引文格式:鲁铁定,杨厚明,章园,等.利用GNSS数据反演云南区域陆地水储量变化的时空分布特征[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(7):1285-1298.DOI:10.13203/j.whugis20250142

Citation: LU Tieding, YANG Houming, ZHANG Yuan, et al. Spatiotemporal Distribution Characteristics of Terrestrial Water Storage Changes in Yunnan Region Using GNSS Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(7): 1285-1298.DOI:10.13203/j.whugis20250142

利用GNSS数据反演云南区域陆地水储量变化的时空分布特征

鲁铁定[1,2,3,4] 杨厚明[2] 章 园[2] 陈志平[1,2,3,4] 龚循强[1,2,3,4]

1 铀资源探采与核遥感全国重点实验室,江西 南昌,330013

2 东华理工大学测绘与空间信息工程学院,江西 南昌,330013

3 东华理工大学自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室,江西 南昌,330013

4 东华理工大学江西省流域生态过程与信息重点实验室,江西 南昌,330013

摘 要:针对传统水文模型难以准确模拟水文过程以及时变重力场卫星数据时空间分辨率低导致无法准确估算区域陆地水储量(terrestrial water storage,TWS)变化的问题,利用高精度、高时空分辨率的全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)陆态网基准站垂直位移时间序列,结合麻雀搜索算法优化的变分模态分解非线性信号提取算法估算了中国云南区域2011—2020年TWS时空分布特征。研究发现,所有测站经该方法减弱高频噪声影响后的时间序列与原始时间序列的相关性均在0.9以上。经GNSS反演得到的TWS时空分布与重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment,GRACE)卫星/GRACE Follow-On(GRACE-FO)、全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system,GLDAS)数据大体上是一致的,区域整体上呈现西南向东北逐渐减少的特征,但GNSS反演的TWS变化周年振幅大于其余两种,主要是GNSS观测手段对局部区域TWS变化更敏感。GNSS-等效水高(equivalent water height,EWH)、GRACE-EWH、GLDAS-EWH时间序列季节性变化显著,结合降水数据进行分析发现其与降水数据存在一定的滞后性;同时GNSS-EWH时间变化显示,云南区域在2019—2020年呈显著下降趋势,表明TWS持续减少,发生了严重的干旱。

关键词:GNSS测站垂直位移;格林函数;陆地水储量;负荷效应;等效水高;时空分布

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-05-14

DOI:10.13203/j.whugis20250142 **文章编号**:1671-8860(2026)07-1285-14

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Terrestrial Water Storage Changes in Yunnan Region Using GNSS Data

LU Tieding[1,2,3,4] *YANG Houming*[2] *ZHANG Yuan*[2] *CHEN Zhiping*[1,2,3,4] *GONG Xunqiang*[1,2,3,4]

1 National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Nanchang 330013, China

2 School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

3 Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving Around Poyang Lake of Ministry of Natural Resources, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

4 Jiangxi Key Laboratory of Watershed Ecological Process and Information, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: **Objectives**: Traditional hydrological models are difficult to accurately simulate hydrological processes, and the low spatial resolution of time-varying gravity field satellite data makes it difficult to accurately estimate changes in regional terrestrial water storage (TWS), a continuously operating global navigation satellite system (GNSS) reference station network can monitor in real-time the vertical deformation of the elastic crust caused by changes in surface hydrological loads. **Methods**: This method combines the vertical displacement time series of GNSS reference stations with the sparrow search algorithm-variational

基金项目:国家自然科学基金(42374040);江西省社科基金(24ZXJMRH02)。

第一作者:鲁铁定,博士,教授,主要从事GNSS数据处理分析与应用研究。tdlu@whu.edu.cn

通信作者:杨厚明,硕士。yhm5208@163.com

mode decomposition (SSA-VMD) nonlinear signal extraction algorithm, which has high precision and spatiotemporal resolution, to estimate the spatiotemporal distribution of TWS in Yunnan region from 2011 to 2020. The estimated results are then compared and analyzed with time-varying gravity field data, global land data assimilation system (GLDAS) data, and precipitation data. **Results:** (1) Hydrological load is the primary factor causing seasonal variations in the GNSS vertical displacement time series, with a correlation coefficient above 0.5. The second factor is non-tidal atmospheric load, and the least influential is non-tidal oceanic load. In response to the complex noise present in the GNSS time series, the SSA-VMD method is employed to mitigate high-frequency noise, resulting in a cleaner processed series. (2) The TWS variation in Yunnan region, exhibits a gradual increase from northeast to southwest. In a very small number of areas, due to other factors (e.g., evapotranspiration and runoff), discrepancies with precipitation data may occur. From the inversion results, the annual amplitude of TWS obtained from GNSS is the largest, followed by gravity recovery and climate experiment (GRACE) / GRACE Follow-On (GRACE-FO), while that from GLDAS is the smallest. (3) Compared with precipitation data, the TWS variations retrieved from GNSS, GRACE/GRACE-FO, and GLDAS show a certain temporal lag. From 2011 to 2018, the TWS variations were relatively stable with an overall increasing trend. However, from 2019 to 2020, the equivalent water height (EWH) time series exhibited a significant downward trend, and the continuous decrease in water reserves led to a prolonged severe drought. By August 2020, water reserves had basically returned to normal. **Conclusions:** The spatial and temporal distribution of TWS obtained from GNSS inversion is generally consistent with GRACE/GRACE-FO and GLDAS data, showing a gradual decrease from southwest to northeast overall. However, the annual amplitude of TWS changes from GNSS is larger than that from the other two, mainly because GNSS is more sensitive to local TWS changes. The seasonal variations in GNSS-EWH, GRACE-EWH, and GLDAS-EWH are significant, and when analyzed with precipitation data, a certain lag is observed.

Key words: GNSS station vertical displacement; Green's function; terrestrial water storage (TWS); loading effect; equivalent water height (EWH), spatiotemporal distribution

陆地水储量(terrestrial water storage,TWS)是地球水资源的重要组成部分,通常是指地球陆地上所有水体的总水储量,不仅包括河流、湖泊、水库、湿地、土壤等地表水储量,还包括地下水和冰雪、树冠层及其生物的水分储量[1-3]。准确估算水储量的时空变化,对于合理调配水资源、提高水资源利用效率、农业生产安全以及洪涝干旱等自然灾害的识别和预警具有重要的指导意义[4-5]。

长期以来,传统的TWS研究主要是利用气象数据结合水文模型模拟水文过程,但由于观测资料的限制和模型参数等因素,这些水文模型通常简化了复杂的水文过程,并不能完全模拟所有的水组成,且无法完全顾及人类活动的影响和气候变化,模拟结果往往存在较大程度的不确定性[6-8]。重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment,GRACE)卫星由美国国家航空航天局和德国航空航天中心共同研发,于2002-03开始运行。GRACE后续卫星(GRACE-Follow-On,GRACE-FO)数据广泛应用于地球科学研究,尤其是监测全球和区域尺度的TWS变化,进而评估干旱、洪涝等极端气候事件的影响[9-10]。TAPLEY等[11]较早地利用GRACE数据对南美洲地表质量变化进行研究,发现南美洲观测到的大地水准面变化很大程度上取决于该地区TWS的变化。尽管GRACE可以提供全球TWS变化的估计,但也存在一定的缺陷和局限性。如GRACE/GRACE-FO卫星的时空分辨率较低,时间分辨率为1个月,空间分辨率大约为350 km,对于小尺度范围的水体变化无法提供足够精细的分辨率[11-12],并且存在月份数据,尤其是2017—2018年连续月份数据缺失,导致数据质量不高,采用插值方法进行后处理会引入人为误差[13]。这些因素会影响GRACE反演区域TWS的精度。随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)技术的发展,GNSS可以提供更精确的测量(通常在毫米级),且时空分辨率较高,从而能够更好地捕捉由水储量变化引起的地表沉降或抬升现象,因此它在监测地表的水储量变化时具有较高的灵敏度[14]。GNSS垂直位移数据已被广泛地应用于TWS反演,如极

