引文格式：杨金虎. GNSS垂向坐标时间序列周期特性及环境负载影响分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):83-86. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.018

GNSS垂向坐标时间序列周期特性及环境负载影响分析

杨金虎[1,2]
（1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司，重庆 400039；2. 重庆大学资源与安全学院，重庆 400044）

摘　要：为了揭示周年、半年和1/3年周期信号的变化特征及其空间分布，并探讨大气负载、非潮汐海洋负载和水文负载对这些周期信号的影响，本研究采用奇异谱分析方法，对北美洲沿海区域142个全球导航卫星系统（global navigation satellite systems，GNSS）测站的垂直坐标时间序列中的周期信号进行了提取和分析，结果显示，周年周期信号在所有周期中振幅最大，平均振幅为3.2 mm；其次是半年周期信号，平均振幅为0.8 mm；而1/3年周期信号振幅最小，平均为0.4 mm。这些周期信号在中纬度表现出较小振幅，而在低纬度和高纬度显示较大振幅。环境负载改正后，超过70%的测站显示均方根（root mean square，RMS）明显下降，且周年周期信号与环境负载之间存在强烈的一致性，尤其是大气负载和水文负载对GNSS垂直坐标时间序列的影响更为显著，各环境负载改正后的RMS平均改善幅度分别为14%、13%和8%，各周期项振幅也有不同程度的下降。本研究表明，通过对GNSS测站垂直坐标时间序列进行周期信号的精确提取和环境负载的有效改正，可以显著改善测站数据的质量，为高精度地表变形监测提供支持。

关键词：GNSS；坐标时间序列；周期信号；环境负载；奇异谱分析
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0083-04

Analysis of Periodic Characteristics of GNSS Vertical Coordinate Time Series and the Influence of Environmental Loading

YANG Jinhu[1,2]
(1. Chongqing Research Institute of China Coal Science and Industry Group Co., Ltd., Chongqing 400039, China;
2. College of Resources and Security, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To reveal the variation characteristics and spatial distribution of annual, semi-annual, and tri-annual periodic signals, and to explore the impact of atmospheric loading, non-tidal ocean loading, and hydrological loading on these periodic signals, we employed the singular spectrum analysis method to extract and analyze the periodic signals in the vertical coordinate time series of 142 global navigation satellite systems (GNSS) stations along the coast of North America. The results show that the annual periodic signal has the largest amplitude among all periods, with an average amplitude of 3.2 mm, followed by the semi-annual periodic signal, with an average amplitude of 0.8 mm, and the tri-annual periodic signal has the smallest amplitude, averaging 0.4 mm. These periodic signals exhibit smaller amplitudes at mid-latitudes and larger amplitudes at low and high latitudes. After environmental loading corrections, over 70% of the stations show a significant decrease in root mean square (RMS), with a strong consistency between the annual periodic signal and environmental loading. Especially the impact of atmospheric and hydrological loading on the GNSS vertical coordinate time series is more significant, with the average improvement in RMS after correction being 14%, 13%, and 8%, respectively. This study result demonstrates that the quality of station data can be significantly improved by accurately extracting periodic signals from GNSS station vertical coordinate time series and effectively correcting for environmental loading, supporting high-precision surface deformation monitoring.

Key words: GNSS, coordinate time series, periodic signal, environmental loading, singular spectrum analysis

近年来，大量学者对GNSS垂直坐标时间序列中季节性信号的研究取得了显著进展[1-5]。对周年时变季节性信号进行了较为深入的分析，提出了与地球物理学因素如降水和降雪等的相关性推测，但对较短周期的季节变化信号及其振幅变化的研究相对较少，这表明在GNSS数据处理及其环境负载改正领域仍有大量的研究空间[6-8]。

鉴于目前研究的现状和不足，本文旨在通过北美洲的沿海区域的142个GNSS测站的垂向坐标时间序列，深入分析坐标时间序列季节信号（周年、半年和1/3年）变化特征和空间分布，并探讨环境负载（大气负载、非潮汐海洋负载（non-tidal ocean loading，NTOL）和水文负载）对坐标时间序列的影响。

