Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Precise Positioning and Geoinformation Science—Review

环境负载效应建模及其对GNSS坐标时间序列非线性变化贡献的最新进展与未来展望

李昭[a], 姜卫平[a,*], Tonie van Dam[b,c], 邹小伟[a], 陈渠森[a], 陈华[d]

[a] GNSS Research Center, Hubei Luojia Laboratory, Wuhan University, Wuhan 430079, China
[b] Department of Geology and Geophysics, The University of Utah, Salt Lake City, UT 84112-0102, USA
[c] Faculté des Science, de la Technologie et de la Communication, University of Luxembourg, Luxembourg 1359, Luxembourg
[d] School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

ARTICLE INFO

Article history:
Received 15 April 2024
Revised 17 July 2024
Accepted 6 September 2024
Available online 11 September 2024

关键词
环境负载
全球导航卫星系统
非线性变化
时间序列分析
地表质量分布
格林函数
球谐函数

摘要

全球导航卫星系统（GNSS）基准站坐标时间序列的非线性变化，与包括大气、水文及非潮汐海洋负载在内的环境负载效应造成的地表位移密切相关。随着地表质量产品精度、地球模型性能的持续提升及精密数据处理技术的不断发展，环境负载效应对GNSS坐标时间序列非线性变化影响的研究取得了显著进展。然而，理论研究的局限性、高时空分辨率地表质量观测数据的缺乏及GNSS技术类系统误差的耦合，导致环境负载位移与基准站非线性位移之间仍然存在不一致，环境负载产品针对不同区域的适用性和性能同样亟需进一步评估。本文阐述了环境负载建模方法、地表质量分布产品及环境负载服务机构，总结了近年来环境负载应用于全球及区域GNSS坐标时间序列非线性变化研究的最新进展，凝练了现有研究存在的科学问题并展望了未来的发展方向。基准站复杂非线性运动是限制当前大地坐标框架精度的主要因素之一，进一步优化环境负载建模方法，建立高时空分辨率、高可靠性的地表质量分布产品，探索冰盖和人类活动导致的地表质量变化等其他环境负载因素，建立最优数据处理模型及策略应用于全球基准站数据一致性重处理，有助于构建具有实际物理意义的毫米级基准站非线性运动模型，为21世纪中叶建立1 mm级地球参考框架提供理论支持。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. 引言

近30年累积的全球导航卫星系统（global navigation satellite system, GNSS）基准站坐标时间序列包含丰富的地球物理信息，为大地测量学及地球动力学研究提供了宝贵的基础数据。GNSS基准站坐标时间序列呈现显著的复杂非线性变化特征，研究建立基准站的非线性运动模型，对于确定基准站准确的位置和速度，建立和维持动态地球参考框架至关重要，而且能拓宽GNSS坐标时间序列在板块构造运动、冰雪质量变化、海平面变化等地学领域前沿课题的广泛应用，具有重要的科学意义和应用价值[1]。

大气、海洋、水等地表质量重新分布是造成GNSS基准站非线性运动的主要原因之一[2–3]。自20世纪80年代末起，国内外学者开始研究大气压、陆地水储量及海底压力变化导致的环境负载对GNSS坐标时间序列的贡献[4–9]，证实了包括大气压负载、水文负载及非潮汐海洋负载在内的三种已知环境负载造成的地表位移与GNSS基准站垂向位移强相关[1,4–8,10–18]。

* Corresponding author.
E-mail address: wpjiang@whu.edu.cn (W. Jiang).

2095-8099/© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文：Engineering 2025, 47(4): 26–37
引用本文：Zhao Li, Weiping Jiang, Tonie van Dam, Xiaowei Zou, Qusen Chen, Hua Chen. A Review on Modeling Environmental Loading Effects and Their Contributions to Nonlinear Variations of Global Navigation Satellite System Coordinate Time Series. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.09.001

随着地表质量产品精度、地球模型性能及精密数据处理技术的不断发展，环境负载对GNSS坐标时间序列非线性变化的影响研究已经取得了显著进展。然而，环境负载与GNSS基准站位移之间仍然存在差异。例如，环境负载位移仅能部分解释高程分量的周年、半周年振幅[7,14]。二者的垂直周年相位存在系统性偏差，且水平位移的相关性较低[7,15]。不同研究得出的关于环境负载对GNSS坐标时间序列非线性变化的贡献同样存在显著差异。由此提出了如下4个问题：①除三种已知的环境负载外，是否存在其他类型的负载或未知的地球物理效应可能造成GNSS基准站的季节性位移？②造成垂向周年相位的系统性差异和较低的水平位移相关性的原因是什么？目前的环境负载模型基于均匀地壳结构的弹性地球模型建立是否完美？③当前的各种环境负载产品哪一种能够最有效地修正GNSS基准站的非线性运动？④如何最小化由于未建模或建模不完善导致的GNSS技术类系统误差的影响？这些误差可能与环境负载效应耦合，造成GNSS基准站非线性运动的错误地球物理解释。基准站的复杂非线性运动是限制当前地球参考框架精度的主要因素之一，因此回答这些问题至关重要。

本文综述了环境负载效应建模及其对GNSS坐标时间序列非线性变化贡献的最新进展，探讨了造成二者不一致性的原因，并提出了解决方案。本文结构安排如下：第2节阐述环境负载效应建模方法、地表质量产品及相关服务机构；第3节总结近年来环境负载效应应用于全球及区域GNSS坐标时间序列非线性变化修正研究的最新进展；第4节凝练现有研究存在的科学问题并展望未来发展方向。相关成果有助于建立具有实际物理意义的毫米级基准站非线性运动模型，为实现1 mm级国际地球参考框架（ITRF）提供理论支持。

2. 环境负载建模方法及现有数据产品

2.1. 环境负载建模方法

环境负载效应造成的GNSS基准站位移建模通常采用负载格林函数或者球谐函数两类方法实现。其中，负载格林函数由Farrell基于Longman地球负载理论创建[19–21]。对于给定地球模型，从理论上推导出球对称地球在单位点质量负载下的静态格林函数，通过将大气、水、海洋等地表质量变化与负载格林函数进行卷积积分即可以得到该类负载造成的地表形变，如公式（1）所示[21]：

$$u=\int_{\Omega}\mathrm{mass}G_r(\Theta)\mathrm{d}\Omega \tag{1}$$

式中，r为地球半径；mass为地表质量变化，通常表现为格网数据；Θ为角距；Ω为地表质量变化覆盖的区域；$G_r(\Theta)$为格林函数，水平和垂直分量具有不同的数值；u为根据对应分量格林函数计算获得的地表位移。

球谐函数方法则通过将全球质量负荷展开成球面函数，根据站点位置对其球谐域积分求和，然后基于Farrell的负荷勒夫数定义，获取站心坐标系下的环境负载位移。其中，利用GRACE时变重力场模型提供的球谐系数计算地表垂向、水平弹性形变的数学公式如公式（2）~（4）所示[22]：

$$\Delta u(\theta,\lambda)=R\sum_{l=1}^{N_{\max}}\sum_{m=0}^{l}\frac{h_l'}{1+k_l'}\bar{P}_{l,m}(\cos\theta)(C_{l,m}\cos(m\lambda)+S_{l,m}\sin(m\lambda)) \tag{2}$$

$$\Delta n(\theta,\lambda)=-R\sum_{l=1}^{N_{\max}}\sum_{m=0}^{l}\frac{l_l'}{1+k_l'}\times\frac{\partial}{\partial\theta}\bar{P}_{l,m}(\cos\theta)\left(C_{l,m}\cos(m\lambda)+S_{l,m}\sin(m\lambda)\right) \tag{3}$$

$$\Delta e(\theta,\lambda)=\frac{R}{\sin\theta}\sum_{l=1}^{N_{\max}}\sum_{m=0}^{l}\frac{l_l'}{1+k_l'}\bar{P}_{l,m}(\cos\theta)m\left(-C_{l,m}\sin(m\lambda)+S_{l,m}\cos(m\lambda)\right) \tag{4}$$

式中，θ和λ分别为待求测站的余纬和经度；$\Delta u(\theta,\lambda)$、$\Delta n(\theta,\lambda)$和$\Delta e(\theta,\lambda)$分别为地表垂向位移、北向位移和东向位移；R为地球半径；$N_{\max}$为GRACE月重力场的最大阶数；l和m分别为阶数和次数；$\bar{P}_{l,m}(\cos\theta)$为完全规格化缔合勒让德函数；$l_l'$、$h_l'$和$k_l'$分别为$l$阶负荷勒夫数；$C_{l,m}$和$S_{l,m}$分别为GRACE时变重力场球谐系数，包括用于计算大气负载（ATML）、水文负载（HYDL）和非潮汐海洋负载（NTOL）位移的高频大气模型、大地水准面模型和高频海洋模型。

地表质量分布产品同样可以通过球谐函数方法计算环境负载位移，首先按球谐系数拟合法计算地表质量变化对应的球谐系数，如公式（5）所示[22]：

$$\begin{Bmatrix}\Delta C_{l,m}\\ \Delta S_{l,m}\end{Bmatrix}=\frac{3(1+k_l)}{4\pi\rho_{\mathrm{ave}}a(2l+1)}\int_{\mathrm{Earth}}\mathrm{mass}\,\bar{P}_{l,m}(\cos\theta)\begin{Bmatrix}\cos(m\lambda)\\ \sin(m\lambda)\end{Bmatrix}\sin\theta\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\lambda \tag{5}$$

式中，$\Delta C_{l,m}$和$\Delta S_{l,m}$分别为展开的球谐系数；r和ρ_{ave}分别为地球半径以及水的密度；k_l为一阶负荷勒夫数。

然后，根据公式（2）~（4）按照球谐函数方法计算地表质量变化造成的垂向（Δu）、北向（Δn）和东向（Δe）位移。值得注意的是，格林函数在全球尺度上是连续的，但数值计算以离散方式进行。在确定局部地区环境负载的影响时，格林函数方法通常优于球谐方法，但当阶次趋近于无穷时，格林函数方法和球谐方法在数学上是等价的[23]。