端水文事件的监测与识别[15]。众多学者研究分析了中国西南地区的TWS变化和极端水文干旱时空分布特征。何思源等[16]利用47个连续运行的全球定位系统(global positioning system,GPS)测站反演了云南区域2010—2014年TWS变化,发现云南地区TWS呈现明显的地域分布差异,并验证了采用连续的GPS测站数据反演云南区域陆地水变化的可行性。JIANG等[17]基于独立分量分析(independent component analysis,ICA)反演模型分析了不同时间尺度上的水储量变化,结果表明云南区域陆地水变化具有从东北到西南逐渐增加的趋势。杨兴海等[18]基于FastICA反演模型,利用GPS观测数据反演了云南区域的TWS变化,结合自校正帕默尔干旱指数(drought severity index,DSI),研究分析了云南区域干旱的时空分布趋势。LI等[19]通过引入先验约束矩阵,利用迭代最小二乘估计正则化参数和GNSS垂直位移数据,反演了云南区域2010-12—2021-02的TWS变化并计算了其DSI,研究表明先验约束更有助于解决GNSS反演的离散病态问题,GNSS反演的DSI可以较好地反映该时间段内云南省的干旱事件。考虑GNSS和GRACE两种观测数据对水文负荷变化响应的频谱差异,杨兴海等[20]使用求和算子对GRACE数据构建约束,利用赤池贝叶斯准则选择最优参数,构建联合反演模型反演了西南地区2011-01—2022-06的TWS分布特征,结果表明联合反演能够提高TWS估算精度。

由于观测方式、误差不确定性来源等因素,GNSS观测数据具有白噪声、闪烁噪声和随机游走噪声等复杂的噪声特性影响反演效果,需要采用更加有效的方法削弱噪声的影响以获取更加干净的水文负荷形变数据[21]。目前多数研究将GNSS日数据进行月平均,本文采用自适应参数优化的信号分解技术,能够更加有效地减弱陆态网垂直位移数据高频噪声的影响。考虑到连续GNSS观测网络反演TWS变化的优势及其数据固有特征,本文将基于负荷格林函数,利用陆态网台站垂直位移数据结合非线性非平稳位移时间序列的提取方法分析2011—2020年云南区域TWS变化的时空分布特征,并与GRACE卫星重力数据、全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system,GLDAS)水文模型数据以及全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Centre,GPCC)降水数据进行对比分析,进一步验证GNSS技术结合信号提取方法在TWS反演中的有效性和可行性。

1　研究数据

1.1　GNSS数据及处理

本文采用的GNSS位移时间序列来源于国家地震科学数据中心(http://www.cgps.ac.cn/),该数据产品是由GAMIT/GLOBK软件解算的结果,处理过程中已扣除了固体潮、极潮等影响[22]。本文选取了云南区域及其周边共43个测站2011-01—2020-12的单天解时间序列进行研究分析,该区域地处青藏高原东部边缘地带,构造运动强烈,海拔落差较为明显,温度随海拔的增加显著降低,形成了不同海拔区域的垂直气候带[23]。研究区位置和测站分布和数据缺失情况如图1和图2所示,每条不同颜色的横线表示各个陆态网基准测站的数据完整度情况。从图1和图2中可以看出,云南区域地势西高东低,测站分布较为均匀。此外,在所选测站中,YNMH测站和XZCY测站的数据缺失率最大。GNSS时间序列中包括构造运动引起的长期趋势项。由非潮汐海洋负荷(non-tidal ocean loading,NTOL)、非潮汐大气负荷(non-tidal atmospheric loading,NTAL)和水文负荷引起的季节性变化(垂直方向更显著)以及受地震和仪器设备等影响引起的阶跃项[24]。由于垂直方向对陆地水负荷变化比水平方向更敏感[25-26],因此本文仅使用GNSS垂直位移进行分析。

为得到仅含水文负荷引起的位移信号,需要对GNSS垂直位移进行一系列处理,步骤如下:

1)采用四分位距法(interquartile range,IQR)剔除GNSS垂直位移时间序列中的异常值[27],同时剔除垂向上先验误差大于20 mm的原始数据。图3为YNDC测站和YNLJ测站垂直位移时间序列的粗差探测结果图。从图3中可以看出,YNDC测站和YNLJ测站均具有明显的周期性,粗差个数较少,利用IQR能准确地探测出原始数据中的异常值并将其剔除得到干净的数据。此外,对各测站垂直位移时间序列模型参数进行拟合建模,使用最小二乘线性拟合法对GNSS垂直时间序列中的长期线性趋势项和阶跃项进行校正。

2)扣除NTOL及NTAL效应的影响。本文采用德国地学研究中心提供的固体地球表面几何中心框架下的负荷产品进行校正[28]。NTOL和NTAL的时间分辨率均为3 h,为了方便分析,将其统一为日时间分辨率。图4为所有测站