1　数据和方法

1.1　数　据

GNSS垂向坐标时间序列由SONEL网站提供，时间

项目来源：中煤科工集团重庆研究院有限公司自立重点资助项目（2023ZDYF15）；山西焦煤能源集团股份有限公司西山分公司自立资助项目（231401092023O6G）。
作者简介：杨金虎（1977—），硕士，高级工程师，主要从事桥隧坡监测、地质灾害监测等工作，E-mail：yl1148111@163.com。

分辨率为每天，时间跨度为2012—2021年。垂向坐标时间序列由GAMIT/GLOBK 10.7解算得到，解算过程中进行了地球自转参数、对流层延迟、电离层延迟、海潮、固体潮、极潮等一系列改正。具体的解算策略参考文献[9]。

本研究采用的环境负载数据源自法国地球科学实验室与学院提供的产品，在大气负载方面，选用了由欧洲中期天气预报中心（european centre for medium-range weather forecasts，ECMWF）提供的3 h分辨率地表气压数据，计算得出的大气负载位移时间序列。该序列能够精确反映大气压力变化对地表位移的影响。水文负载的数据则来源于MERRA2模型计算的时间序列。MERRA2模型通过综合考虑大气、陆面以及水文过程的相互作用，提供了一个全面的陆地水储量变化估计，有助于深入理解水文过程对地表位移的贡献。非潮汐海洋负载的分析则采用了基于ECCO2海洋底压模型计算得出的ECCO2位移时间序列。ECCO2模型以其高精度的海洋动力学模拟能力，为研究全球海洋负载变化提供了重要的数据支持。

1.2 周期项提取方法

首先使用奇异谱分析（singular spectrum analysis，SSA）方法[10]对坐标时间序列进行分解，根据时间序列的特性选择合适的窗口长度 L。然后按照式（1）构建轨迹矩阵：

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_K \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & \cdots & x_N \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，$x_1 \sim x_N$ 为点位坐标值。

对轨迹矩阵进行奇异值分解：

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{V}$ 为正交矩阵；$\boldsymbol{\Sigma}$ 为对角矩阵，包含奇异值。

时间序列分解后，根据奇异值向量的特征进行分组，对于每个分组进行重构：

$$Y_i=\boldsymbol{U}_i\boldsymbol{\Sigma}_i\boldsymbol{V}_i^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{U}_i\boldsymbol{\Sigma}_i\boldsymbol{V}_i$ 为对应于第 i 个分组的矩阵。

将每个重构信号按特征值贡献率由大到小进行排序，通常特征值贡献率最大的为趋势项，趋势项通常单独存在，成对出现的信号是周期项，利用快速傅里叶变换对周期项时间序列进行分析，进一步确定周期参数。

对于每个周期项进行拟合，拟合公式为：

$$h=a_1\sin(b_1t+c_1)+a_2\cos(b_2t+c_2)+e \tag{4}$$

式中，h 为某周期项时间序列；a_1, a_2 为振幅参数；b_1, b_2 为周期参数；c_1, c_2 为相位参数；e 为拟合残差。振幅可表示为：

$$A=\sqrt{a_1^2+a_2^2} \tag{5}$$

2 结果与分析

为了分析各周期成分的空间分布以及与环境负载的复杂关系，本文引入了振幅一致性（consistency of amplitude variation，CAV），其公式为：

$$\mathrm{CAV}=\frac{c}{t}\times 100\% \tag{6}$$

式中，c 为由不同因素导致的基准站位移变化与其坐标时间序列的年周期振幅变化一致的历元数（即两者的变化呈现同步增减的历元数量）；t 为观测总历元数。

为了量化环境负载对GNSS垂向时间序列的影响，本文采用RMS差值法，具体公式为：

$$\mathrm{RMS}_d=\mathrm{RMS}_g-\mathrm{RMS}_{g-l} \tag{7}$$

其中，

$$\mathrm{RMS}_g=\sqrt{\frac{(h(t)-\dfrac{\sum_1^n \frac{h(t)}{\mathrm{sig}(t)^2}}{\sum_1^n \frac{1}{\mathrm{sig}(t)^2}})^2}{\sum_1^n \frac{1}{\mathrm{sig}(t)^2}}} \tag{8}$$

$$\mathrm{RMS}_{g-l}=\sqrt{\frac{(h_{g-l}(t)-\dfrac{\sum_1^n \frac{h_{g-l}(t)}{\mathrm{sig}(t)^2}}{\sum_1^n \frac{1}{\mathrm{sig}(t)^2}})^2}{\sum_1^n \frac{1}{\mathrm{sig}(t)^2}}} \tag{9}$$