2.2. 地表质量分布产品

目前已知的环境负载包括三种：大气压负载（ATML）、水文负载（HYDL）及非潮汐海洋负载（NTOL）[24]。计算这三类环境负载造成的GNSS基准站位移所需要的地表质量分布产品主要包括地表大气压（SP）、陆地水储量（TWS）及海底压力（OBP）格网。其中，大气压、陆地水储量产品通常可以通过再分析数据集获得。再分析数据利用数据同化技术将各种来源的地面、高空气象等观测资料与数值模式的结果相结合，得到具有高时空分辨率、格点化、连续长时间跨度的后处理后历史资料数据集[25]。这一过程已广泛应用于气候变化、海洋科学和水文学等领域[26–30]。

应用于大气压负载建模的全球地表质量分布产品主要包括国家环境保护中心（National Center for Environmental Protection, NCEP）、现代回顾分析研究与应用（Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, MERRA）、全球地球观测系统正向处理仪器团队（Global Earth Observing System Forward Processing Instrumental Team, GEOSFPIT）和欧洲中尺度天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）提供的地表大气压格网。其中，NCEP和MERRA分别有两个版本，即NCEP-R-1、NCEP-R-2、MERRA-Land和MERRA-2。最常用的ECMWF产品主要包括ERA-Interim及ECMWF全球气候数据的第五代大气回顾分析（ERA5）。其中，得益于混合四维变分分析（4D-Var）和集合数据同化（EDA）技术，ERA5数据的精度最高[31]。这可能是因为ERA5将更多历史观测数据进行同化且进一步改善了地表参数化方案和云降水方案、修订了冰雪反照率和粗糙度参数化方案，因此模拟效果得到显著提升[32]。

应用于水文负载建模的全球地表质量分布产品主要包括由NCEP、MERRA、ECMWF、全球陆地数据同化系统（Global Land Data Assimilation System, GLDAS）、饥荒预警系统网络陆地数据同化系统（Famine Early Warning System Network Land Data Assimilation System, FLDAS）、WaterGAP全球水文模型（WaterGAP Global Hydrology Model, WGHM）和陆地表面径流模型（Land Surface Discharge Model, LSDM）提供的土壤湿度（soil moisture）、积雪深度（snow depth）等陆地水储量数据[33]。区域产品主要包括来自北美陆地数据同化系统（North American Land Data Assimilation System, NLDAS）、国家气候评估-陆地数据同化系统（National Climate Assessment-Land Data Assimilation System, NCA-LDAS）、FLDAS-中亚（FLDAS-Central Asia）、FLDAS-预报（FLDAS-Forecast）和中国陆地数据同化系统（China Land Data Assimilation System, CLDAS）的数据。其中，NLDAS目前以近实时（大约4天的延迟）方式运行，空间分辨率为0.125°，按小时时长覆盖北美中部[34]。NCA-LDAS产品覆盖美国本土及部分加拿大和墨西哥地区，空间分辨率与NLDAS相同，时间分辨率为一天[35]。FLDAS-Central Asia提供覆盖中亚区域的近实时产品（时间延迟约为一天），空间分辨率为0.01° [36]；FLDAS-Forecast覆盖非洲和中东区域，空间分辨率为0.25°，预测时长为5个月[37–38]。CLDAS是由中国气象局（China Meteorological Administration, CMA）研制的近实时产品（时间滞后两天），覆盖亚洲区域（0~65°N, 60~160°E），时空分辨率分别为1 h、0.0625° [39]。值得注意的是，除WGHM提供地下水数据以外，其余所有产品均只提供地表水分量。而且，除WGHM和LSDM提供包括土壤水、积雪、河流、湖泊等在内的地表陆地水储量以外[40]，其他产品仅提供如土壤湿度（SM）、积雪深度（SD）或雪水当量（SWE）等特定的陆地水储量分量。因此，目前针对GNSS基准站的水文负载位移建模通常使用这两种水文变量。

应用于非潮汐海洋负载建模的海底压力（ocean bottom pressure, OBP）数据可以从美国国家海洋合作计划（National Oceanographic Partnership Program, NOPP）制定的海洋环流及气候估值模型（Estimating the Circulation & Climate of the Ocean, ECCO）获得。ECCO基于麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology, MIT）研制的全球环流模型建立（https://www.ecco-group.org/products.htm），最新版本为ECCO-V4r4，但该产品覆盖时间段仅为1992—2017年。因此，ECCO-KFS（ECCO-Kalman Filter/Smoother）及ECCO2提供的近实时OBP产品通常用于修正GNSS坐标时间序列的非潮汐海洋负载位移。与ECCO-KFS应用的传统卡尔曼滤波解相比，ECCO2具有更高空间分辨率（0.25°×0.25°），而且数据同化过程考虑了海冰的影响，从理论上说精度、可靠性更高。

除ECCO外，海洋环流和潮汐模型（Ocean Model for Circulation and Tides, OMCT）、马克斯-普朗克研究所海洋模型（Max Planck Institute Ocean Model, MPIOM）和全球海洋再分析和模拟模型（Global Ocean ReanalYses and Simulations, GLORYS2v3）同样提供OBP数据。其中，德国地学研究中心（German Research Centre for Geosciences, GFZ）发布的OMCT模型覆盖全球，空间分辨率为1.875°×1.875°，时间分辨率为6 h。OMCT用于估算OBP的模型与ECCO不同，由GRACE数据驱动产生[41]，ECCO

则通过迭代优化方案产生。OMCT和ECCO在广阔海洋区域的相关性较弱，主要原因可能由于两者使用了不同的海底地形模型[42]。除全球OBP模型外，英国普鲁德曼海洋学实验室还开发了适用于欧洲地区的普劳德曼海洋实验室风暴潮模型（Proudman Oceanographic Laboratory Storm Surge Model, POLSSM），通过从英国气象局获取海面风压和大气压力预测每小时的海平面高度。POLSSM模型覆盖48°N~63°N和12°W~13°W的海域，空间分辨率为0.11°×0.16°，时间分辨率为1 h [43]。

此外，自2020年以来，GFZ提供的重力信息服务（Gravity Information Service, GravIS）还发布了基于最新GRACE、GRACE-FO数据获取的包括TWS和OBP在内的两套Level-3产品[44–45]：GFZ GravIS RL06和COST-G GravIS RL01，其时间跨度涵盖了2002—2023年。最新的全球陆地水储量数据集GLWS2.0（格陵兰及北极区域除外）则基于集成卡尔曼滤波方法，融合了GRACE/GRACE-FO和WGHM获得的地表质量变化。该数据集的优势是考虑了数据和模型的不确定性，但是产品时间段仅覆盖2003—2019年[46]。

表1列举了地表质量分布产品的详细信息。由于数据源、数据同化系统和使用的方法存在差异，各类地表质量分布产品表现为不同的时空分布特征[47]。国内外许多研究评估了不同区域地表质量分布产品的适用性[7,28,47–49]，证实了不同机构甚至相同机构提供的不同版本水文模型之间存在显著差异，因此根据其获得的环境负载位移针对不同区域GNSS基准站非线性运动修正的适用性也各不相同[6–7,15,29]。此外，部分产品的模拟精度仍待提高，如再分析数据提供的水文模型大多基于流域水文模型升尺度建立，但考虑不同气候、生态系统及地形区的径流生成和汇流机制有限，造成了模拟结果的不确定性[50]。而且，由于受到地理条件的限制，高纬度地区，特别是极地地区的地表观测站点稀缺且获取的有效地面观测数据匮乏，导致在利用观测资料对数值模拟产品进行质量评估时还会产生空间不稳定的问题[51–52]。因此，比较不同时空分辨率的再分析数据，选择合适的地表质量分布产品用于环境负载建模，尤其是水文模型，对于分析环境负载位移预测值与GNSS坐标时间序列之间的不一致至关重要，其结果有助于建立全球和区域GNSS基准站更为精确的环境负载位移模型。

2.3. 环境负载产品服务

除采用地表质量分布产品和GRACE时变重力场产品，根据格林函数或者球谐函数方法计算GNSS基准站的环境负载位移外，部分机构也直接提供环境负载产品，如表2所示。全球地球物理流体中心（Global Geophysical Fluids Center, GGFC）提供CE（Center of Earth）、CF（Center of Figure）及CM（Center of Mass）框架下的全球非潮汐大气、海洋及水文负载位移格网，使用初步参考地球模型（PREM）作为弹性地球模型；用户还可以通过输入GNSS基准站经纬度获取所需站点的环境负载位移时间序列。其中，水文负载位移的输入数据包括来自美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）的GLDAS数据集提供的土壤湿度及积雪深度，产品的时间跨度为1948—2012年，时间分辨率为一个月。非潮汐大气压负载位移的输入数据为NCEP SP数据，产品的时间跨度为1948—2015年，时间分辨率为6 h；非潮汐海洋负载位移的输入数据为来自ECCO的海底压力数据集，产品的时间跨度为1993—2014年，时间分辨率为12 h。

GFZ发布了1976年至今大气负载、非潮汐海洋负载及考虑湖泊、河流的水文负载日产品，空间分辨率为0.5°，并提供在CF和CM参考框架下预报时长为6天的负载预报产品[53]。水文负载产品的输入数据为LSDM，大气负载和非潮汐海洋负载产品的输入数据分别来自ECMWF的地表气压数据和MPIOM06的海底压力数据。

斯特拉斯堡大学地球科学实验室（Ecole et observatoire des Sciences de la Terre, EOST）发布了环境负载位移全球格网及ITRF站点在CF和CM参考框架下的负载位移时间序列，提供比GGFC和GFZ更广泛的产品[54]。应用于水文负载建模的陆地水储量数据来自GLDAS、ECMWF、MERRA及GRACE全球mascon解，大气负载建模使用的地表气压数据来自ECMWF和MERRA2，计算非潮汐海洋负载所用的海底压力数据来自ECCO，包括ECCO（kf080i）和ECCO2。

