的影响。

传统平面控制网和高程控制网分离的测量模式受技术条件和作业方式的限制, 通过水准测量监测站点正常高变化的效率低下且不利于长期连续的监测。为保持国家大地坐标系的高精度和现势性, 需要对现有高程基准进行持续的动态监测与维护。近年来, 随着 CORS 站网的互联共享

【作者简介】徐杰 (1983-), 男, 中国山东烟台人, 硕士, 高级工程师, 从事测绘基准体系的动态监测与维护研究。

机制和实时高精度定位技术的日益成熟,通过区域内若干连续运行的 CORS 站组网,充分利用 CORS 站观测全天候、高精度的特点,以及长期连续观测的累积历史数据,既可对区域乃至全国地壳运动、气象等瞬态和长期变化进行监测,又可提供各种高精度空间定位服务和多源信息服务。

论文充分利用 SDCORS 站网建成至今积累的大量观测数据,重构 CORS 站大地高时间序列;结合区域内的陆地水储量、大气和海平面数据,基于移去恢复法计算环境负载引起的似大地水准面变化;最后得到站点的正常高变化时间序列,实现山东省高程基准的动态监测与维护。与两期二等水准数据的检核结果表明,利用 CORS 站网数据确定正常高变化具备较高的精度。

2 基本原理

利用地面沉降区内选定的 SDCORS 站网连续观测数据,采用面向地表变形监测的数据处理策略,处理得到三维坐标时间序列并开展时间序列分析。SDCORS 站时间序列分析成果为大地高的变化,而中国目前使用的高程系统是正常高系统。

为了与水准测量成果保持一致,应该对 SDCORS 站点的大地高变化结果进行似大地水准面变化改正,以获得更精确的站点正常高变化,才能与水准测量确定的正常高变化进行独立比较。

论文根据陆地水储量、大气和海平面等观测资料,基于移去-恢复法计算 SDCORS 站点的似大地水准面变化时间序列。综合 SDCORS 站点的大地高变化和似大地水准面变化,得到站点精确的正常高变化时间序列,从而实现山东省高程参考框架的动态监测与维护,提升地面沉降客观存在条件下高程基准的可用性。基于 CORS 站网的高程基准动

态监测技术路线如图 1 所示。

3 数据处理方法

3.1 CORS 站大地高时间序列分析与重构

在区域内或周边选定若干个稳定的国际或国家 GNSS 基准站作为约束,处理 2015 年至 2019 年的 CORS 站数据,解算得到 CORS 站点的单日解,进而获取 CORS 站点 2015 年至 2019 年的周解。针对每座 CORS 站的大地高(U 方向)周解时间序列,以切比雪夫函数为基函数,对时间序列进行低频参数估计,求定线性项。移除线性项后,按低频参数重构大地高非线性变化时间序列,作为粗差探测的基准,按 3 倍残差标准差,探测并剔除粗差,迭代计算直至得到干净的大地高非线性变化时间序列。对时间序列散点重新进行拟合估计,得到低频周期参数,然后重构得到大地高非线性变化时间序列。

根据 CORS 站大地高时间序列的线性项和非线性低频周期参数,即可内插或外推给定两个时刻的大地高变化:

$$\Delta h = v \cdot (t_2 - t_1) + \Delta h'(t_2) - \Delta h'(t_1) \quad (1)$$

式中 t_1 、 t_2 为给定的两个时刻, v 为大地高线性速率, $\Delta h'(t_1)$ 、 $\Delta h'(t_2)$ 分别为在这两个时刻由低频周期参数重构计算得到的大地高非线性变化值。

3.2 似大地水准面变化

利用全球陆地水储量、大气压和海平面数据,基于地球负荷形变和地球重力场理论,采用基于负荷球谐系数及区域负荷格林函数的移去恢复方法,得到 CORS 站点的似大地水准面变化。