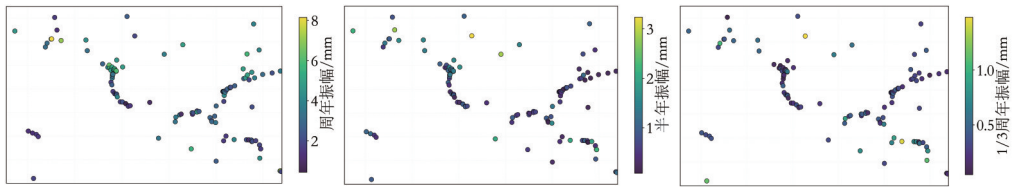
式中，$h(t)$ 和 $\mathrm{sig}(t)$ 为 t 时刻GNSS垂向坐标值和不确定度；n 为测站数目；$h_{g-l}(t)$ 为 t 时刻改正环境负载后的GNSS垂向坐标值。

2.1 周期特性分析

利用1.2节中的方法对坐标时间序列进行分解，具体步骤包括：轨迹矩阵的构建，奇异值分解，分组和信号重构等。窗口长度通常选取时间序列中各主要周期的最小公倍数，因此轨迹矩阵构建过程中的窗口长度为365。利用快速傅里叶变换识别了重构信号中的趋势信号（第1项）、周年周期信号（第2和第3项）、半周年周期信号（第4项和第5项）及1/3年周期信号（第6项和第7项）。

利用式（5）计算周年周期、半年周期和1/3年周期的振幅，其空间分布如图1所示。

由图1可得，周年周期振幅最大，研究区域周年



a 周年周期振幅空间分布　b 半周年周期振幅空间分布　c 1/3周年周期振幅空间分布

图1　周期信号振幅空间分布

周期振幅在1~8 mm之间，半周年振幅量级次之，其大小在0.2~3.1 mm，1/3年周年周期振幅最小，其大小在0.1~1.5 mm。经统计，研究区域周年周期项平均振幅为3.2 mm，半年周期项平均振幅为0.8 mm，1/3年周期项平均振幅为0.4 mm。

为了揭示研究区域各个周期项的空间分布特征，本文对各周期项按照纬度每10°取平均进行分析，结果如图2所示。

由图2可得，研究区域内，随纬度的升高，周年周期项振幅先减小后增大，且变化幅度较大。当纬度小于15°时，振幅呈现减小趋势；纬度在15~25°时，振幅变化不明显；当纬度超过35°时，振幅呈现递增趋势。半年周期项和1/3年周期项变化趋势较为一致，

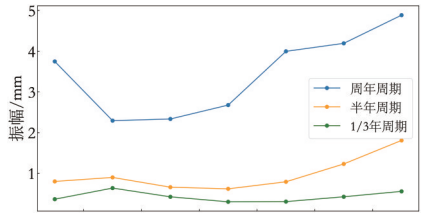
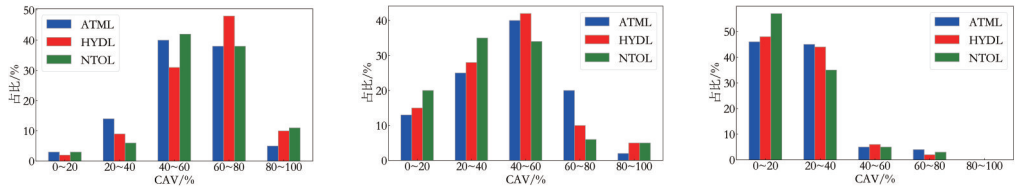