国际质量负载服务（International Mass Loading Service, IMLS）同样提供了基于各种再分析数据源的非潮汐海洋、大气和水文负载位移全球格网产品及特定ITRF站点的负载位移时间序列。其中，大气、水文负载位移基于MERRA2和GEOS-FPIT两种再分析产品获得，非潮汐海洋负载位移则基于MPIOM06提供的海底压力数据进行建模。上述四家机构（GGFC、GFZ、EOST和IMLS）发布的环境负载产品均基于格林函数方法建立。

2.4. GNSS坐标时间序列环境负载修正方法

针对GNSS坐标时间序列实施环境负载修正之前需要进行数据预处理。首先，通过插值所选机构提供的全球负载位移网格，或直接提取站点的负载位移时间序列（如果该站点属于ITRF站点），得到给定GNSS站点的环境负载

表1 常用地表质量分布产品详细信息

Type	Product	Period	Spatial resolution	Temporal resolution	Latency	Data sources
ATML	NCEP-R-1	1948–present	2.5°	6 h	2–3 days	SP
	NCEP-R-2	1979–present	2.5°	6 h	1 month	SP
	MERRA-Land	1980–2016	2/3° × 1/2°	6 h	—	SP
	MERRA-2	1980–present	0.625° × 0.500°	6 h	~3 weeks	SP
	ERA-Interim	1979.1–2019.8	0.75°	6 h	—	SP
	ERA5/ERA5-IB	1940–present	0.25°	1 h/1 month	~5 days	SP
	GEOSFPIT	2000–present	0.625° × 0.500°	3 h	Updated 3–4 times a day	SP
NTOL	ECCO2	1992–present	0.25°	24 h	Near real-time forecast	OBP
	ECCO-V4r4	1992–2017	0.5°	24 h	—	OBP
	GLORYS2v3	1993–2014	0.25°	24 h	—	OBP
	OMCT	1980–2017	1.875°	6 h	—	OBP
	MPIOM06	1976–present	1°	3 h	—	OBP
TWS	NCEP-R-1	1948–present	2.5°	6 h	2–3 days	SM and snow
	NCEP-R-2	1979–present	2.5°	6 h	1 month	
	MERRA-2	1980–present	0.625° × 0.500°	1 h	~3 weeks	SM and snow
	MERRA-Land	1980–2016	2/3° × 1/2°	1 h/1 month	—	SM and snow
	ERA5	1940–present	0.25°	1 h/1 month	5 days	SM and snow
	GLDAS	1948–present	1.00°/0.25°	3 h/1 d/1 month	1.5 months	SM, SWE, and canopy water
	NLDAS	1979–present	0.125°,over Central North America (25°N–53°N)	1 h/1 month	~4 days lag	SM, snow cover, and canopy water
	NCA-LDAS	1979–present	0.125°	1 d	—	SM and snow
	FLDAS-Global	1982–present	0.1°, quasi-global	1 month	twice a month	SM and snowpack
	FLDAS-Central Asia	2000–present	0.01°, Central Asia	1 d	~1 day	SM and snowpack
	FLDAS-Forecast	1981–present	0.25°, covering Africa and the Middle East (20°W–60°E, 40°S–40°N)	1 month	Near real-time forecast	SM and snowpack
	CLDAS	2017–present	0.0625°, covering Africa (0–65°N, 60°E–160°E)	1 h	~2 days	SM
	WGHM	1901–2019	0.5°	1 d/1 month	—	Soil water, runoff, groundwater recharge, surface snowpack, and changes in surface water stocks (e.g., vegetation canopy water, rivers, lakes, reservoirs, and wetlands)
	LSDM	1976–present	0.5°	1 d	1 day	SM, shallow groundwater, snow coverage, and surface water stored in rivers and lakes
	GEOSFPIT	2000–present	0.625° × 0.500°	1 h	Updated 3–4 times a day	SM, snow cover, and canopy water

ERA5-IB: ERA5 atmospheric loading assuming an inverted barometer (IB) ocean response.

位移时间序列。用户也可以按照第2.1节描述的方法自行计算更为严密的站点环境负载时间序列。其次，三种类型的负载位移（ATML、NTOL和HYDL）应分别针对所有选定的GNSS坐标时间序列的时间节点进行插值或平均。再次，去除GNSS坐标时间序列的线性趋势，用户应特别注意所选择时间范围内是否存在跳跃或地震事件，因为这些因素会显著影响线性趋势的准确性。最后，将预测的环境负载位移从非线性GNSS坐标时间序列残差中去除，获得环境负载修正后的基准站位移。需要注意的是，针对从GLDAS获取的HYDL时间序列，在进行环境负载修正之前应去除其明显的线性趋势，因为目前尚不清楚该线性趋势是否代表真实的水文信号[15]。对于其他HYDL产品，线性趋势相对较小，用户应评估是否需要在针对GNSS坐标时间序列实施HYDL修正之前去除该趋势。

表2 环境负载产品详细信息

Environmental loading type	Institution	Time	Temporal resolution	Spatial resolution	Model	Reference frame
HYDL	GFZ	1976–present	1 d	0.5°	LSDM	CF, CM
	GGFC	1979–2012	1 month	2.5°	GLDAS	CE, CF, CM
	EOST	2000–2016	3 h	0.5°	GLDAS version 1.0	CF, CM
		1980–present	3 h	0.5°	GLDAS version 2.0	CF, CM
		1980–2019	1 h	0.500° × 0.625°	MERRA-2	CF, CM
		1980–2016	1 h	0.50° × 0.67°	MERRA-Land	CF, CM
	IMLS	2000–present	3 h	2′	GEOSFPIT	CF, CM
		1980–present	3 h	2′	MERRA-2	CF, CM
ATML	GFZ	1976–present	3 h	0.5°	ECMWF	CF, CM
	GGFC	1980–2015	6 h	2.5°	NCEP	CE, CF, CM
	EOST	1979–present	6 h	0.5°	ERA-Interim	CF, CM
		2000–present	3 h	0.5°	ERA5-IB	CF, CM
	IMLS	2000–present	3 h	2′	GEOSFPIT	CF, CM
		1980–present	6 h	2′	MERRA-2	CF, CM
NTOL	GFZ	1976–present	3 h	1°	MPIOM06	CF, CM
	GGFC	1993–2014	12 h	2.5°	ECCO	CE, CF, CM
	EOST	1993–present	12 h	1°	ECCO	CF, CM
		1992–present	1 d	0.5°	ECCO2	CF, CM
	IMLS	1992–2013	1 d	0.5°	GLORYS2v3	CF, CM
		1980–present	3 h	2′	MPIOM06	CF, CM

EOST: the Laboratory of Earth Sciences (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre) at the University of Strasbourg; IMLS: the International Mass Loading Service.

获得经环境负载修正的站点位移后，可使用加权均方根（WRMS）分析、相关性分析和噪声分析等作为评估手段，通过不同负载模型之间的比较以及负载模型与GNSS坐标时间序列之间的比较，评估不同环境负载模型的质量及其对GNSS坐标时间序列的贡献[7,15,55–56]。

3. 环境负载对GNSS坐标时间序列的贡献最新进展

3.1. 水文负载对GNSS坐标时间序列非线性变化的贡献

水文负载（hydrological loading, HYDL）主要指陆地水储量变化造成的固体地球变形。陆地水储量包括地下水、土壤湿度及地表水（液态水、积雪和冰川冰）[24]。目前，获取GNSS基准站HYDL位移的方法主要包括三种：①基于GRACE获取的谱域地表变形；②利用全球或区域陆地水文模型数据，如ERA5、GLDAS等，与格林函数做卷积计算；③根据不同机构发布的全球负载位移格网或者站点列表，直接获取基准站的水文负载位移[15,57–58]。

大量研究已证实，HYDL导致的地表形变与GNSS基准站垂直位移之间存在强相关性[55,59]。利用基于GRACE产品获得的HYDL位移修正全球GNSS基准站垂直坐标时间序列后，站点的平均周年振幅降低率达47% [59]。针对存在明显季节性水文变化的区域，如亚马逊盆地、喜马拉雅山脉等地区，基于GRACE得到的HYDL位移与GNSS基准站的水平和垂直季节性形变都表现出较好的一致性[60–61]。然而，由于GRACE时空分辨率的限制，根据其获得的HYDL位移仅能反映大尺度范围内的陆地水储量月变化效应，无法精确捕捉局部细节变化。因此，它不适用于修正小尺度区域GNSS基准站的日变化或更高频坐标时间序列的非线性变化。例如，由于附近冰川、积雪等影响，亚马逊盆地南部西海岸GNSS基准站位移与GRACE结果之间存在显著差异[62]。将GRACE陆地水储量数据应用于台湾地区等小尺度区域研究时，还会造成泄露误差导致GRACE显著低估水储量变化振幅[63]。

与GRACE方法相比，随着数据同化技术水平的提升和遥感数据的快速增加，全球和区域水文模型的时空分辨率越来越高。许多水文模型被广泛应用于GNSS坐标时间序列HYDL相关研究，但是主要聚焦于土壤湿度和积雪深度造成的地表位移[6,13,17,53,64–67]。在中国区域，HYDL主要影响GNSS基准站的垂向分量，土壤湿度造成的位移量级显著大于积雪深度，且存在明显的纬度带分布特征[15]。考虑河流及湖泊水位变化后，基准站的垂直位移与HYDL位移一致性显著提高（0.86 vs. 0.4）[17,65]。北美区域水文模型NLDAS-2针对美国板块边界观测