3.2.1 地表质量负荷数据的球谐展开

地球表层的陆地水储量、大气和海平面变化可用地面等效水高变化统一表示,地面点 (R, θ, λ) 处等效水高变化

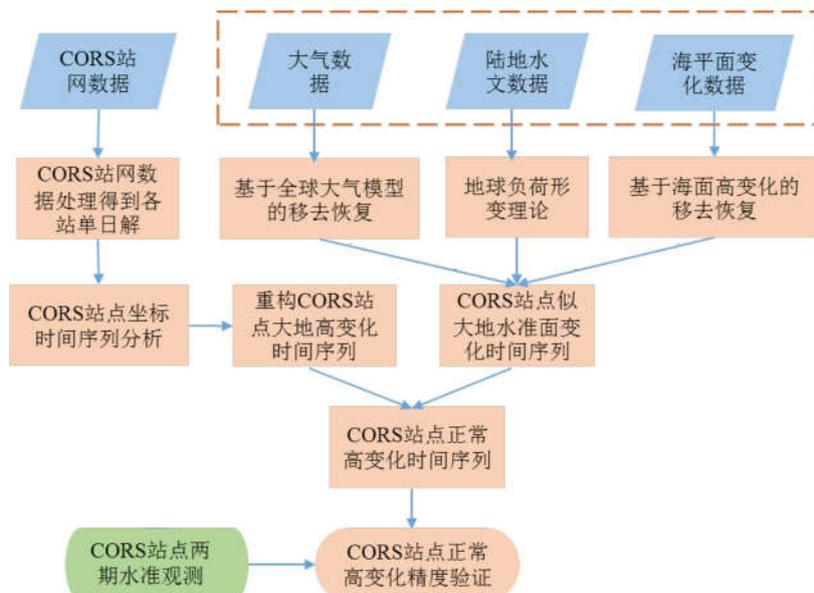


图 1 基于 CORS 站网的高程基准动态监测技术路线

Δh_w 可表示为规格化负荷球谐级数:

$$\Delta h_w(R, \theta, \lambda) = R \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [\Delta C_{nm}^w \cos m \lambda + \Delta S_{nm}^w \sin m \lambda] \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (2)$$

其中, R 为地球平均半径; $\Delta C_{nm}^w, \Delta S_{nm}^w$ 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 Legendre 函数。

由负荷形变理论可知, 地面及地球外部高程异常负荷影响为:

$$\begin{cases} \Delta \zeta = \frac{GM}{\gamma r} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n (1+k'_n) \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^w \cos m \lambda + \Delta \bar{S}_{nm}^w \sin m \lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \\ \Delta \bar{C}_{nm}^w = \frac{3}{2n+1} \frac{\rho_w}{\rho_e} \Delta C_{nm}^w \\ \Delta \bar{S}_{nm}^w = \frac{3}{2n+1} \frac{\rho_w}{\rho_e} \Delta S_{nm}^w \end{cases} \quad (3)$$

其中, G 为万有引力常数; ρ_w 为水的密度; ρ_e 为地球平均密度; M 为地球总质量; a 为地球长半轴半径; r 为地心距离; γ 为正常重力; k'_n 为 n 阶位负荷勒夫数。

3.2.2 基于格林函数积分计算区域负荷影响

单位质量在地表某点引起的引力位, 即直接影响为:

$$U'(\psi) = \frac{g\alpha}{M} \sum_n P_n(\cos \psi) \quad (4)$$

其中, g 为重力值, $\bar{P}_n(\cos \psi)$ 为完全规格化缔合 Legendre 函数, ψ 为计算点 (r, θ, λ) 与地面流动点 (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, 即间接影响为:

$$U_m(\psi) = \frac{g\alpha}{M} \sum_n k'_n P_n(\cos \psi) \quad (5)$$

单位质量引起的总变化为直接影响和间接影响之和, 即对应的格林函数为:

$$U(\psi) = U'(\psi) + U_m(\psi) = \frac{\alpha}{M} \left[\frac{1}{2s \sin(\psi/2)} + \sum_n k'_n P_n(\cos \psi) \right] \quad (6)$$