图2　各周期项随纬度的变化

当纬度小于15°时，振幅呈现上升趋势；纬度在15~35°之间时，振幅呈现下降趋势；当纬度超过35°时，振幅呈现上升趋势，且半年周期信号振幅上升速率较快。

2.2　环境负载的影响

环境负载是引起GNSS垂向坐标时间序列非线性运动的重要因素，首先计算了GNSS坐标时间序列与环境负载时间序列的一致性，结果如图3所示。



a 周年周期信号与环境负载的一致性　b 半周年周期信号与环境负载的一致性　c 1/3周年周期信号与环境负载的一致性

图3　周期信号与环境负载的一致性

由图3可得，周年周期项与环境负载的一致性非常强，经统计，周年振幅与环境负载的一致性的平均值为53.6%，其中水文负载的一致性最高，可达61.5%，非潮汐海洋负载的一致性较低。与周年周期项相比，半年周期项与环境负载的一致性则明显减弱，经统计，一致性的均值为38.8%，其中大气负载的一致性最高。1/3年周期项与环境负载的一致性最弱，平均值为20.6%。这说明，环境负载以周年周期信号为主。

为了分析环境负载对GNSS垂向坐标时间序列的影响，本文对改正环境负载前后的GNSS时间序列的RMS进行统计，由于篇幅限制，本文仅对研究区域的9个测站的结果进行展示，如表1所示。

表1　环境负载改正前后RMS的变化

测站名称	改正前RMS/mm	改正ATML RMS/mm	改善比/%	改正NTOL RMS/mm	改善比/%	改正NTOL RMS/mm	改善比/%
FAIR	9.58	8.143	15	9.01	6	8.72	9
NAIA	8.36	7.356 8	12	7.77	7	7.69	8
WILL	9.01	8.199 1	9	7.93	12	7.93	12
TFNO	8.23	6.254 8	24	7.57	8	7.08	14
PTAA	8.3	6.391	23	7.55	9	7.06	15
CACC	9.12	7.296	20	8.57	6	8.03	12
TIBB	8.15	6.846	16	7.58	7	7.42	9
UCOM	7.13	6.131 8	14	6.84	4	6.56	8
KRTM	6.08	5.168	15	5.72	6	5.53	9

由表1所示，展示的大部分测站经大气负载改正后RMS改善幅度最大，经水文负载改正后RMS改善幅度次之。经统计，经大气负载改正后，73%的测站RMS得以改善，平均改善幅度为14%；经水文负载改正后，76%的测站RMS得以改善，平均改善幅度为13%；经非潮汐海洋负载改正后，72%的测站RMS降低，平均改善幅度约为8%。由此可见，大气负载和水文负载对GNSS垂向坐标时间序列的影响较大，而非潮汐海洋负载对GNSS垂向坐标时间序列影响较小。

为了探究环境负载对各周期信号的影响，本文分别对改正环境负载前后的坐标时间序列进行周期拟合，并计算了环境负载改正后周期项振幅的降低幅度，计算公式为：

$$R=\frac{(A_g-A_{g-l})}{A_g}\times 100\% \tag{10}$$

式中，A_g 和 A_{g-l} 分别为改正前后的周期项振幅。

由表2可知，经过环境负载改正后，各周期信号的振幅均有不同程度的下降，其中周年信号的下降幅度较大。大气负载改正后周期信号的振幅下降最为明显，其次为水文负载。

表2 环境负载改正后各周期项振幅平均降低幅度

周期项	改正ATML	改正NTOL	改正HYDL
周年信号/%	16.1	8.3	12.5
半周年信号/%	7.3	4.2	5.4
1/3年信号/%	3.8	1.6	2.6

3 结 论

提取了北美洲沿海区域的142个GNSS测站的垂向坐标时间序列的周期信号，揭示了坐标时间序列不同周期信号（周年、半年和1/3年）变化特征和空间分布，探讨了环境负载（大气负载、非潮汐海洋负载和水文负载）对坐标时间序列的影响，得到如下结论：