（PBO）网GNSS基准站非线性变化的修正效果较全球GLDAS模型提高了超过10% [68]。在全球范围，根据陆地表面流量模型LSDM和GLDAS获得的HYDL位移在落基山脉、亚马逊盆地、拉普拉塔河盆地和喜马拉雅高原沿线等地区存在显著差异，其中亚马逊河流域的位移振幅高达16 mm [53]。MERRA-Land产品在降低全球GNSS基准站周离散度方面的性能最优，NCEP效果最差[6]。然而，MERRA2在修正全球日尺度GNSS坐标时间序列非线性变化方面表现更好[66]。2020年发布的最新产品ERA5的时空分辨率均显著高于其他再分析产品。其中，ERA5水文模型与利用GPS计算获得的综合水蒸气（IWV）的相关性最高达0.9，有望进一步改善全球GNSS日坐标时间序列非线性变化的修正效果[67]。

总的来说，不同机构提供的全球及区域水文模型之间存在显著差异，导致根据其计算获得的HYDL位移对GNSS坐标时间序列的贡献各不相同，针对不同区域的修正效果也参差不齐[6,15,17,59,66–67]。通过组合不同机构提供的GRACE卫星重力场获得的HYDL位移，可以有效地抑制甚至消除噪声，确保其较强的全球适用性，能够在不同尺度范围内为用户提供更加准确的HYDL结果[69]。需要注意的是，根据地表质量分布产品计算HYDL位移时，通常只考虑土壤湿度和积雪深度两个分量，忽略了地下水、河流等因素的影响。根据GRACE获得的HYDL位移则代表了包括地下水在内的总的陆地水储量的贡献。用户需根据基准站具体的地理位置选择合适的方法和产品进行HYDL建模，以研究其对于GNSS基准站非线性运动的贡献。

3.2. 大气负载造成的GNSS基准站非线性位移

大气负载（atmospheric pressure loading, ATML）主要指由地表气压再分布引起的地球弹性响应[70]。当前，GNSS基准站的ATML位移通常基于负载格林函数方法获得，将地表气压格网与格林函数做卷积计算（见第2.1节），或直接根据不同机构发布的全球网格/站点列表获取位移产品（见第2.3节）。ATML是造成GNSS基准站非线性运动的重要因素之一，根据受力来源不同，可以分为两个部分：①温度变化导致的潮汐ATML，主要表现为周日（S1）、半周日（S2）及更高谐波频率的振荡，其造成的地表垂直形变的振幅与海洋潮汐负载中某些潮汐分量的影响量级相同；②极端天气变化、海陆分布、大气水汽变化等因素引起的非潮汐ATML是大气负载最主要的组成部分[7,71–72]，造成的季节性地表形变达24 mm（俄罗斯的ARTU基准站）。非潮汐ATML位移与全球及区域GNSS坐标时间序列强相关[5,7,73]，但是最新的第三次全球GNSS数据重处理（repro3）并未考虑该因素的影响。针对GNSS坐标时间序列实施ATML修正时，用户需首先确认是否在数据处理过程中考虑了大气潮汐的影响。如果已经针对大气潮汐进行了建模修正，则计算的ATML应仅包括非潮汐分量；否则，对潮汐和非潮汐ATML分量都需要进行修正。

自20世纪开始，众多学者开始研究ATML对全球GNSS坐标时间序列非线性变化的贡献[4,7,11,29]，发现其造成的季节性垂向形变存在显著的区域特征，高纬地区量级明显高于低纬地区，南半球大陆站点的负载位移量级仅为北半球相应纬度区域的1/3~1/2 [5,7,11,73–75]。经过ATML修正后，71%的全球IGS测站垂向坐标时间序列离散度降低[76]，周年振幅减小最大达1.6 mm [77]。Li等[7]评估了全球不同时空分辨率的地表气压数据应用于ITRF2014框架点高程时间序列非线性变化修正的效果，发现ERA-interim产品在降低GNSS垂直离散度方面的性能明显优于NECP-R-2及MERRA（90.3%>89.1%>86.4%）。此外，由于所使用的陆海掩膜、反气压（IB）效应和地表气压格网的影响，根据不同模型获得的ATML位移在沿海地区差异显著[7]。不同机构提供的高海拔地区地表气压同样呈现较大差异，导致根据其获得的ATML位移各不相同[7,29,56]。考虑地形的ATML建模方法能够更好地解释GNSS坐标时间序列的非线性变化（74% vs. 48% [12]）。

就区域尺度而言，现有研究主要集中在美国及中国区域。Martens等[29]发现施加ATML修正能显著减小美国和阿拉斯加相邻地区GNSS基准站坐标时间序列的离散度（5%~30%），但是针对五种不同GNSS数据产品的修正效果略有差异（平均差异约为4%），证实了GNSS数据处理策略与ATML模型的相关性。在中国区域，ATML造成的华东、华北和东北部分地区地壳垂直形变是青藏高原地区的两倍（约20 mm vs. 约10 mm [72]）。经ATML修正后，中国地壳运动观测网络（Crustal Movement Observation Network of China, CMONOC）基准站垂向坐标时间序列离散度减小最高达24% [17]。而且，采用IMLS、GFZ及EOST等不同机构的ATML产品修正CMONOC垂向坐标时间序列非线性变化效果的差异最大达15% [56]；尽管NASA发布的产品更适合应用于中国区域的环境负载研究，但目前使用的大多数产品仍然来自GFZ。此外，Hu等[78]发现在云南地区利用GFZ、EOST和IMLS发布的非潮汐ATML产品不能有效地修正GPS垂向坐标时间序列的季节变化。因此，仍需进一步深入评估不同ATML产品应用于修正全球和区域GNSS基准站非线性运动的适用性。

3.3. GNSS基准站非潮汐海洋负载位移的时空分布特征

大气环流驱动的海洋内部质量重新分配造成的洋底压力（ocean bottom pressure, OBP）变化引起的地壳形变称为非潮汐海洋负载（non-tidal ocean loading, NTOL）[79–80]。NTOL建模方法与ATML类似。具体来说，采用负载格林函数方法获取GNSS基准站的NTOL位移，可以通过将OBP格网与格林函数做卷积计算，或直接从公开发布的NTOL产品获取数据。NTOL造成的全球GNSS基准站垂直位移同其与海岸线的距离相关，近海区域（<50 km）测站的NTOL位移远大于内陆区域测站（>500 km）[81–82]。例如，在波罗的海哥特兰岛附近，由1 m水层造成的地壳垂直变形约为21 mm，而拉脱维亚西海岸垂直变形达16 mm [83]。相比之下，NTOL造成的内陆测站垂向位移最大仅约2 mm [80]。就区域尺度而言，中国大陆构造环境监测网络CMONOC基准站的NTOL垂直位移平均约为2~3 mm，在胶东半岛和辽东半岛区域最大可达3.5 mm [10]。考虑NTOL和ATML的综合影响可以使得北海南部地区GNSS测站的垂向位移时间序列离散度降低20%~30% [16]。其中，NTOL位移与北海沿岸测站3 h亚日解坐标时间序列的相关系数最高可达0.7 [84–85]，而风暴潮极端天气事件造成的NTOL垂向位移最高可达20 mm [86]。

受风、大洋环流及其他环境要素的影响，NTOL对近海岸GNSS测站的影响也存在显著的区域差异[87]。例如，NTOL造成的大西洋西海岸GNSS测站垂向位移的最大振幅可达13.1 mm，而东海岸的垂向位移最大振幅却普遍约为2.9 mm [82]；西格陵兰Upernavik Isstrom附近GNSS观测站的NTOL垂直位移小于2 mm，但格陵兰冰盖东南部沿海地区部分站点的NTOL垂直位移则超过10 mm [8,88]。利用不同OBP模型获得的NTOL也存在差异，基于高分辨率区域模型估计的NTOL修正GNSS坐标时间序列非线性变化的效果显著优于全球模型。例如，ECCO模型较OMCT更适合修正全球GNSS基准站高程时间序列，其原因可能是ECCO的空间分辨率更高，而且现场实测数据参与了ECCO模型同化[12,42]。与全球ECCO模型相比，高时空分辨率POLSSM模型修正欧洲北海区域GNSS基准站高程时间序列非线性变化的效果改进了约11% [16]，澳大利亚的高分辨率区域模型也捕获了全球模型未能发现的高频海洋动态变化[86,89–90]。

综上所述，NTOL对GNSS坐标时间序列非线性变化的贡献小于HYDL和ATML，但是其造成的近海基准站位移可达毫米甚至厘米量级，并且呈现不同的时空分布特征。目前，应用于NTOL解算的OBP产品种类较少，时空分辨率较低，且不同产品之间还存在差异。未来，亟须进一步提高全球及区域OBP模型的时空分辨率，针对各种NTOL产品进行全面的质量评估，建立更精确的NTOL位移用于全球及区域GNSS坐标时间序列非线性变化研究。此外，ATML建模普遍采用的反气压效应（IB）在近海区域可能会与NTOL产生耦合，导致当前近海区域GNSS测站坐标时间序列非线性变化的修正效果不佳[54,70]，未来也需要进一步精准评估ATML与NTOL针对近海区域基准站非线性运动的贡献。

3.4. 水文、大气、非潮汐海洋负载的综合影响

目前已知的环境负载主要包括上述水文、大气及非潮汐海洋负载三种。忽略环境负载的影响，可能会导致基准站速度估计的偏差[91–92]。利用不同机构发布的地表质量分布和环境负载产品分析全球及区域基准站环境负载位移时空变化特征，有助于在一定程度上削弱GNSS坐标时间序列的非线性变化，提高基准站位置和速度估计的准确性。Dong等[13]证实了包括大气、非潮汐海洋和水文负载在内的三种环境负载可以解释全球GPS测站垂直方向大约40%的季节性信号。Jiang等[15]通过比较不同环境负载模型对全球IGS站坐标时间序列的贡献，证实了水文模型的差异、格网内插和地形修正是造成基准站环境负载位移差异的主要原因。Klos等[93]发现利用EOST产品实施环境负载修正可以使全球多数IGS基准站坐标时间序列的离散度降低至少25%，并显著降低站点速度的不确定性。He等[66]综合比较了EOST、GFZ和IMLS提供的18种环境负载产品对全球GNSS坐标时间序列非线性变化的贡献，进一步证实了同一机构提供的不同模型之间，甚至不同机构提供的相同模型之间都存在差异；经最优环境负载组合模型（ECMWF_IB+MERRA2+ECCO1）进行非线性修正后，84.6%的基准站垂向季节信号振幅减小。最新的研究结果表明，三种已知环境负载可以解释第三次全球GPS重处理获得的900个IGS基准站高程时间序列大约43%的周年变化[57]。考虑环境负载效应将有助于进一步提升大地测量参考框架的精度。例如，修正HYDL效应可以显著减少通过甚长基线干涉（VLBI）技术获得的全球参考框架[即国际地球参考系统（International Terrestrial Reference System，ITRS）的实现，慕尼黑技术大学德国大地测量研究所（DGFI-TUM）于2016年8月发布的DTRF2014]尺度的周年信号。考虑NTAL和HYDL效应后，DTRF2014原点的周年信号消失，通过VLBI和卫星激光测距（satellite laser ranger, SLR）获得的尺度周年信号也显著减小[94]。