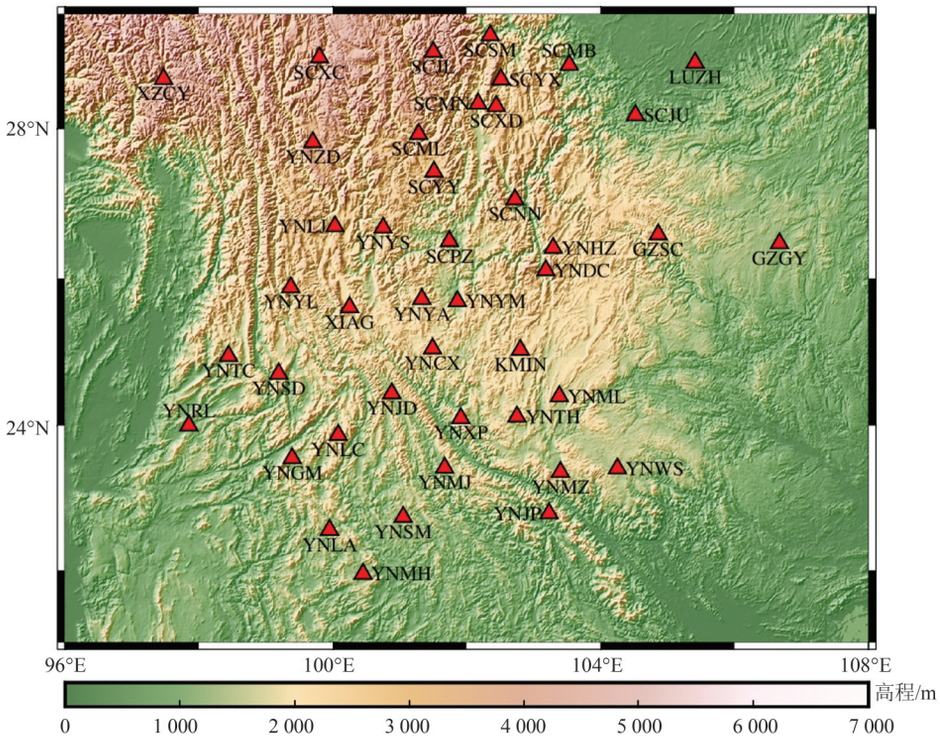


图1 研究区地理位置及测站分布

Fig. 1 Geographical Location and Stations Distribution of the Study Area

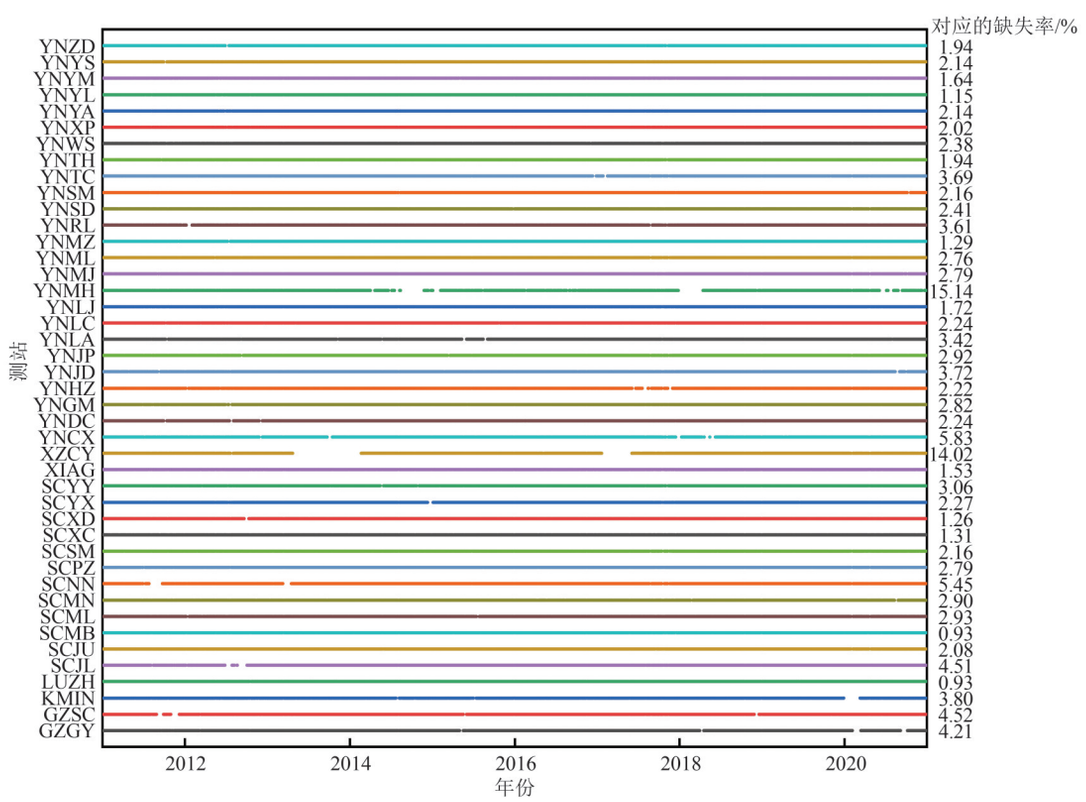


图2 各测站数据缺失情况

Fig. 2 Data Missing Status of Each Station

NTOL和NTAL的垂直位移周年振幅。云南及其周边区域的NTAL效应对GNSS测站垂直位移时间序列的影响较大,周年振幅在1.88~4.18 mm之间,最大值为LUZH测站,最小值为XZCY测站,43个测站NTAL周年振幅值平均值为2.73 mm。NTOL对GNSS垂直位移时间序列的影响较小,周年振幅均不超过0.5 mm,最大值为0.49 mm(YNWS测站),最小值为0.14 mm(XZCY测站),

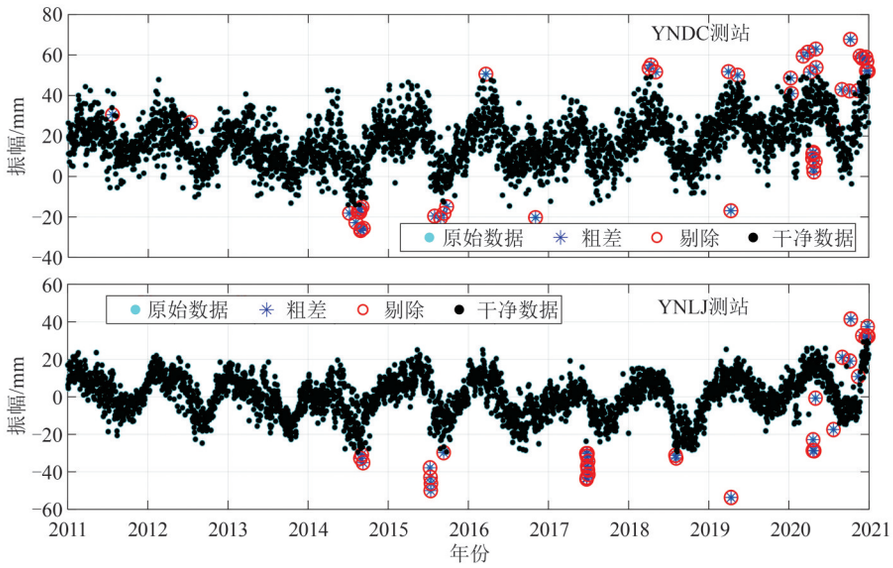


图 3　YNDC 和 YNLJ 测站垂向上的粗差探测图

Fig. 3　Vertical Gross Errors Detection Map of YNDC and YNLJ Stations

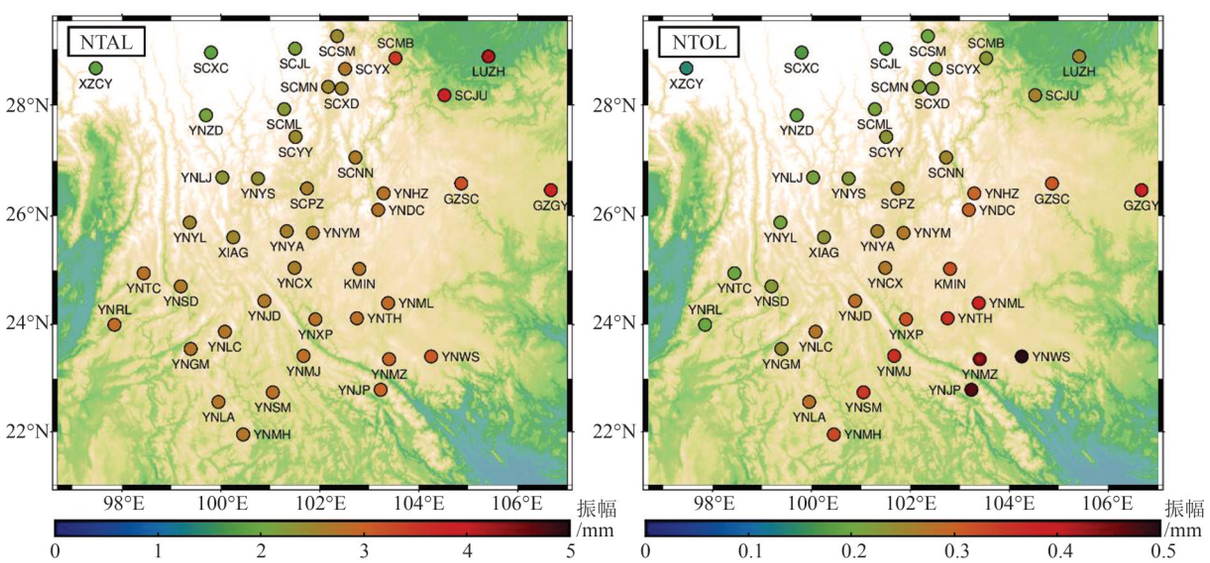


图 4　GNSS 测站 NTAL 和 NTOL 垂直位移周年振幅

Fig. 4　GNSS Station Vertical Displacement NTAL and NTOL Annual Amplitude

所选测站 NTOL 周年振幅值平均值为 0.27 mm。整体而言,NTOL 和 NTAL 对云南区域测站垂直位移时间序列的影响由西北向东南逐渐增大。

3)在实际观测过程中,受观测环境和仪器设备等因素的影响,GNSS 测站位移时间序列不可避免地存在数据缺失,为了确保数据的完整性以便更好地反演 TWS 的时空分布,需要对其进行插值补齐。本文采用 LIU 等[29]开发的基于动态时空插值法的克里金-卡尔曼滤波插值(Kriging Kalman filter,KKF)的 GMIS 软件填补缺失数据,该方法结合了克里金插值(考虑测站空间数据的自相关性)和卡尔曼滤波时间域最小均方误差估计的优势从而提高插值结果的准确性和稳定性。图 5 展示了 YNLA、YNMH、YNTC、YNYL、SCMN、SCYX 6 个测站垂直位移时间插值前后的结果。KKF 方法能够利用时间序列的动态变化,有效地捕捉空间数据的变化趋势,从而提高插值的精度。

4)GNSS 垂直位移与水文负荷形变关系研究。水文负荷产品来源同上,时间分辨率为 24 h。图 6(a)为 43 个测站垂直位移周年振幅,可以看出云南区域 GNSS 垂直位移序列季节性变化特征明显,而 GNSS 数据中季节性变化的幅度与水文负荷变化密切相关[30-31],水文负荷变化主要是由 TWS(如降水、河流、地下水等)的季节性变化引起的。云南区域 GNSS 测站垂直位移周年振幅