1）研究区域GNSS垂向坐标时间序列中周年周期振幅最大，半周年振幅量级次之，1/3年周年周期振幅最小，研究区域周年周期项平均振幅为3.2 mm，半年周期项平均振幅为0.8 mm，1/3年周期项平均振幅为0.4 mm。各周期信号均表现出中纬度振幅较小，低纬度和高纬度振幅较大的特点。

2）周年周期项与环境负载的一致性非常强，与周年周期项相比，半年周期项与环境负载的一致性则明显减弱。经过环境负载的改正，超过70%的测站RMS有明显的下降，各周期信号的振幅也有不同程度的降低。经大气负载、水文负载和非潮汐海洋负载改正后，RMS平均改善幅度分别为14%、13%和8%。由此可见，大气负载和水文负载对GNSS垂向坐标时间序列的影响较大。

参考文献

[1] 贾彦锋,朱新慧,叶家彬,等. GNSS坐标非线性变化的差分长短时记忆网络预测[J]. 测绘科学,2022,47(10):89-95

[2] 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):2 112-2 123

[3] 徐琦,祝会忠,关沧海,等. 我国高纬高寒地区省级CORS站时间序列分析[J]. 测绘科学,2022,47(3):50-57

[4] 贾彦锋,朱新慧,孙付平,等. GNSS垂向坐标时间序列周年项振幅的时变特征及成因分析[J]. 地球物理学报,2023,66(1):162-172

[5] 冯腾飞,沈云中,王奉伟,等. 华北地区季节性垂直位移信号提取及物理机制分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(6):866-874

[6] 许锡文,张志伟,李辰凤,等. 环境负载对GNSS坐标时间序列噪声特性的影响研究[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(12):1 219-1 222

[7] Klos A, Bogusz J, Bos M S, et al. Modelling the GNSS Time Series: Different Approaches to Extract Seasonal Signals[J]. Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences, 2020: 211-237

[8] Wu S, Nie G, Meng X, et al. Comparative Analysis of the Effect of the Loading Series from GFZ and EOST on Long-term GPS Height Time Series[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2 822

[9] Gravelle M, Wöppelmann G, Gobron K, et al. The ULR-repro3 GPS Data Reanalysis and Its Estimates of Vertical Land Motion at Tide Gauges for Sea level Science[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(1): 497-509

[10] 张祎磊,边家文,丁开华,等. 基于改进的经验模态分解和SSA联合算法的GPS坐标时间序列重构[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(9):904-909

（上接第69页）

态区生态环境质量时空格局及驱动力分析[J]. 环境科学,2023,44(5):2 518- 2 527

[10] 吕明轩,张红,贺桂珍,等. 黄河流域水源涵养服务功能动态演变及驱动因素探究[J]. 生态学报,2024,44(7):1-5

[11] 方露露,许德华,王伦澈,等. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J]. 地理研究,2021,40(3):821-838

[12] 姬倩倩,潘焕焕,吴树荣,等. 山西黄河流域“三生”空间重构和降水变化对产水服务的影响[J]. 干旱区研究,2023,40(1):132- 142

[13] 肖芳,魏文颖,周斌 黄河流域生态系统服务与城市化时空交互作用分析:以黄河宁夏段为例[J]. 人民长江,2023,54(8):93-100

[14] 刘美娟,仲俊涛,王蓓,等. 基于InVEST模型的青海湖流域产水功能时空变化及驱动因素分析[J]. 地理科学,2023,43(3):411-422

[15] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 基于InVEST模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报,2020,31(8):2 731- 2 739

[16] 应超,李加林,刘永超,等. 东海海岸带县域城市韧性演化及影响因素[J]. 地理学报,2024,79(2):462-483

[17] 梁康,公丽,宋小青,等. 黄河水源涵养区土地利用变化的区域分异特征及未来格局[J].水科学进展,2024,35(2):325-337

[18] 刘如龙,赵媛媛,陈国清,等. 内蒙古黄河流域1990—2020年生境质量评估[J]. 干旱区研究,2024,41(4):674-683

[19] 浩日娃,周瑞平,胡斯乐,等. 黄河流域内蒙古段碳汇演变模拟及驱动因素分析[J]. 水土保持通报,2024,44(1):465-476