针对环境负载对区域GNSS坐标时间序列的贡献研究

目前主要集中在中国大陆。Wang等[10]研究发现，实施已知的三种环境负载修正可以使CMONOC基准站的垂向周年振幅降低约37%。根据GFZ和EOST产品获取的芬兰南极基准站环境负载位移垂直分量差异达3 mm [95]，而NASA的IMLS产品在修正中国大陆CMONOC高程时间序列非线性变化方面表现最佳。值得一提的是，GFZ、EOST和IMLS提供的不同环境负载产品的改正效果差异达20% [56]。Hu等[78]综合分析了环境负载对云南27个GPS基准站高程时间序列的影响，证实了HYDL是造成云南大部分站点季节性变化的主要因素，实施NTOL和NTAL修正反而会增大基准站坐标时间序列的非线性变化。此外，最新研究结果表明，修正三种环境负载效应后，中国大陆260个CMONOC台站和中国现代大地基准设施建设（CMGDIC）项目的210个国家GNSS参考站周年振幅降低约50.3%，离散度最高降低达2.7 mm [96]，进一步证实了环境负载与区域GNSS基准站坐标时间序列的强相关性。

总的来说，在理想条件下，已知的三种环境负载能够解释GNSS基准站约50%的垂向周年振幅，但对水平方向的贡献不到20% [97]。由于不同机构提供的地表质量产品采用的输入数据和同化方法各不相同，导致根据其获得的环境负载产品之间存在差异，针对全球及区域GNSS坐标时间序列非线性变化的贡献也参差不齐。融合多种地表质量分布产品和环境因素（包括降雨、地形、气候、地理位置等）研究建立全球及区域最优环境负载模型仍然十分必要。其成果有助于深刻认识造成基准站复杂非线性运动的地球物理过程，并为地震预测、海平面变化、冰雪质量变迁、极端天气监测等地球科学研究提供更准确的基础数据。

4. 总结与展望

GNSS基准站垂直非线性运动与包括ATML、HYDL和NTOL在内的环境负载造成的地表位移强相关，但是两者之间仍然存在较大分歧，仅基准站高程分量的部分周年、半周年振幅能够被环境负载解释。而且，环境负载位移与水平分量之间的相关性仍然较低。本文总结了近年来环境负载应用于全球及区域GNSS坐标时间序列非线性变化修正研究的最新进展，指出了该领域当前面临的挑战，并提出了未来发展方向，主要包括以下四个方面。

（1）**当前采用的环境负载建模方法不严密。**目前提供的环境负载位移主要基于弹性地球模型及全球平均格林函数建立[57]，未能准确反映实际情况。考虑地幔滞弹性的影响，地球同样表现出滞弹性特征[61,98]。最新的研究成果表明，考虑软流圈（上地幔）的滞弹性效应可以显著改善GPS观测到的M2频率（半日波）海洋潮汐负载位移与模型预测值之间的一致性；尤其是在琉球群岛和九州西部沿海地区，与使用区域NAO.99Jb海洋潮汐模型和纯弹性PREM格林函数的结果相比，改善幅度约为31% [99]；这些研究证实了考虑地球软流圈滞弹性特征的重要性。中国CMONOC基准站的位移与预测的环境负载位移之间呈现系统性的相位差异[17]，研究基于滞弹性地球模型建立环境负载模型的方法，有望削弱二者之间的相位差。另外，全球平均格林函数基于地球平均结构响应（如PREM地球模型）建立。然而，针对水平尺度小于2500 km^2的地表负载，如与强降水和河流洪涝相关的局部强水文信号，地球弹性响应对于不均匀地壳结构十分敏感[100]。这种敏感性限制了采用全球平均格林函数方法获取局部环境负载位移的应用范围[101]。因此，需要进一步研究并确定适用于环境负载研究的最佳地球模型。考虑区域地理环境差异建立局部格林函数，有助于建立更高精度的环境负载模型，进一步提高环境负载预测值与GNSS基准站非线性位移的一致性。

（2）**缺乏高时空分辨率和高可靠性地表质量分布数据。**现有全球地表质量分布产品最高时空分辨率分别为1 h、0.1°，这使得识别局部环境变化信号面临巨大挑战。区域模型空间分辨率尽管可达0.01°，但是可用的产品类型较少，仅覆盖北美洲、亚洲、欧洲北海及澳大利亚等区域。许多不同尺度的突发自然事件和人为事件同样会造成地表质量变化，然而由于现场观测数据有限，现有分布模型可能无法捕捉到这种类型的质量变化。此外，不同机构提供的地表质量分布产品之间存在差异，尤其是水文模型之间差异显著，这些产品也缺乏精度信息，用户需根据外部数据源判断产品针对全球及部分区域的可靠性和适用性。例如，MERRA-2和ERA-Interim产品在南美洲罗奈马山的地表气压差异超过360 mbar（1 mbar = 100 Pa）[7]；GLDAS和FLDAS产品不提供南极区域的水文数据，因此通常采用ERA5产品进行南北极地球物理应用研究；GLDAS产品提供的格陵兰、北极区域的积雪深度存在异常，利用其获取环境负载位移时需扣除该区域的数据。开展不同质量分布产品的质量评估，融合区域和全球产品建立高时空分辨率、高可靠性地表质量分布模型，有助于更准确地确定环境负载对GNSS坐标时间序列非线性变化的贡献。例如，区域水文模型NLDAS-2在其空间覆盖范围内精度优于全球GLDAS模型（见第3.1节）。在这种情况下，仅利用NLDAS-2计算基准站的HYDL位移是不完整的，因为

其忽略了覆盖范围外的HYDL效应。通过在NLDAS-2空间覆盖范围内采用NLDAS-2产品替代GLDAS产品，生成了新的融合产品以代表全球HYDL影响。由于NLDAS-2的优势，新产品精度显著优于NLDAS-2和GLDAS模型。类似的方法也可以应用于模型化其他类型的环境负载效应。第3.1节提及的融合不同GRACE时变重力场获得的HYDL位移的方法策略，同样可以拓展到集成地表质量分布产品，以提高其时空分辨率和可靠性。

（3）**忽略其他环境负载因素及地球物理效应的影响。**近年来，随着全球气候变暖，南北极、格陵兰、青藏高原等地区的冰川、冰盖、冻土等冰冻圈要素发生了显著变化[102–103]。冰冻圈要素质量变迁，包括冰川消融退缩[104–105]、冰盖消融及崩解加剧[106]等，导致的冰负载（ice load）同样属于环境负载范畴[107]。然而，现有研究主要集中在冰川质量变化造成的格陵兰区域GNSS基准站的短时间尺度（月或者1~2年）垂向非线性位移变化[74,88,108–111]，针对冰负载对南极和青藏高原等大范围冰雪覆盖区GNSS坐标时间序列贡献的研究仍然有限。而且，应用于监测冰雪质量变化的GNSS基准站均架设在相对稳定的海岸附近。由于冰川移动，冰负载造成的基准站位移与距离负载中心的距离密切相关，因此目前GNSS技术仅限于定性地分析冰负载造成的基准站线性速度变化，距离冰负载中心越近，地表隆升速度越快[64,108,112]。最后，冰冻圈区域（高山及极地地区）通常经历漫长的冬季积雪和温暖的夏季剧烈融化，是研究季节性水文负载的理想区域[64,108]，但是现有环境负载研究大多集中在平原、低中纬度地区[17,58,63]。未来的研究可聚焦于联合GNSS、GRACE等多源现代大地测量技术，对冰川/盖质量变化进行联合精细化反演。这将有助于更好地理解冰负载针对南北极、格陵兰、青藏高原等冰雪覆盖区域GNSS基准站长期线性和非线性运动的贡献。此外，考虑质量海平面变化的水文负载对满足全球质量守恒需求至关重要[113]，未来还需进一步评估质量海平面负载对海岸线附近（<100 km）或岛屿基准站非线性位移的贡献。另外，人为因素造成的地表质量变化效应同样是环境负载的重要组成部分。例如，国内外修建了许多人工坝体用于发电和水供应管理，导致周边区域出现强HYDL信号，然而尚未开展关于该方面的研究。

地表温度变化同样会造成基准站显著的周期性运动[13,97,114–116]。例如，混凝土或金属材质的观测墩热膨胀效应（thermal effect of monument, TEM）造成的GNSS基准站垂向周年振幅最大可达6.6 mm [116]，非季节温度变化造成的测站垂直位移在某些区域也可达3 mm [9]，地表覆盖的土壤层导致热膨胀效应呈现相位滞后[114]。这些因素都可能与已知的三类环境负载相互作用，降低GNSS坐标时间序列与环境负载位移之间的相关性[117]。然而，关于非季节温度变化造成的水平位移及其他地球物理因素，如水位变化、岩石圈和土壤圈的孔隙弹性应变等对全球GNSS基准站位移的影响目前尚无文献涉及。深入分析可能造成基准站非线性位移的未模型化环境负载因素（特别是冰负载和人为因素造成的地表质量变化效应）及其他地球物理因素，是目前大地测量领域的前沿课题。例如，将三维基岩热膨胀模型拓展到全频段模型，对于评估非季节性温度对基准站水平位移的影响可能具有重要价值[115,117]。叠加不同因素引起的地表位移对于建立具有实际物理意义的毫米级非线性运动模型至关重要，有助于更深刻地理解地表及地球内部系统的地球物理过程与质量动态。