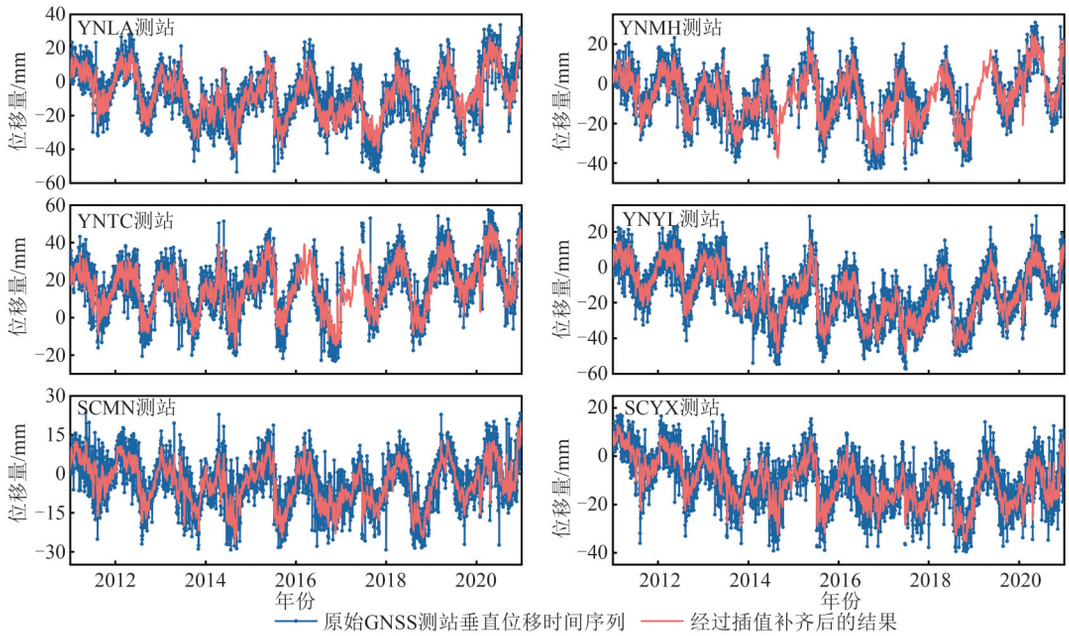


图5 KKF插值前后对比图

Fig. 5 Comparison Before and After KKF Interpolation

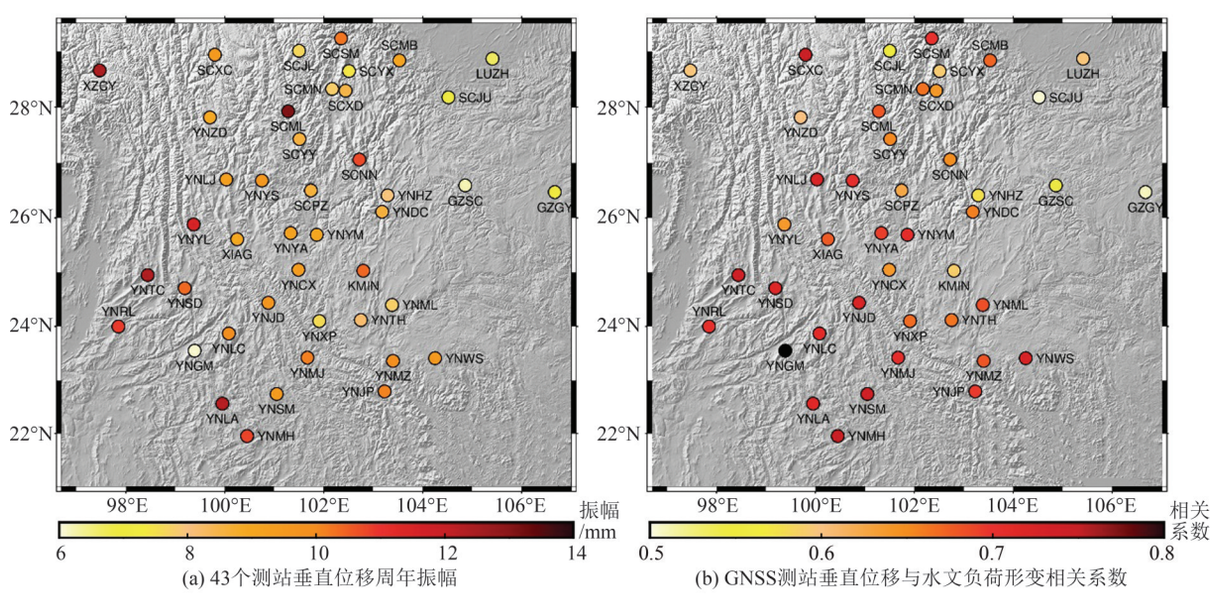


图6 GNSS测站垂直位移周年振幅及垂直位移与水文负荷形变相关系数

Fig. 6 Annual Amplitude of GNSS Station Vertical Displacement and Correlation Coefficient Between Vertical Displacement and Hydrological Load Deformation

在6～14 mm之间,最大季节性波动为13.1 mm,季节性变化最小为YNGM测站,其值为6.1 mm,周年振幅平均值约为9.3 mm,周年幅值由东北向西南逐渐增大(除YNGM测站外),表明该区域TWS变化由东北向西南逐渐增加。图6(b)为GNSS测站垂直位移与水文负荷形变的相关系数。可以看出,两者的相关系数(除YNGM测站外,值为0.48)均大于0.5,YNMH测站两者相关性最大,值为0.74。所有测站相关系数平均值为0.65,说明云南区域GNSS垂直位移与水文负荷形变间的相关性较强,水文负荷是引起GNSS垂直位移季节性变化的主要影响因素。

5)特殊测站分析。由图6可知,YNGM测站垂直位移周年振幅最小,与水文负荷形变相关性最小。图7为YNYM、YNSM、YNGM 3个测站插值后的垂直位移时间序列及其周期项拟合结果。可以看出,YNYM、YNSM测站具有明显的季节性变化,而YNGM周期性拟合效果最差,季节性变化不明显,可能含有非线性构造运动信号,该测站存在数据异常[32],因此在利用GNSS

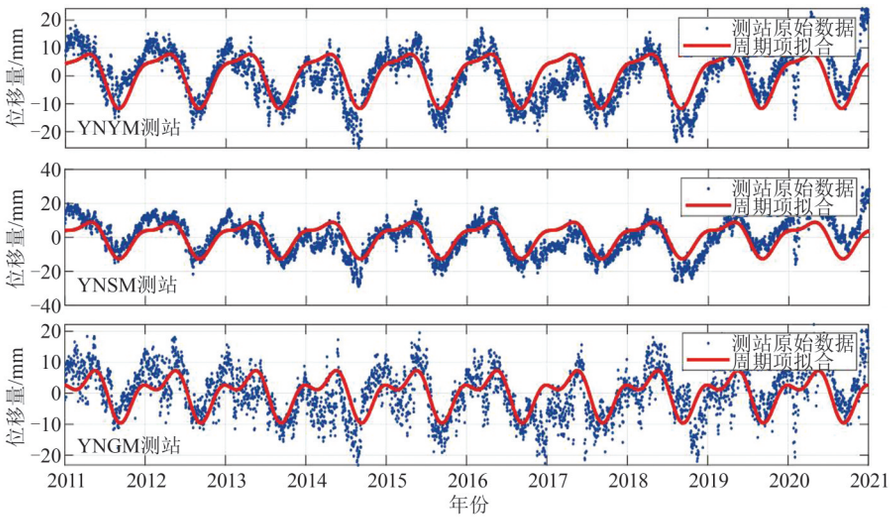


图7　YNYM、YNSM和YNGM 3个测站垂直位移时间序列及周期项拟合结果

Fig. 7　Fitting Results of Vertical Displacement Time Series and Periodic Terms for YNYM, YNSM and YNGM Stations

垂直位移时间序列反演水储量变化时将该测站数据进行剔除。

1.2　GRACE数据

为了验证GNSS数据反演结果的可靠性,本文采用时间跨度为2011-01—2020-12的GRACE/GRACE-FO时变重力场数据,来自美国德克萨斯大学空间研究中心发布的RL06 Mascon产品(https://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06.html)进行对比,所选时间段内共缺失了31个月的数据,单月的缺失数据采用奇异谱分析进行插值[33]。该数据产品在研究区域TWS变化中应用广泛,空间分辨率为0.25°×0.25°。此外,该数据经过了相应的校正,包括原始的C20和C30系数(仅适用于GRACE-FO)被卫星激光测距的C20和C30解所替换[34],经过地心一阶项改正、基于ICE6G-D模型的冰后期回弹效应校正并扣除了NTOL和NTAL等[32,35],最终去除了2004—2009年的均值。