已知地面等效水高变化 Δh_w , 则高程异常变化为等效水高变化与格林函数的空间卷积:

$$\Delta \zeta = \rho_w \int_S \Delta h_w U(\psi) dS \quad (7)$$

其中, dS 为地面流动积分面元。

在分别求得陆地水负荷、大气压负荷、和海平面变化引起的高程变化后, 将其求和即可得到总负荷引起的高程异常变化:

$$\Delta \zeta = \Delta \zeta_{Air} + \Delta \zeta_{Lws} + \Delta \zeta_{Ocn} \quad (8)$$

其中, $\Delta \zeta$ 为总负荷高程异常变化; $\Delta \zeta_{Air}$ 为大气压负荷引起的高程异常变化; $\Delta \zeta_{Lws}$ 为陆地水负荷引起的高程异常变化; $\Delta \zeta_{Ocn}$ 为海平面变化引起的高程异常变化。

4 实验与分析

4.1 CORS 站数据处理

在中国山东省区域内或周边选定若干个稳定的国际或国家基准站作为约束, 处理 2015 年至 2019 年的 CORS 站数据, 解算得到 CORS 站点的单日解, 进而获取 CORS 站点 2015 年至 2019 年的周解。最终解算得到 20 个 CORS 站

的三维坐标周解时间序列 (N、E、U 方向), 时间段为 2015 年 6 月 1 日至 2019 年 7 月 30 日。然后从中筛选出时间段足以进行时间序列分析的 CORS 站, 最终实验采用的 14 个 CORS 站点列在表 1 中。

表 1 用于时间序列分析的 CORS 站点

序号	站名	序号	站名	序号	站名	序号	站名
1	河口 HEKO	5	下营 XIAY	9	桓台 HUTA	13	周村 ZHCU
2	济宁 JINI	6	禹城 YUCH	10	鄄城 JUCH	14	德州 DEZH
3	寿光 SDSG	7	临清 LINQ	11	寿光 SHGU		
4	武城 WUCH	8	东明 DOMI	12	临淄 LZWT		

按照 3.1 节的方法, 分别对每座 CORS 站的大地高周解时间序列进行分析和重构, 最终得到 14 个 CORS 站点的大地高非线性变化时间序列, 如图 2 所示。

4.2 CORS 站似大地水准面变化推算

首先准备和整理全球的陆地水储量、大气压和海平面数据, 以 2015 年 12 个月的数据平均值作为比对的基准数据, 然后用各个月份的数据与该平均值相减, 得到每个月相对于基准值的变化量。然后采用移去—恢复法计算地表环境负荷引起的高程变化。其中, 全球陆地水储、大气压和海平面数据来源如下:

①陆地水储量数据: 采用美国宇航局哥达航空中心和美国国家环境预报中心的全球大陆同化系统数据 (Global Land Data Assimilation System, GLDAS), 通过陆地表面建模和数据同化技术, 输出陆地表面各项水文参数 (如土壤湿度、土壤温度、蒸发量、降雨、径流和雪量等)。利用降雨观测值和太阳辐射等作为输入参数, 其空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 每月一值。时间段为 2015 年 1 月至 2019 年 11 月。从 GLDAS 模型水文数据 (NC 文件) 中提取所需的土壤湿度和雪当量, 并转换为相应等效水高。

②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, 其空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的两种数据, 每月一值, 时间段为 2015 年 1 月至 2019 年 8 月。以及中国气象数据网下载的中国地面气候资料月值数据集, 包含山东省及周边地区的 61 个气象站数据, 其时间段同样为 2015 年 1 月-2019 年 8 月, 一月一值。从 ECMWF 全球大气压模型数据 (NC 文件) 中提取所需的大气压数据, 并转换为相应等效水高。