（4）**GNSS技术类系统误差的耦合。**自然（空间）环境、科技制造及数据处理水平的局限性导致GNSS观测值不可避免地存在技术类系统误差。例如，GPS卫星轨道误差导致的交点年信号表现为坐标时间序列包括的周期约351天的季节性信号，未模型化或模型化不完善的周日、半周日大气或海洋潮汐会累积为长周期信号，基准站坐标和卫星轨道的固定或松弛约束程度不同同样会导致GNSS坐标时间序列出现系统性误差[1,118–119]。这些“虚假”的周期信号会与真实的环境负载信号耦合，造成基准站非线性运动的错误解释。例如，GNSS精密数据处理策略的不足导致欧洲地区利用GRACE反演获得的水文负载位移与GNSS观测结果之间呈现显著差异[120]。忽略高阶电离层延迟会造成GNSS时间序列南北方向的周年、半周年虚假信号[121–122]，实施次分量海洋潮汐改正后多个GNSS交点年谐波信号振幅减小[123]等。2019年10月，国际GNSS服务（IGS）全球分析中心启动了基于最新版本IERS协议实现的第三次全球GNSS数据重新处理（repro3），应用于新一代地球参考框架ITRF2020的建立[124]。和参与ITRF2014建立的repro2相比，GNSS数据处理方法和模型取得了很大的改进，包括引入新的平均极潮模型、太阳辐射压模型、海洋潮汐模型FES2014b等[125]。基于repro3分析各种GNSS相关的系统误差引起的虚假地表位移的时空分布特征，建立最优的数据处理模型和策略，针对全球IGS基准站数据进行一致性重新处理，对于减少技术相关系统误差对真实环境负载信号的影响至关重要。例如，尽管海洋潮汐模型已更新为FES2014b，但其仍然仅包括11个主分量，考虑其他次分量海洋潮汐的影响可进一步优化FES2014b模型。该方法已被证实能够部分减

小交点年谐波信号[123]。通过研究技术类系统误差对环境负载信号的耦合效应，有助于避免GNSS坐标时间序列季节性信号的过度地球物理解释[112,125]，增强其在全球变化研究中的应用，如海平面变化、冰雪质量变迁和极端天气监测等。

CRediT authorship contribution statement

Zhao Li: Writing-original draft, Resources, Methodology, Investigation. **Weiping Jiang:** Writing-review & editing, Validation, Supervision, Methodology, Funding acquisition, Conceptualization. **Tonie van Dam:** Writing-review & editing, Validation, Conceptualization. **Xiaowei Zou:** Writing-original draft, Investigation. **Qusen Chen:** Writing-review & editing, Investigation. **Hua Chen:** Writing-review & editing, Validation.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

致谢

感谢中国气象局国家气象信息中心提供的中国气象局再分析产品（CMA-RA），该产品为分析历史大气条件提供了宝贵的工具。感谢国家地球系统科学数据中心（NESSDC）提供的数据资源和模型分析服务。感谢NCEP、MERRA、ECMWF、GLDAS、ECCO、GGFC、GFZ、EOST和IMLS为维持和推进全球地球科学和大地测量研究所做的共同努力。本研究得到了国家自然科学基金基础科学中心项目（42388102）、国家自然科学基金面上项目（42174030）、湖北省珞珈实验室专项基金（220100020）、湖北省重大科技项目（2022AAA002）以及中国高等院校基础研究基金（2042022dx0001, 2042023kfyq01）的支持。

References

[1] Jiang W, Wang K, Li Z, Zhou XH, Ma YF, Ma J. Prospect and theory of GNSS coordinate time series analysis. Geomatics Inf Sci Wuhan Univ 2018;43(12): 2112–23. Chinese.
[2] Blewitt G, Lavallée D, Clarke P, Nurutdinov K. A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected. Science 2001;294(5550):2342–5.
[3] Blewitt G, Lavallée D. Effect of annual signals on geodetic velocity. J Geophys Res 2002;107(B7):ETG 9-1–11.
[4] Tregoning P, van Dam T. Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level. Geophys Res Lett 2005;32(22):L22310.
[5] Tregoning P, van Dam T. Effects of atmospheric pressure loading and sevenparameter transformations on estimates of geocenter motion and station heights from space geodetic observations. J Geophys Res 2005;110(B3): B03408.
[6] Li Z, van Dam T, Collilieux X, Altamimi Z, Rebischung P, Nahmani S. Quality evaluation of the weekly vertical loading effects induced from continental water storage models. In: Rizos C, Willis P, editors. Proceedings of the IAG 150 Years—International Association of Geodesy Symposia; 2013 Sep 1 – 6; Potsdam, Germany. Cham: Springer; 2015. p. 45–54.
[7] Li Z, Chen W, van Dam T, Rebischung P, Altamimi Z. Comparative analysis of different atmospheric surface pressure models and their impacts on daily ITRF2014 GNSS residual time series. J Geod 2020;94(4):42.
[8] Zhang B, Liu L, Khan SA, van Dam T, Zhang E, Yao Y. Transient variations in glacial mass near Upernavik Isstrøm (west Greenland) detected by the combined use of GPS and GRACE data. J Geophys Res Solid Earth 2017;122 (12):10626–42.
[9] Lei J, Chen W, Li Z, Li F, Zhang S. A full-spectrum bedrock thermal expansion model and its impact on the Global Positioning System height time series. Geophys Res Lett 2020;47(1):e2019GL086022.
[10] Wang M, Shen Z, Dong D. Effects of non-tectonic crustal deformation on continuous GPS position time series and correction to them. Chin J Geophys 2005;48(5):1045–52. Chinese.
[11] Van Dam T, Blewitt G, Heflin MB. Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations. J Geophys Res Solid Earth 1994;99(B12):23939–50.
[12] Van Dam T, Altamimi Z, Collilieux X, Ray J. Topographically induced height errors in predicted atmospheric loading effects. J Geophys Res 2010;115(B7): B07415.
[13] Dong D, Fang P, Bock Y, Chen MK, Miyazaki S. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. J Geophys Res Solid Earth 2002;107(B4):ETG 9-1–16.
[14] Tregoning P, Watson C, Ramillien G, McQueen H, Zhang J. Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS. Geophys Res Lett 2009; 36(15):L15401.
[15] Jiang W, Li Z, van Dam T, Ding W. Comparative analysis of different environmental loading methods and their impacts on the GPS height time series. J Geod 2013;87(7):687–703.
[16] Williams SDP, Penna NT. Non-tidal ocean loading effects on geodetic GPS heights. Geophys Res Lett 2011;38(9):L09314.
[17] Yuan P, Li Z, Jiang W, Ma Y, Chen W, Sneeuw N. Influences of environmental loading corrections on the nonlinear variations and velocity uncertainties for the reprocessed global positioning system height time series of the crustal movement observation network of China. Remote Sens 2018;10(6):958.
[18] Heki K, Jin S. Geodetic study on earth surface loading with GNSS and GRACE. Satellite Navigation 2023;4(1):24.
[19] Longman IM. A Green's function for determining the deformation of the Earth under surface mass loads: 1. Theory. J Geophys Res 1962;68(2):485–96.
[20] Longman IM. A Green's function for determining the deformation of the Earth under surface mass loads: 2. Computations and numerical results. J Geophys Res 1963;68(2):496–503.
[21] Farrell WE. Deformation of the Earth by surface loads. Rev Geophys Space Phys 1972;10(3):761–97.
[22] Wang LS, Chen C, Zou R, Du JS, Chen XD. Using GPS and GRACE to detect seasonal horizontal deformation caused by loading of terrestrial water: a case study in the Himalayas. Chin J Geophys 2014;57(6):1792–804. Chinese.
[23] Chen Q. Analyzing and modeling environmental loading induced displacements with GPS and GRACE [dissertation]. Stuttgart: University of Stuttgart; 2015.
[24] Van Dam T, Wahr J. Modeling environmental loading effects: a review. Phys Chem Earth 1998;23(9,10):1077–87.
[25] Bengtsson L, Shukla J. Integration of space and in situ observations to study global climate change. Bull Am Meteorol Soc 1988;69(10):1130–43.
[26] Ma Y, Bian L. A surface climatological validation of ECMWF ERA-Interim reanalysis and NCEP FNL analysis over east Antarctica. Chin J Polar Res 2014; 26(4):469–80.
[27] Wei T, Yan Q, Ding M. Distribution and temporal trends of temperature extremes over Antarctica. Environ Res Lett 2019;14(8):084040.
[28] Wang C, Graham RM, Wang K, Gerland S, Granskog MA. Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall, and precipitation over Arctic Sea Ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution. Cryosphere 2019;13(6):1661–79.
[29] Martens HR, Argus DF, Norberg C, Blewitt G, Herring TA, Moore AW, et al.