1.3　GLDAS数据

本文所采用的GLDAS Noah 2.1数据集(https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets)可从戈达德地球科学数据和信息服务中心获得,空间分辨率为0.25°×0.25°,时间分辨率为1个月,采用的时间跨度与GRACE一致,Noah模型使用先进的地表建模和数据同化技术提取了卫星和地面观测数据产品,以生成地表状态和通量的最佳场。该模型包含了空间经纬度范围为180°W—180°E、90°S—60°N的大气、土壤温度和湿度、降水、太阳辐射和植被覆盖等多种变量[36],通过选取地表以下0~2 m深度的土壤含水量、雪水当量、冠层水量进行累加计算。此外,为了与GRACE时变重力场数据进行对比分析,同样需要扣除2004—2009年平均值进而得到TWS变化。

1.4　降水数据

降水是水循环的一个重要环节,直接影响到地表水体和地下水储量。本文采用的降水数据(https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcc.html)来源于全球降水气候学中心。该数据是基于观测的全球陆地表面网格降水数据集,并根据全球多个测站数据计算得出,选用2020年的监测产品,提供了自1982年至今全球月降水量数据,空间分辨率为1°×1°,时间跨度与GRACE数据一致。

2　原理和方法

2.1　负荷格林函数原理

固体地球受到冰川融化、地表水、大气等作用时会使地球表面发生弹性形变,研究表明垂直位移形变相比于水平位移形变对负荷源更为敏感[37],利用质量负荷格林函数理论,可以有效地描述和预测地球表面质量负荷变化对地壳的形变[37-39]:

$$G(\varphi)=\frac{R}{M}\sum_{n=0}^{\infty}h_n P_n(\cos\varphi) \tag{1}$$

式中,G为格林函数;R和M分别为地球的半径和质量;h_n为垂直负荷Love数[40];P_n为n阶的勒让德多项式;φ为GNSS测站与质量载荷间的角距。因此,地表垂直形变ΔU可表示为[37]:

$$\Delta U=\sum_{i=1}^{I}\Delta m_i G(\varphi) \tag{2}$$

式中,l为载荷个数;Δm为质量载荷。根据式(2),可将TWS变化与GNSS垂直形变表示为:

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{M}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{e},\boldsymbol{e}\in(0,\sigma^2\boldsymbol{I}) \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{y}$为GNSS垂直位移观测向量;$\boldsymbol{M}$为格林函数系数矩阵;$\boldsymbol{x}$为待估计的质量载荷向量,采用等效水高(equivalent water height,EWH)表示;$\boldsymbol{e}$为$\boldsymbol{y}$的观测值残差向量;σ^2为$\boldsymbol{y}$的误差方差;$\boldsymbol{I}$为单位矩阵。

2.2 反演模型

由于特定区域内的GNSS测站数量是有限的,会导致观测方程的法方程系数矩阵秩亏,因此利用GNSS垂直位移形变数据反演水储量变化是一个离散病态问题。选用Tikhonov正则化[41]方法来稳定求解该病态问题,采用最小二乘模型进行反演,该模型基于圆盘负荷理论,考虑到GNSS测站垂直位移时间序列会受到研究区域周边一定范围内负荷源的影响,从而产生边界效应,致使反演结果不准确。因此,本文将研究区域边界范围扩展2°以抑制反演过程中的边界效应问题[16]。利用GNSS垂向季节性位移变化反演TWS变化的时空分布特征,其原理如下[37]:

$$\min\left\{\left\|\boldsymbol{M}\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}\right\|^2+\beta^2\left\|\boldsymbol{L}\boldsymbol{x}\right\|^2\right\} \tag{4}$$

式中,β为平滑因子,本文采用广义交叉验证方法[42]选取最优的正则化参数,如图8所示,可以看出确定最优的平滑因子为0.008;$\boldsymbol{L}$为拉普拉斯矩阵[17],核为$\begin{bmatrix}0&1&0\\1&-4&1\\0&1&0\end{bmatrix}$。那么,格网点对应的EWH估计值$\hat{x}$可表示为[17]:

$$\hat{x}=(\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}+\sigma^2\beta^2\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L})^{-1}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \tag{5}$$

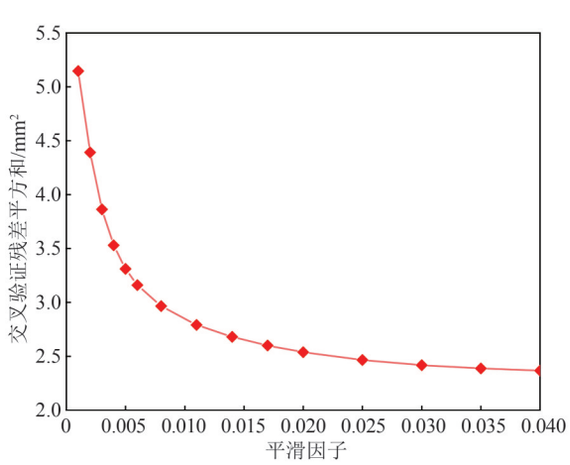


图8 平滑因子结果图

Fig. 8 Smooth Factor Results

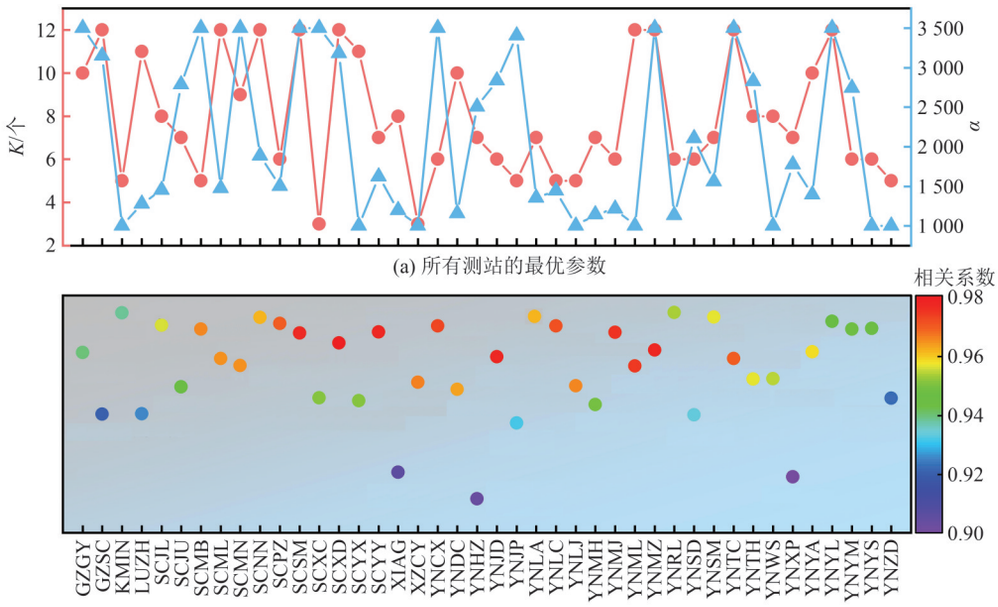
3 TWS反演实验与分析

3.1 GNSS数据高频噪声的滤除

为了降低GNSS垂直位移时间序列中高频噪声的影响,本文采用变分模态分解(variation mode decomposition,VMD)算法对插值后的时间序列进行分解,由于VMD处理非线性时间序列时关键参数难以确定,故利用麻雀搜索算法(sparrow search algorithm,SSA)对VMD的模态分解个数K和二次惩罚因子α进行优化,从而实现自适应选取最优参数,达到快速、准确分解的目的。在使用SSA算法优化VMD(SSA-VMD)时,选用络熵作为适应度函数。SSA-VMD分解后采用多尺度排列熵筛选准则作为判断噪声和信号的依据,具体流程参见文献[43]。图9(a)为所有测站经SSA-VMD的最优参数结果,可以看出大多数测站的惩罚因子α在1 500以上,最佳模态分解个数K在5~12之间。由图9(b)可知,经该方法处理后的位移时间序列与原时间序列的相关系数均大于0.9,最小为0.911 5,最大为0.974 3,表明该方法能够很好地减弱高频噪声的影响,且能较好地保留原始时间序列的季节性运动变化。