③海平面变化数据: 采用的海平面异常数据是法

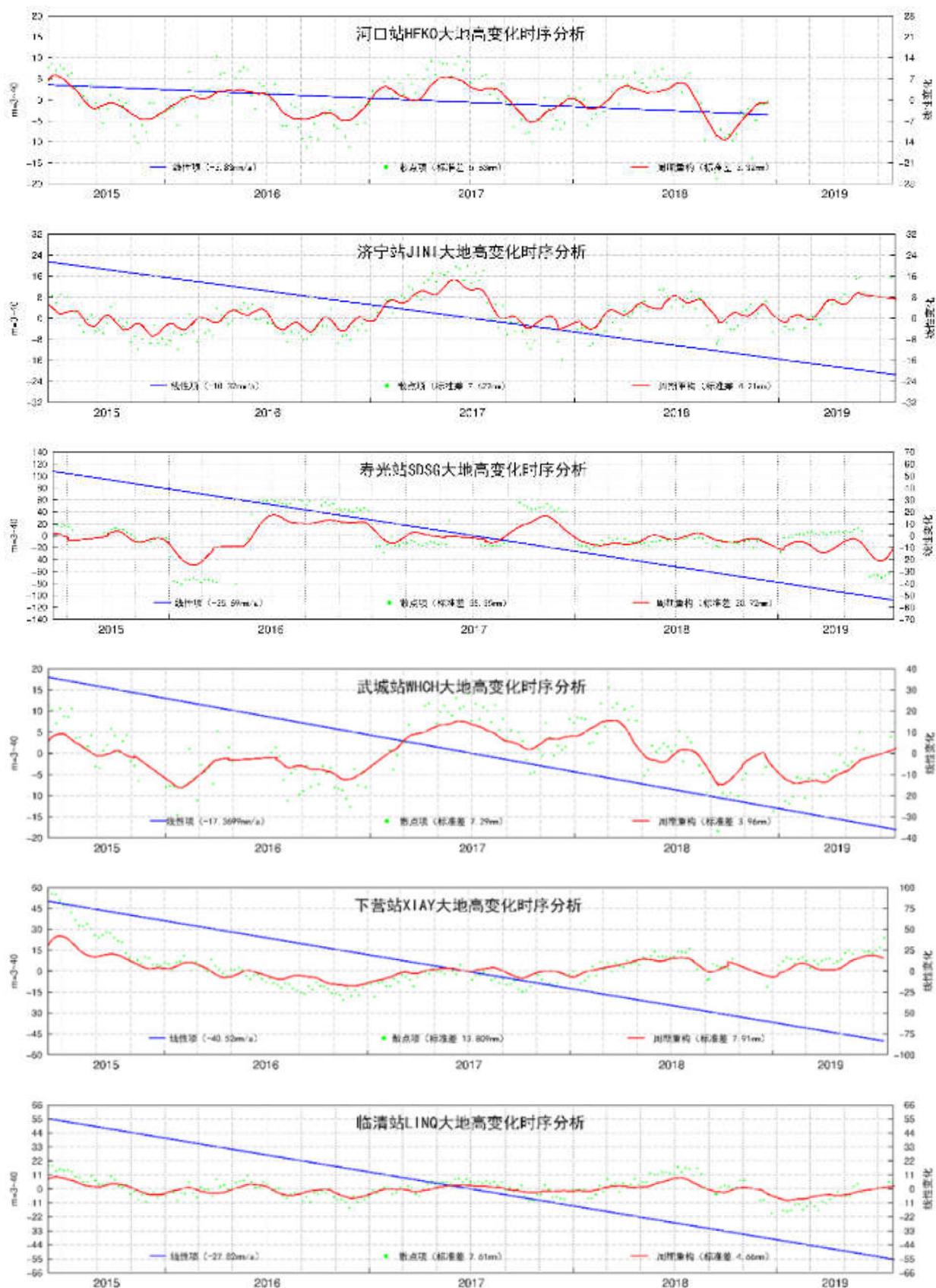


图2 CORS 站大地高时间序列分析与重构结果 (一)