Atmospheric pressure loading in GPS positions: dependency on GPS processing methods and effect on assessment of seasonal deformation in the contiguous USA and Alaska. J Geod 2020;94(12):115.
[30] Zou X, Li Z, Yang D, Sun W, Ding M, Liu W, et al. Surface energy balance on a polythermal glacier, Arctic, and the role of poleward atmospheric moisture transport. Atmos Res 2023;293:106910.
[31] Wang Y, Sun W, Wang L, Li Y, Du W, Chen J, et al. How do different reanalysis radiation datasets perform in west Qilian Mountains? Front Earth Sci 2022; 10:241.
[32] Hennermann K, Berrisford P. ERA5 data documentation [Internet]. Bonn: ECMWF Confluence Wiki; 2024 Aug 5 [cited 2024 Aug 17]. Available from: https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation.
[33] McNally A, Arsenault K, Kumar S, Shukla S, Peterson P, Wang S, et al. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. Sci Data 2017;4(1):170012.
[34] Mitchell KE, Lohmann D, Houser PR, Wood EF, Schaake JC, Robock A, et al. The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system. J Geophys Res D Atmospheres 2004; 109(D7): D07S90.
[35] Jasinski MF, Borak JS, Kumar SV, Mocko DM, Peters-Lidard CD, Rodell M, et al. NCA-LDAS: overview and analysis of hydrologic trends for the national climate assessment. J Hydrometeorol 2019;20(8):1595–617.
[36] McNally A, Jacob J, Arsenault K, Slinski K, Sarmiento DP, Hoell A, et al. A Central Asia hydrologic monitoring dataset for food and water security applications in Afghanistan. Earth Syst Sci Data 2022;14(7):3115–35.
[37] Arsenault KR, Shukla S, Hazra A, Getirana A, McNally A, Kumar SV, et al. The NASA hydrological forecast system for food and water security applications. Bull Am Meteorol Soc 2020;101(7):E1007–25.
[38] Hazra A, McNally A, Slinski K, Arsenault KR, Shukla S, Getirana A, et al. NASA's NMME-based S2S hydrologic forecast system for food insecurity early warning in southern Africa. J Hydrol 2023;617:129005.
[39] Liu JG, Shi CX, Sun S, Liang J, Yang ZL. Improving land surface hydrological simulations in China using CLDAS meteorological forcing data. J Meteorol Res 2019;33(6):1194–206.
[40] Dill R. Hydrological model LSDM for operational Earth rotation and gravity field variations. Report. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ; 2008. STR-08/09.
[41] Dobslaw H, Thomas M. Simulation and observation of global ocean mass anomalies. J Geophys Res Oceans 2007;112(C5):C05040.
[42] Quinn KJ, Ponte RM. Estimating high frequency ocean bottom pressure variability. Geophys Res Lett 2011;38(8):L08611.
[43] Fratepietro F, Baker TF, Williams SDP, van Camp M. Ocean loading deformations caused by storm surges on the northwest European shelf. Geophys Res Lett 2006;33(6):L06317.
[44] Dobslaw H, Boergens E, Dill R. GFZ GravIS RL06 ocean bottom pressure anomalies. V. 0001 [Internet]. Potsdam: GFZ Data Services; 2019 [cited 2024 Aug 17]. Available from: https://doi.org/10.5880/GFZ.GRAVIS_06_L3_OBP.
[45] Dobslaw H, Boergens E, Dill R. GFZ GravIS RL06 ocean bottom pressure anomalies. V. 0002 [Internet]. Potsdam: GFZ Data Services; 2020 [cited 2024 Aug 17]. Available from: https://doi.org/10.5880/GFZ.GRAVIS_06_L3_OBP.
[46] Gerdener H, Kusche J, Schulze K, Döll P, Klos A. The global land water storage data set release 2 (GLWS2.0) derived via assimilating GRACE and GRACE-FO data into a global hydrological model. J Geod 2023;97(7):73.
[47] Zhang L, Tang H, Sun W. Comparison of GRACE and GNSS seasonal load displacements considering regional averages and discrete points. J Geophys Res Solid Earth 2021;126(8):e2021JB021775.
[48] Huai B, Wang Y, Ding M, Zhang J, Dong X. An assessment of recent global atmospheric reanalyses for Antarctic near surface air temperature. Atmos Res 2019;226:181–91.
[49] Dong X, Wang Y, Hou S, Ding M, Yin B, Zhang Y. Robustness of the recent global atmospheric reanalyses for Antarctic near-surface wind speed climatology. J Clim 2020;33(10):4027–43.
[50] Gao H, Zhao F. A review of global hydrological models: the opportunities, challenge and outlook. J Glaciol Geocryology 2020;42(1):224–33. Chinese.
[51] Lindsay R, Wensnahan M, Schweiger A, Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic. J Clim 2014;27 (7):2588–606.
[52] Cao Y, Liang S. Recent advances in driving mechanisms of the Arctic amplification: a review. Chin Sci Bull 2018;63(26):2757–71.
[53] Dill R, Dobslaw H. Numerical simulations of global scale high resolution hydrological crustal deformations. J Geophys Res Solid Earth 2013;118(9):5008–17.
[54] Mémin A, Boy JP, Santamaria-Gomez A. Correcting GPS measurements for non-tidal loading. GPS Solut 2020;24(2):45.
[55] Van Dam T, Wahr J, Milly PCD, Shmakin AB, Blewitt G, Lavallée D, et al. Crustal displacements due to continental water loading. Geophys Res Lett 2001; 28(4):651–4.
[56] Li C, Huang S, Chen Q, Dam T, Fok HS, Zhao Q, et al. Quantitative evaluation of environmental loading induced displacement products for correcting GNSS time series in CMONOC. Remote Sens 2020;12(4):594.
[57] Niu Y, Wei N, Li M, Rebischung P, Shi C, Chen G. Quantifying discrepancies in the three-dimensional seasonal variations between IGS station positions and load models. J Geod 2022;96(4):31.
[58] Wen Z, Rao W, Sun W. Contribution of loading deformation to the GNSS vertical velocity field in the Chinese mainland. Geophys J Int 2023;233(3):1655–70.
[59] Li W, van Dam T, Li Z, Shen Y. Annual variation detected by GPS, GRACE, and loading models. Stud Geophys Geod 2016;60(4):608–21.
[60] Davis JL, Elósegui P, Mitrovica JX, Tamisiea ME. Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS. Geophys Res Lett 2004; 31(24): L24605.
[61] Chanard K, Avouac JP, Ramillien G, Genrich J. Modeling deformation induced by seasonal variations of continental water in the Himalaya region: sensitivity to earth elastic structure. J Geophys Res Solid Earth 2014;119(6):5097–113.
[62] Zhang W, Wang Y, Smeets PC, Reijmer CH, Huai B, Wang J, et al. Estimating near-surface climatology of multi-reanalyses over the Greenland Ice Sheet. Atmos Res 2021;259:105676.
[63] Hsu YJ, Fu Y, Bürgmann R, Hsu SY, Lin CC, Tang CH, et al. Assessing seasonal and interannual water storage variations in Taiwan using geodetic and hydrological data. Earth Planet Sci Lett 2020;550:116532.
[64] Drouin V, Heki K, Sigmundsson F, Hreinsdóttir S, Ófeigsson BG. Constraints on seasonal load variations and regional rigidity from continuous GPS measurements in Iceland, 1997-2014. Geophys J Int 2016;205(3):1843–58.
[65] Gu Y, Yuan L, Fan D, You W, Su Y. Seasonal crustal vertical deformation induced by environmental mass loading in mainland China derived from GPS, GRACE, and surface loading models. Adv Space Res 2017;59(1):88–102.
[66] He Y, Nie G, Wu S, Li H. Comparative analysis of the correction effect of different environmental loading products on global GNSS coordinate time series. Adv Space Res 2022;70(11):3594–613.
[67] Yuan P, van Malderen R, Yin X, Vogelmann H, Jiang W, Awange J, et al. Characterisations of Europe's integrated water vapour and assessments of atmospheric reanalyses using more than 2 decades of ground-based GPS. Atmos Chem Phys 2023;23(6):3517–41.
[68] Li Z, van Dam T. The phase 2 North America land data assimilation system (NLDAS-2) products for modeling water storage displacements for plate boundary observatory GNSS stations. In: van Dam T, editor. Proceedings of the REFAG 2014—International Association of Geodesy Symposia; 2014 Oct 13–14; Luxembourg, The Grand Duchy of Luxembourg. Cham: Springer; 2017. p. 217–25.
[69] Li Z, Lu Y, Jiang W, Chen Q, Chen H, Ye S, et al. A new combined terrestrial water storage change model based on GRACE satellite gravimetry. Geomatics Inf Sci Wuhan Univ 2023;48(7):1180–91. Chinese.
[70] Van Dam T, Wahr JM. Displacements of the Earth's surface due to atmospheric loading: effects on gravity and baseline measurements. J Geophys Res Solid Earth 1987;92(B2):1281–6.
[71] Trenberth KE, Smith L. The mass of the atmosphere: a constraint on global analyses. J Clim 2005;18(6):864–75.
[72] Yue C, Dang Y, Xu C, Gu S, Dai H. Effects and correction of atmospheric pressure loading deformation on GNSS reference stations in mainland China. Math Probl Eng 2020;2020(1):4013150.
[73] Dach R, Böhm J, Lutz S, Steigenberger P, Beutler G. Evaluation of the impact of atmospheric pressure loading modeling on GNSS data analysis. J Geod 2011; 85(2):75–91.
[74] Li W, Shum CK, Li F, Zhang S, Ming F, Chen W, et al. Contributions of Greenland GPS observed deformation from multisource mass loading induced seasonal and transient signals. Geophys Res Lett 2020;47(15):e2020GL088627.
[75] Wang D, Zhuang L, Gao L, Sun X, Huang M, Plaza A. An improved inversion method with additional constraints for surface mass load utilizing GNSS height time series. IEEE Trans Geosci Remote Sens 2023;61:1–16.
[76] Jiang W, Zhou B, Li Z. Effects of atmospheric loading on IGS stations in different latitude zones. Sci Surv Map 2016;4:28–32. Chinese.
[77] Jia Y, Zhu X, Sun F, Xiao K, Ke N. Time-varying characteristics and cause analysis of annual amplitudes of GNSS vertical coordinate time series. Chin J Geophys 2023;66(1):162–72. Chinese.
[78] Hu S, Chen K, Zhu H, Xue C, Wang T, Yang Z, et al. A comprehensive analysis of environmental loading effects on vertical GPS time series in Yunnan, southwest China. Remote Sens 2022;14(12):2741.