3.2 综合对比分析

为了研究GNSS数据反演区域TWS的可行性,本文选取云南区域及其周边43个测站进行分析,由于YNGM测站数据异常,予以剔除,因此利用其余42个测站垂直位移时间序列推断云南区域2011—2020年的TWS变化。限于篇幅,图10~12仅展示了2011-05和2011-09以及2019-05—2019-10经GNSS、GRACE/GRACE-FO和GLDAS数据反演出的TWS空间分布特征。可以看出,GRACE/GRACE-FO和GLDAS数据在2011-05反演得到的TWS变化表现出相似的空间分布特征,即在云南区域范围内整体出现负异常,TWS亏损达到最大值,尤其在西南部更明显。但GRACE反演的结果变化更大。2011-09 TWS变化主要为正异常,GRACE和GLDAS得到的TWS在东北部均出现负异常,而GNSS反演的结果并未出现该变化。2019-05—2019-09,3种数据反演得到的TWS变化逐渐增大,呈增加趋势,从5月的负异常逐渐到9月的正异常。5月和9月的TWS空间分布与2011年相似。总的来说,GNSS反演得到的TWS变化在大多数月份与其余两种数据估算的TWS变化具有较好的一致



(b) 所有测站降噪前后的相关系数

图 9　各测站最优参数及去噪前后相关系数

Fig. 9　Optimal Parameters and Correlation Coefficients Before and After Denoising for Each Measuring Station

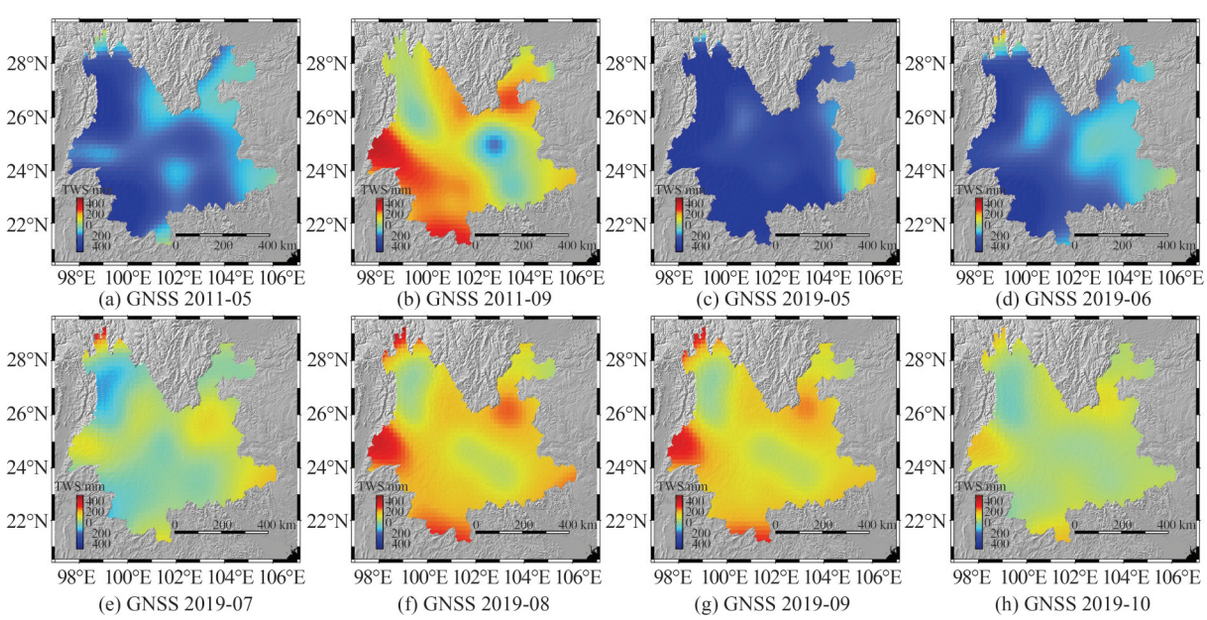


图 10　云南区域部分月份GNSS TWS

Fig. 10　GNSS TWS in Some Months in Yunnan Region

性,但相较于GRACE和GLDAS这两种数据,GNSS反演的TWS整体上空间分布信号更强。图13为云南区域GNSS-EWH、GRACE-EWH、GLDAS-EWH以及降水数据周年振幅分布。上述几种数据得到周年振幅分布大体上是一致的,东西方向分布差异明显,西南部的TWS周年振幅变化最大,逐渐向东北减小。GNSS-EWH周年振幅最大达到了450 mm左右,GRACE-EWH周年振幅最大约为220 mm,而GLDAS周年振幅最大约为160 mm。这与图10~12的TWS空间分布特征相吻合。造成这一差异的原因主要是这几种不同的数据是用不同的观测手段和建模方法得到的,此外还有在GNSS反演中未考虑到边界外长波水文负荷信号的影响。由卫星大地测量技术观测得到的GRACE/GRACE-FO数据虽包含所有水成分但数据质量不高,存在部分月份数据缺失且空间分辨率低,不如GNSS观测数据对局部区域的TWS变化敏感,从而影响其反演局部区域TWS变化的效果,无法准确评估水文干旱事件。由GLDAS得到的TWS周年振幅