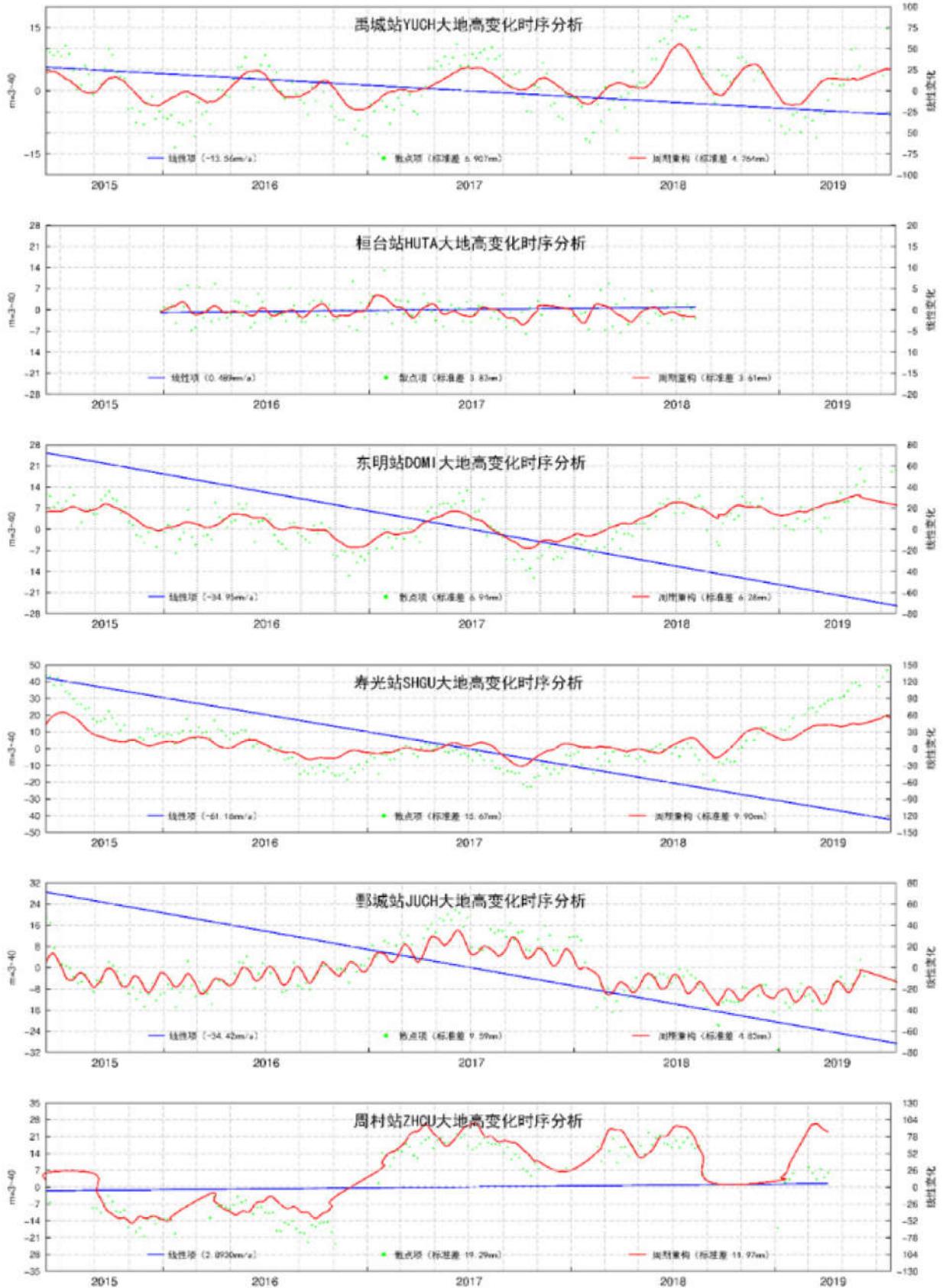


图2 CORS 站大地高时间序列分析与重构结果 (二)