[79] Ponte RM. A preliminary model study of the large-scale seasonal cycle in bottom pressure over the global ocean. J Geophys Res Oceans 1999;104(C1): 1289–300.
[80] Van Dam TM, Collilieux X, Wuite J, Altamimi Z, Ray J. Nontidal ocean loading: amplitudes and potential effects in GPS height time series. J Geod 2012;86(11):1043–57.
[81] Van Dam TM, Wahr J, Chao Y, Leuliette E. Predictions of crustal deformation and of geoid and sea-level variability caused by oceanic and atmospheric loading. Geophys J Int 1997;129(3):507–17.
[82] Zhou B, Jiang W, Li Z. Effects of non-tidal ocean loading on IGS stations in coastal areas. J Geod Geodyn 2016;36(11):1008–13.
[83] Nordman M, Virtanen H, Nyberg S, Mäkinen J. Non-tidal loading by the Baltic sea: comparison of modelled deformation with GNSS time series. GeoResJ 2015;7:14–21.
[84] Geng J, Williams SDP, Teferle FN, Dodson AH. Detecting storm surge loading deformations around the southern North Sea using subdaily GPS. Geophys J Int 2012;191(2):569–78.
[85] Geng J, Xin S, Williams SDP, Jiang W. Comparing non-tidal ocean loading around the southern North Sea with subdaily GPS/GLONASS data. J Geophys Res Solid Earth 2021;126:e2020JB020685.
[86] Mémin A, Watson C, Haigh ID, MacPherson L, Tregoning P. Non-linear motions of Australian geodetic stations induced by non-tidal ocean loading and the passage of tropical cyclones. J Geod 2014;88(10):927–40.
[87] Haritonova D. The impact of the Baltic Sea non-tidal loading on GNSS station coordinate time series: the case of Latvia. Baltic J Modern Computing 2019; 7(4):541–9.
[88] Zhang B, Zhang E, Liu L, Khan SA, van Dam T, Yao Y, et al. Geodetic measurements reveal short-term changes of glacial mass near Jakobshavn Isbræ (Greenland) from 2007 to 2017. Earth Planet Sci Lett 2018;503:216–26.
[89] Haigh ID, MacPherson LR, Mason MS, Wijeratne EMS, Pattiaratchi CB, Crompton RP, et al. Estimating present day extreme water level exceedance probabilities around the coastline of Australia: tides, extra-tropical storm surges, and mean sea level. Clim Dyn 2014;42:139–47.
[90] Haigh ID, Wijeratne EMS, MacPherson LR, Pattiaratchi CB, Mason MS, Crompton RP, et al. Estimating present day extreme water level exceedance probabilities around the coastline of Australia: tropical cyclone-induced storm surges. Clim Dyn 2014;42:121–38.
[91] Fu Y, Freymueller JT. Seasonal and long term vertical deformation in the Nepal Himalaya constrained by GPS and GRACE measurements. J Geophys Res Solid Earth 2012;117(B3):2011JB008925.
[92] Johnson CW, Fu Y, Bürgmann R. Stress models of the annual hydrospheric, atmospheric, thermal, and tidal loading cycles on California faults: perturbation of background stress and changes in seismicity. J Geophys Res Solid Earth 2017;122(12):10605–25.
[93] Klos A, Gruszczynska M, Bos MS, Boy J, Bogusz G. Estimates of vertical velocity errors for IGS ITRF2014 stations by applying the improved singular spectrum analysis method and environmental loading models. In: Braitenberg C, Rossi G, editors. Proceedings of the Geodynamics and Earth tides observations from global to micro scale. Cham: Springer; 2019. p. 229–46.
[94] Seitz M, Blobfeld M, Angermann D. Preparing the ITRF2020: how to consider non-tidal loading signals in reference system realization? Paris: Unified Analysis Workshop; 2019.
[95] Andrei CO, Lahtinen S, Nordman M, Näränen J, Koivula H, Poutanen M, et al. GPS time series analysis from Aboa the Finnish Antarctic research station. Remote Sens 2018;10(12):1937.
[96] Zhang J, Li Z, Zhang P, et al. Assessing the nonlinear changes in global navigation satellite system vertical time series with environmental loading in mainland China. Remote Sens 2023;15(16):4115.
[97] Xu X, Dong D, Fang M, Zhou Y, Wei N, Zhou F. Contributions of thermoelastic deformation to seasonal variations in GPS station position. GPS Solut 2017; 21(3):1265–74.
[98] Sun H, Xu J, Cui X. Research progress of the gravity field application in Earth's geodynamics and interior structure. Acta Geod Cartogr Sin 2017;46(10): 1290–9.
[99] Wang J, Penna NT, Clarke PJ, Bos MS. Asthenospheric anelasticity effects on ocean tide loading around the East China Sea observed with GPS. Solid Earth 2020;11(1):185–97.
[100] Dill R, Tesauro M. Applying local Green's functions to study the influence of the crustal structure on hydrological loading displacements. J Geodyn 2015;88: 14–22.
[101] Fan W, Jiang W, Li Z, Tao J, Wang Z, He L. Impacts of local green's functions on modeling atmospheric loading effects for GNSS reference stations. Earth Space Sci 2024;11:e2023EA003113.
[102] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. Report. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2019.
[103] Kang S, Guo W, Zhong X, Xu M. Changes in the mountain cryosphere and their impacts and adaptation measures. Clim Change Res 2020;16(2):143–52. Chinese.
[104] Yao T, Thompson L, Yang W. Different glacier status with atmospheric circulations in Qinghai-Xizang Plateau and surroundings. Nat Clim Change 2012;2:663–7.
[105] Zou X, Ding M, Sun W, Yang D, Liu W, Huai B, et al. The surface energy balance of Austre Lovénbreen, Svalbard, during the ablation period in 2014. Polar Res 2021;2021(40):1–15.
[106] Hofer S, Tedstone AJ, Fettweis X, Bamber J. Decreasing cloud cover drives the recent mass loss on the Greenland Ice Sheet. Sci Adv 2017;3(6):e1700584.
[107] Wolstencroft M, Shen Z, Törnqvist TE, Milne GA, Kulp M. Understanding subsidence in the Mississippi Delta region due to sediment, ice, and ocean loading: insights from geophysical modeling. J Geophys Res Solid Earth 2014; 119(4):3838–56.
[108] Khan SA, Liu L, Wahr J, Howat I, Joughin I, van Dam T, et al. GPS measurements of crustal uplift near Jakobshavn Isbræ due to glacial ice mass loss. J Geophys Res Solid Earth 2010;115(B9):B09405.
[109] Khan SA, Wahr J, Bevis M, Velicogna I, Kendrick E. Spread of ice mass loss into northwest Greenland observed by GRACE and GPS. Geophys Res Lett 2010;37(6):L06501.
[110] Liu L, Khan SA, van Dam T, Ma JHY, Bevis M. Annual variations in GPS-measured vertical displacements near Upernavik Isstrøm (Greenland) and contributions from surface mass loading. J Geophys Res Solid Earth 2017;122: 677–91.
[111] An JC, Zhang BJ, Ai ST, Wang Z, Feng Y. Evaluation of vertical crustal movements and sea level changes around Greenland from GPS and tide gauge observations. Acta Oceanol Sin 2021;40(1):4–12.
[112] Chanard K, Métois M, Rebischung P, Avouac JP. A warning against overinterpretation of seasonal signals measured by the Global Navigation Satellite System. Nat Commun 2020;11(1):1–4.
[113] Klos A, Dobslaw H, Dill R, Bogusz J. Identifying the sensitivity of GPS to nontidal loadings at various time resolutions: examining vertical displacements from continental Eurasia. GPS Solut 2021;25(3):89.
[114] Prawirodirdjo L, Ben-Zion Y, Bock Y. Observation and modeling of thermoelastic strain in Southern California Integrated GPS Network daily position time series. J Geophys Res 2006;111(B2):B02408.
[115] Fang M, Dong D, Hager BH. Displacements due to surface temperature variation on a uniform elastic sphere with its centre of mass stationary. Geophys J Int 2014;196(1):194–203.
[116] Jiang W, Wang K, Deng L, Li Z. Impact on non-linear vertical variation of GNSS reference stations caused by thermal expansion. Acta Geod Cartogr Sin 2015;44(5):473–80.
[117] Lu R, Li Z, Chen Q, Ding X, Yang K, Zhang M. On the contributions of refined thermal expansion model to nonlinear variations from different GNSS height time series products. GPS Solut 2024;28:80.
[118] Ray J, Altamimi Z, Collilieux X, van Dam T. Anomalous harmonics in the spectra of GPS position estimates. GPS Solut 2008;12:55–64.
[119] Penna NT, King MA, Stewart MP. GPS height time series: short-period origins of spurious long-period signals. J Geophys Res 2007;112(B2):B02402.
[120] Van Dam T, Wahr J, Lavallée D. A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and gravity recovery and climate experiment (GRACE) over Europe. J Geophys Res Solid Earth 2007;112 (B3):B03404.
[121] Petrie EJ, King MA, Moore P, Lavallée DA. Higher-order ionospheric effects on the GPS reference frame and velocities. J Geophys Res 2010; 115(B3): B03417.
[122] Deng L, Jiang W, Li Z, Chen H, Wang K, Ma Y. Assessment of second- and third-order ionospheric effects on regional networks: case study in China with longer CMONOC GNSS coordinate time series. J Geodesy 2017;91:207–27.
[123] Li Z, Jiang WP, Ding WW, Deng LS, Peng LF. Estimates of minor ocean tide loading displacement and its impact on continuous GNSS coordinate time series. Sensors 2014;14(3):5552–72.
[124] Altamimi Z, Rebischung P, Collilieux X, Métivier L, Chanard K. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. J Geodesy 2023;97:47.
[125] Jiang W, Li Z, Wei N, Liu J. Progress and thoughts on establishment of geodetic coordinate frame. Acta Geod Cartogr Sin 2022;51(7):1259–70.