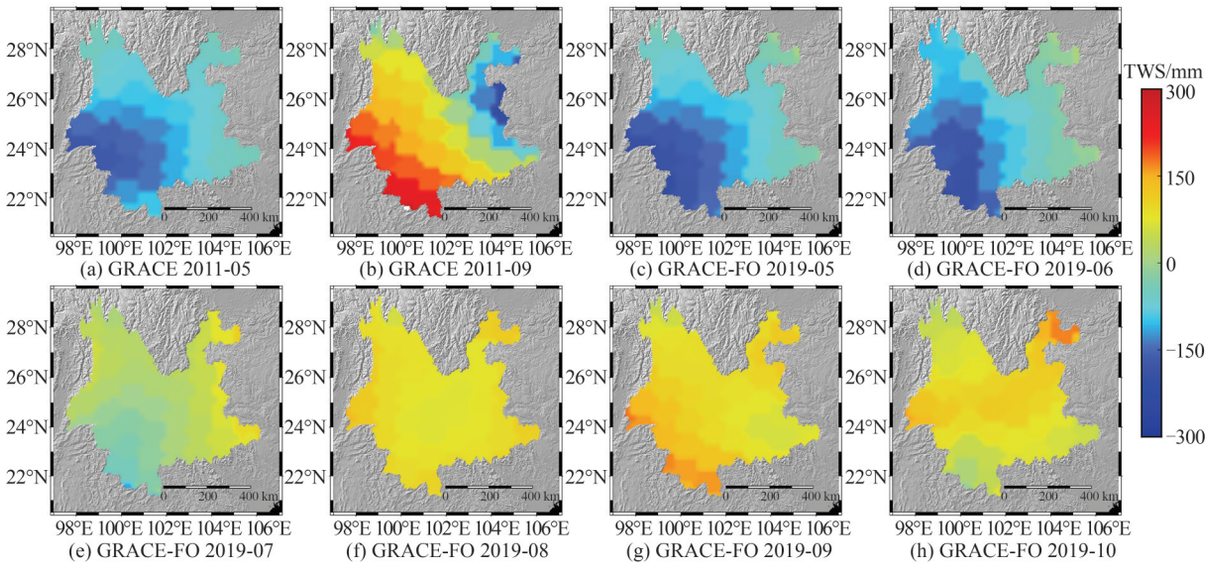


图11 云南区域部分月份GRACE/GRACE-FO TWS

Fig. 11 GRACE/GRACE-FO TWS in Some Months in Yunnan Region

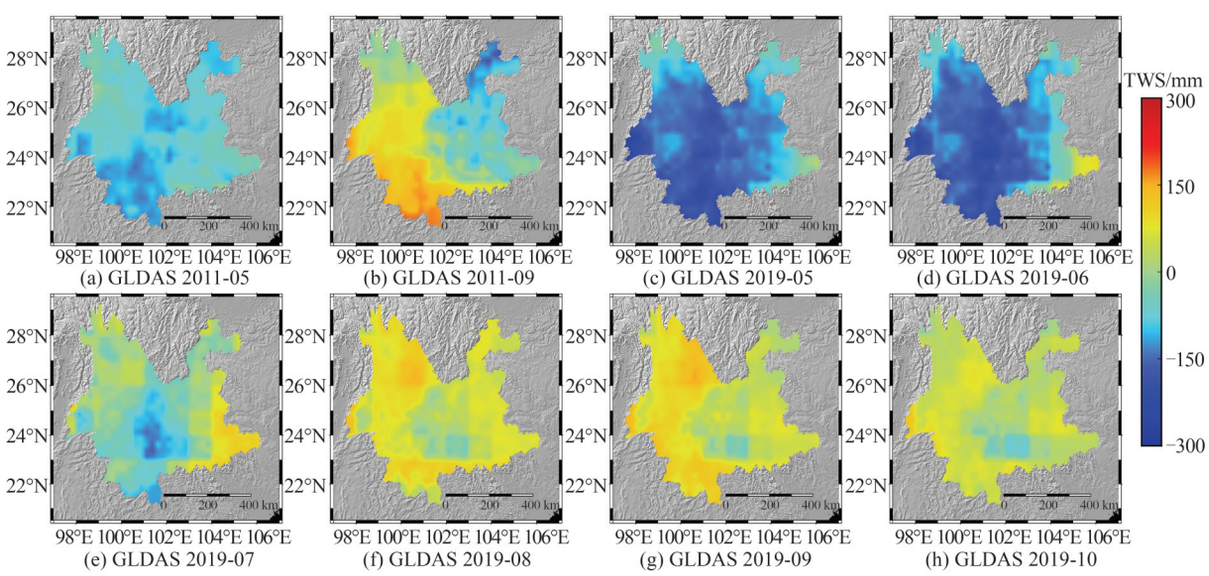


图12 云南区域部分月份GLDAS TWS

Fig. 12 GLDAS TWS in Some Months in Yunnan Region

最小主要是由于该数据的水成分为土壤水分、冠层水以及雪水的总和,水文同化模型模拟水循环相对简单,难以捕捉全部水成分,而忽略深层地下水和其他地表水成分[17]。

此外,利用GPCC降水数据还得到了2011—2020年云南区域的年平均降水总量,如图14所示。2011—2020年区域内年平均降水量在西南部达到最大,约为2 100 mm,年平均降水量最小出现在西北部,大概在600 mm左右。该时间段年平均降水量的空间分布整体从西南逐渐向东北减小,与上述各种数据反演的TWS分布具有一致性,说明降水是影响云南区域TWS变化的重要因素,但GNSS反演的TWS周年振幅分布在西北部较大,与降水量分布存在差异,表明降水并不是该地区TWS的主要驱动因素,可能还受其他蒸散径流等因素的影响。

本文除了分析云南区域TWS变化的空间分布特征外,还分析了季节性TWS变化的时间特征,估算了GNSS-EWH、GRACE/GRACE-FO-EWH和GLDAS-EWH以及降水数据的月尺度时间序列(图15),利用奇异谱分析方法补全了2017—2018年GRACE和GRACE-FO之间连续11个月的空白。可以看出,由GNSS数据反演得到的TWS与GRACE/GRACE-FO、GLDAS在时间尺度上具有明显的季节性变化特征,且每年达到波峰和波谷的时间具有较高的一致性。

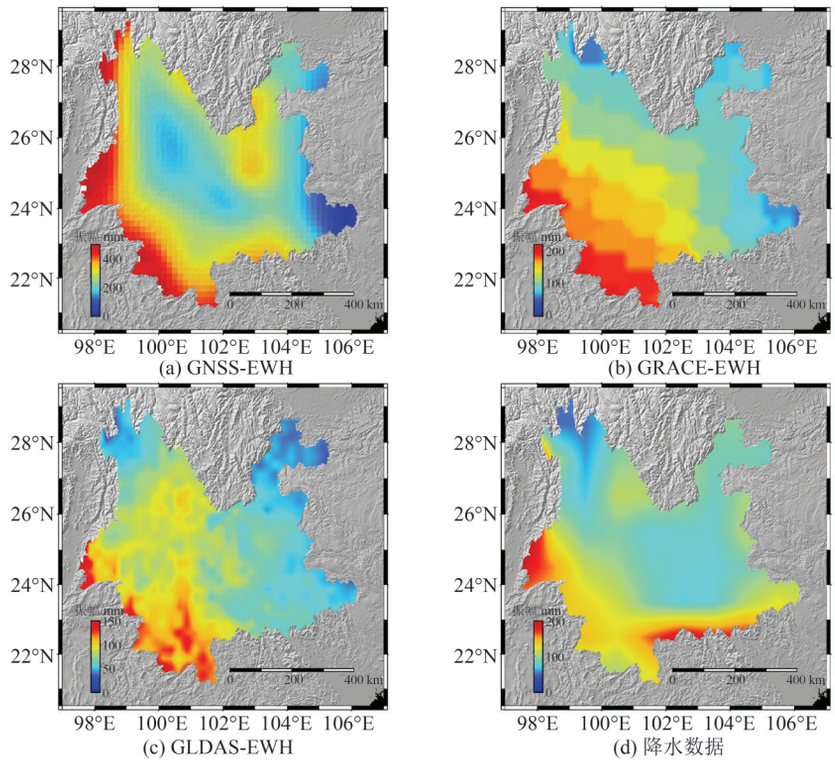


图 13　云南区域TWS和降水数据周年振幅分布

Fig. 13　Annual Amplitude Distribution of TWS and Precipitation Data in Yunnan Region

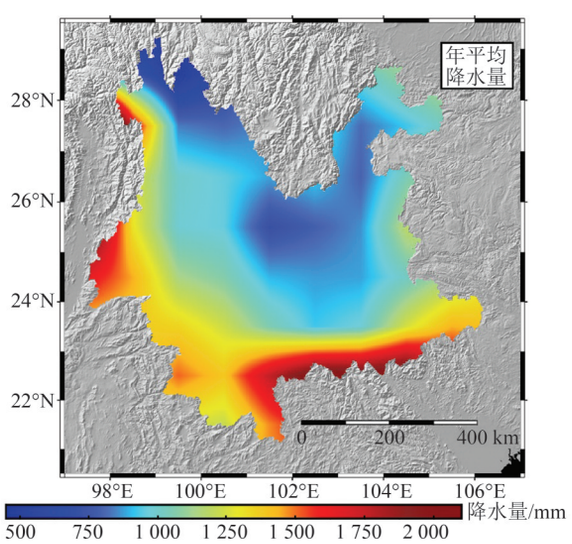


图 14　2011—2020年的年平均降水量

Fig. 14　Annual Average Precipitation from 2011 to 2020

GNSS与GRACE/GRACE-FO的EWH时间序列的相关系数为0.700 3,GNSS与GLDAS的EWH时间序列的相关系数为0.709 7,GRACE/GRACE-FO与GLDAS的EWH时间序列的相关系数为0.737 7,3种数据得到的TWS变化时间序列之间的相关系数均达到了0.7以上,表明相关性较高,反演的一致性较好。由图15可知,GNSS反演的TWS变化周年振幅最大,其次是GRACE,最小为GLDAS,其原因与上文分析的相同。2011—2018年GNSS-EWH时间序列整体呈上升趋势,2019—2020年表现出显著的下降趋势,降水量持续减少,全域TWS骤减导致云南区域出现较长时间的严重干旱,直到2020-08全域水储量得到补充,大幅增加,基本回到正常值。此外,结合降水数据,可以发现云南区域具有明显的干湿季分离,全年降水量在夏季7月—8月达到峰值,冬季降水量最小,而GNSS、GRACE以及GLDAS的EWH时间序列的峰值主要在每年的9月—10月,对比降水数据具有一定的时间滞后性,造成这种情况的原因主要是降水导致的TWS逐渐增加,在雨季期间蓄积,雨季过后水储量达到峰值。

4　结　语

本文针对传统水文模型的缺陷和卫星大地测量数据(GRACE/GRACE-FO)反演TWS变化的不足,采用奇异谱分析方法补全了GRACE/GRACE-FO数据的月份数据缺失。利用GNSS观测的高精度、高时空分辨率的陆态网基准站垂直位移时间序列,结合非线性信号提取方法研究了2011—2020年云南区域TWS的时空分布特征,分析了环境负荷NTOL、NTAL和水文负荷