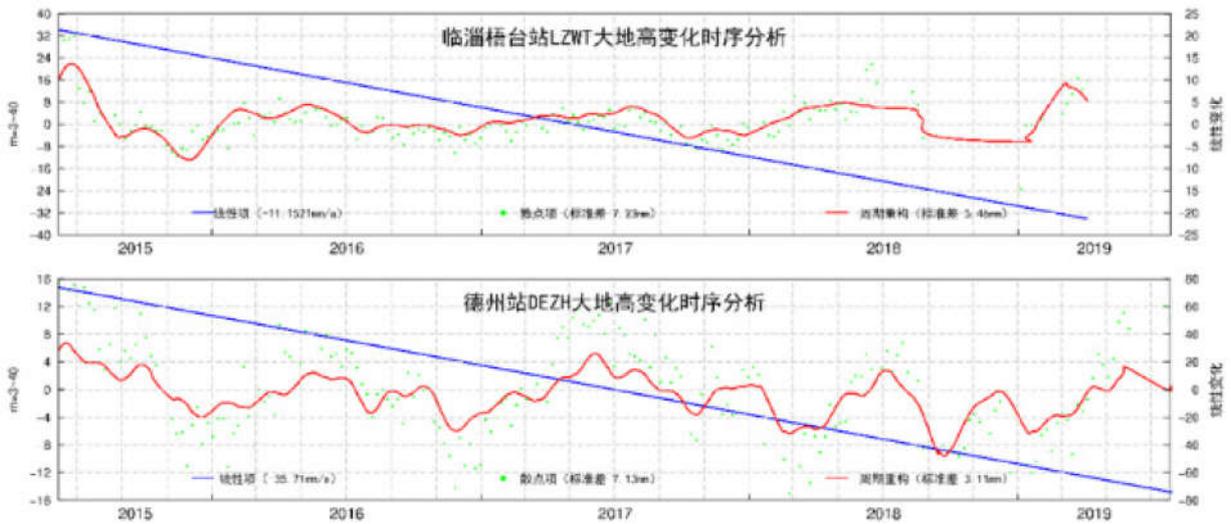


图2 CORS站大地高时间序列分析与重构结果(三)

国国家空间研究中心(CNES)的卫星海洋学存档数据(AVISO: Archiving, Validation, and Interpretation of Satellites Oceanographic Data)中心提供的网格化融合数据MSLA (Maps of Sea Level Anomaly), 由全球多种卫星测高月平均海面高异常生成, 分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的月值数据, 时段为2015年1月至2019年11月。从AVISO模型海面高数据(NC文件)中提取所需的海平面数据, 并转换为相应等效水高。

基于移去-恢复法计算地表环境负荷引起的似大地水准面变化的主要步骤为:

①将全球陆地水储量、大气压和海平面等数据转换为等效水高, 与平均值做差得到各月份等效水高变化量。根据球谐展开将等效水高变化转换为球谐系数, 然后利用球谐系数计算全球地表质量负荷变化引起的CORS站点高程异常变化。

②将站点处的区域陆地水储量、大气压和海平面数据转换成等效水高, 移去模型值, 得到等效水高的残差。将区域剩余等效水高变化网格化, 按负荷格林函数积分公式, 计算区域地表质量负荷变化引起的CORS站点高程异常变化的负荷精化量。

③将CORS站点的全球负荷模型量与区域负荷精化量

相加即可得到环境负荷引起的高程异常变化。

基于移去恢复法的似大地水准面变化推算流程如图3所示。

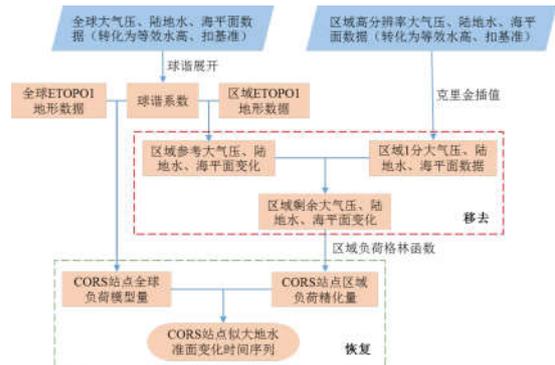


图3 基于移去恢复法的似大地水准面变化推算流程

最终推算得到14个CORS站点的高程变化时间序列, 时间段为2015年1月至2019年8月, 时间分辨率为1个月。由于似大地水准面变化主要为长波变化, 区域各个CORS站的高程异常变化非常接近, 可以用其中任意1个CORS站的高程异常变化来代表。表2中统计了14个CORS站的总负荷高程变化信息, 图4为HEKO站的总负荷高程变化时间序列, 所有CORS站的总负荷高程变化信息统计如表2所示。



图4 CORS站的总负荷高程异常变化时间序列图

表2 所有 CORS 站的总负荷高程变化信息统计
(单位: mm)

序号	最大值	最小值	平均值	标准差	序号	最大值	最小值	平均值	标准差
1	5.24	-6.90	-1.48	3.43	9	4.07	-8.02	-2.10	3.42
2	4.50	-8.02	-1.90	3.52	10	4.93	-7.39	-1.66	3.46
3	4.56	-7.79	-1.89	3.47	11	4.27	-8.00	-2.04	3.45
4	5.30	-7.00	-1.46	3.46	12	5.30	-7.00	-1.46	3.46
5	4.41	-7.52	-1.87	3.4	13	4.80	-7.52	-1.72	3.46
6	5.47	-6.78	-1.34	3.46	14	4.99	-7.34	-1.63	3.47
7	4.56	-7.62	-1.86	3.44	15	4.88	-7.44	-1.67	3.46
8	4.27	-7.66	-1.93	3.39	16	4.51	-7.46	-1.89	3.41

4.3 CORS 站正常高变化确定与结果验证

根据给定两个时刻的 CORS 站大地高变化和程异常变化,即可计算 CORS 站正常高变化。根据两期水准测量中 CORS 站的水准观测时刻,利用 CORS 站大地高时间序列分析得到的线性项和非线性低频周期参数得到大地高变化,结合利用陆地水、大气和海平面变化等数据推算的高程异常变化时间序列,计算得到两期观测时刻对应的 CORS 站正常高变化。

$$\Delta H = \Delta h - \Delta \zeta \quad (9)$$

其中, ΔH 为正常高变化, Δh 为大地高变化, $\Delta \zeta$ 为高程异常变化。

为了验证基于 CORS 站的高程基准维护方法是否达到国家等级水准测量的要求,将利用 CORS 站数据的正常高变化与水准测量的正常高变化进行比较,两者为不同观测数据得到的结果,相互独立,可以检核 CORS 站正常高变化的精度。

2019 年山东省水准成果共 3432.4KM,全部为二等水准。二等水准网覆盖整个山东省东部、西部、北部,一共有 34 条二等水准路线。二等水准网共组成闭合环 11 个,利用闭合环的环闭合差计算的每千米高差全中误差为 $\pm 1.3472\text{mm}$,最弱点高程中误差为 $\pm 19.08\text{mm}$,最弱测段高差中误差为 $\pm 3.80\text{mm}$ 。2015 年山东省水准成果共 4441.20KM,其中一等水准 1039.2km,二等水准 3402km。山东省二等水准网在国家一等水准网基础上布测,水准网覆盖整个山东省,一共有 168 条二等水准路线。本次计算只选用在 2019 年测区中的 51 条水准路线进行组网。二等水准网共组成闭合环 17 个,单独利用闭合环的环闭合差计算的每千米高差全中误差为 $\pm 1.8945\text{mm}$,最弱点高程中误差为 $\pm 24.18\text{mm}$,最弱测段高差中误差为 $\pm 5.52\text{mm}$ 。该实验利用测区 2015 年和 2019 年的两期水准网平差结果,对 14 个 CORS 站点的两期水准正常高做差,得到水准正常高变化,见表 3。

表 3 14 个 CORS 站点的正常高变化比较结果 (单位: mm)

序号	CORS 正常高变化	水准正常高变化	高程变化差值	2015 年水准正常高中误差	2019 年水准正常高中误差	CORS 数据时间段	两期水准观测时刻
1	-10.385	-17	6.615	21.92	18.69	20150606 20181215	20150506 20190625
2	-32.682	-27	-5.682	14.60	12.44	20150606 20190727	20150823 20190625
3	-125.861	-125	-0.861	24.16	16.64	20150606 20190727	20150704 20190726
4	-68.044	-67	-1.044	15.80	14.17	20150606 20190727	20150524 20190613
5	-187.003	-206	18.997	23.24	17.88	20150613 20190727	20150625 20190826
6	-51.894	-64	12.106	10.66	8.89	20150606 20190727	20150503 20190721
7	-115.436	-124	8.564	17.93	13.72	20150606 20190727	20150627 20190519
8	-133.511	-104	-29.511	19.94	15.25	20150606 20190727	20150529 20190603
9	-4.643	-18	13.357	16.47	15.73	20151226 20180804	20150526 20190829
10	-144.621	-144	-0.621	19.04	15.25	20150606 20190727	20150508 20190519
11	-234.325	-235	0.675	18.32	14.80	20150606 20190727	20150926 20190821
12	-49.167	-42	7.167	17.55	13.66	20150606 20190406	20190521 20190710
13	22.818	4	18.818	16.30	12.53	20150606 20190406	20150516 20190615
14	-144.711	-140	-4.711	14.17	13.2	20150606 20190727	20150626 20190609

表 3 为 14 个 CORS 站点的正常高变化比较结果,两种相互独立观测手段得到的正常高变化差值的最大值为 29.5 mm,平均值为 3.5 mm。分析表 3,14 个 CORS 站中的 13 个站的正常高变化差值均小于 2015 年或 2019 年平差后水准点的高程中误差,只有禹城 YUCH、东明 DOMI、周村 ZHCU 这 3 个 CORS 站的正常高变化差值略微超过平差后水准点的高程中误差,且只有东明 DOMI 站的正常高变化差值超过 20 mm,其它站点均小于 19mm。以上结果表明利用 CORS 站数据确定正常高变化具备较高的精度。

根据《国家一、二等水准测量规范》,二等水准测量的全中误差限差为 2mm/km,附和路线闭合差和环闭合差限差为,据此计算得到 CORS 站与水准测量的正常高变化最大差值和平均差值对应的水准测量路线长度见表 4。

表4 正常高变化差值对应的水准测量路线长度

正常高变化差值 (mm)	二等水准测量路线长度 (km)	二等水准测量附和或 闭合环长度(km)
最大差值 29.5	14.75	54.4
平均差值 3.5	1.75	0.8

由表3可知,在14个CORS站中,11个CORS站的有效数据时间段不足以覆盖两期水准观测时刻,CORS站大地高时间序列需要外推计算才能得到两期水准观测时刻的正常高变化,一般外推时间1~2个月,HEKO站外推时间达到6个月,HUTA站外推时间达到1年。考虑到水准测量误差、数据时间段与水准观测时刻不完全匹配等因素,利用CORS站数据确定的正常高变化结果(见表3和表4)具备较高的精度。在CORS站点具有长期连续观测数据、数据质量良好的情况下,可以利用CORS站数据确定的正常高变化对CORS站点的历史观测正常高进行动态修正,实现基于CORS站数据的区域高程基准动态维持。

5 结语

论文利用SDCORS站网连续观测数据,通过重构大地高变化时间序列,结合全球和区域的陆地水、大气压和海平

面观测资料,进行似大地水准面变化改正,从而得到站点正常高变化时间序列。14个CORS站点与水准测量数据的检核表明,基于CORS数据的正常高变化与两期水准测量的正常高变化的平均差值为3.5mm。因此,在CORS站点具有长期连续观测数据、数据质量良好的情况下,可以利用CORS站数据确定的正常高变化对CORS站点的历史观测正常高进行动态修正,实现基于CORS站数据的区域高程基准动态维持。

参考文献

- [1] 刘经南,刘晖,邹蓉,等.建立全国CORS更新国家地心动态参考框架的几点思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2009,34(11):1261-1265+1284.
- [2] 徐杰,孟黎,国兆新.基于CORS网的山东地壳运动速度场模型建立与分析[J].测绘科学,2017,42(7):70-75.
- [3] 张海平,高士民,周长志,等.SDCORS系统测试与技术性能分析[J].全球定位系统,2013,38(3):61-64+83.
- [4] 蒋志浩.CGCS2000参考框架维持、更新理论与方法研究[J].测绘学报,2019,48(12):1636.
- [5] 张恒璟.国家CORS基准站高程时间序列非线性时变研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013.