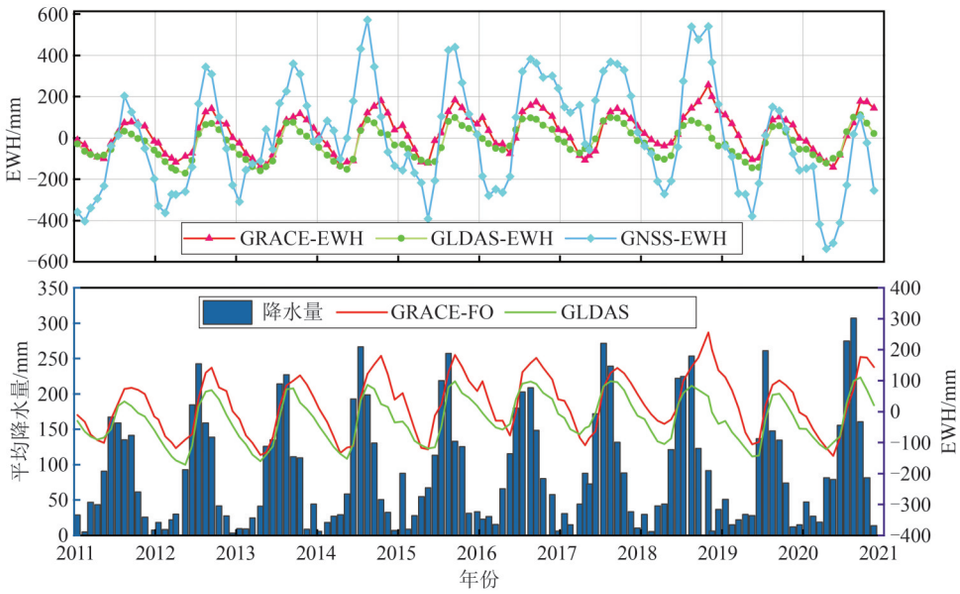


图15 云南区域平均降水量和TWS的时间序列变化

Fig. 15 Time Series Changes in Average Precipitation Data and TWS in Yunnan Region

对GNSS垂直位移时序列的具体影响,并将反演结果与GRACE/GRACE-FO数据、GLDAS数据以及降水数据进行比较,得出下列结论:

1)通过研究环境负荷与GNSS垂向时间序列的关系发现,水文负荷是引起GNSS垂直位移时间序列季节性变化的主要因素,其相关系数在0.5以上,平均相关系数为0.65。其次是NTOL,影响最小的是NTAL。针对GNSS基准站时间序列存在复杂噪声的问题,本文采用SSA-VMD的信号提取方法提取GNSS测站垂直位移时间序列信号,经该方法减弱高频噪声的影响后,处理后的时间序列更加干净,且与原时间序列的相关性均在0.9以上,表明该方法能够很好地保持原有序列的运动趋势。

2)云南区域TWS变化在空间上呈现自东北向西南逐渐增加的趋势,且经GNSS得到的TWS变化的空间分布与GRACE/GRACE-FO和GLDAS在大多数月份是一致的,在极少数地区由于其他因素(蒸散径流等)的影响可能与降水数据存在差异。从反演结果上看,由于GNSS对局部区域的TWS变化更加敏感,因此反演的TWS周年振幅最大,其次是GRACE/GRACE-FO,GLDAS得到的TWS周年振幅最小。

3)经GNSS、GRACE/GRACE-FO和GLDAS反演得到的云南区域TWS变化在时间上具有明显的季节性变化特征,3种数据的EWH时间序列具有较好的一致性,但GNSS-EWH的周年振幅最大,与空间分布特征相吻合。与降水数据相比,存在一定的时间滞后性。云南区域TWS变化在2011—2018年相对比较稳定,整体呈增加趋势,但在2019—2020年EWH时间序列呈现明显的下降趋势,全省水储量持续减少导致出现较长时间的严重干旱,到2020-08全域范围内水储量基本回到正常值。

参 考 文 献

[1] FAMIGLIETTI J S. Remote Sensing of Terrestrial Water Storage, Soil Moisture and Surface Waters [M]//The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics. Washington D C: American Geophysical Union, 2004: 197-207.

[2] WAHR J, SWENSON S, ZLOTNICKI V, et al. Time-Variable Gravity from GRACE: First Results [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(11): 2004GL019779.

[3] LONG D, SHEN Y J, SUN A, et al. Drought and Flood Monitoring for a Large Karst Plateau in Southwest China Using Extended GRACE Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155: 145-160.

[4] YIN W J, HU L T, ZHANG M L, et al. Statistical Downscaling of GRACE-Derived Groundwater Storage Using ET Data in the North China Plain [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(11): 5973-5987.

[5] JIANG Z S, HSU Y J, YUAN L G, et al. Estimation of Daily Hydrological Mass Changes Using Continuous GNSS Measurements in Mainland China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126349.

[6] SCANLON B R, ZHANG Z Z, SAVE H, et al. Global Models Underestimate Large Decadal Declining and Rising Water Storage Trends Relative to GRACE

Satellite Data [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(6): E1080-E1089.

[7] SCHUMACHER M, FOROOTAN E, VAN DIJK A I J M, et al. Improving Drought Simulations Within the Murray-Darling Basin by Combined Calibration/Assimilation of GRACE Data into the WaterGAP Global Hydrology Model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 212-228.

[8] SOLTANI S S, ATAIE-ASHTIANI B, SIMMONS C T. Review of Assimilating GRACE Terrestrial Water Storage Data into Hydrological Models: Advances, Challenges and Opportunities[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 213: 103487.

[9] 胡小工, 陈剑利, 周永宏, 等. 利用GRACE空间重力测量监测长江流域水储量的季节性变化[J]. 中国科学:地球科学, 2006, 36(3): 225-232.
HU Xiaogong, CHEN Jianli, ZHOU Yonghong, et al. Monitoring the Seasonal Variation of Water Reserves in the Yangtze River Basin by GRACE Space Gravity Survey[J]. *Science China Earth Sciences*, 2006, 36(3): 225-232.

[10] SAVE H, BETTADPUR S, TAPLEY B D. High-Resolution CSR GRACE RL05 Mascons[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(10): 7547-7569.

[11] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. *Science*, 2004, 305(5683): 503-505.

[12] XIONG Y H, FENG W, BAI H B, et al. High-Resolution Terrestrial Water Storage Anomalies and Components in China from GRACE/GFO via Joint Inversion Downscaling [J]. *Water Resources Research*, 2025, 61(7): e2024WR038996.

[13] ENZMINGER T L, SMALL E E, BORSA A A. Accuracy of Snow Water Equivalent Estimated from GPS Vertical Displacements: A Synthetic Loading Case Study for Western U. S. Mountains[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(1): 581-599.

[14] 朱伟刚, 马东, 郑宇, 等. 利用GNSS垂向位移研究云南地区水文干旱特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(3): 295-302.
ZHU Weigang, MA Dong, ZHENG Yu, et al. Research on the Hydrological Drought Characteristics in Yunnan Region Using GNSS Vertical Displacement [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, 43(3): 295-302.

[15] ARGUS D F, FU Y N, LANDERER F W. Seasonal Variation in Total Water Storage in California Inferred from GPS Observations of Vertical Land Motion[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(6): 1971-1980.

[16] 何思源, 谷延超, 范东明, 等. 利用GPS垂直位移反演云南省陆地水储量变化[J]. 测绘学报, 2018, 47(3): 332-340.
HE Siyuan, GU Yanchao, FAN Dongming, et al. Seasonal Variation of Terrestrial Water Storage in Yunnan Province Inferred from GPS Vertical Observations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3): 332-340.

[17] JIANG Z S, HSU Y J, YUAN L G, et al. Monitoring Time-Varying Terrestrial Water Storage Changes Using Daily GNSS Measurements in Yunnan, Southwest China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 254: 112249.

[18] 杨兴海, 袁林果, 姜中山, 等. 应用GPS垂向位移定量分析2011—2020年云南省极端干旱时空特征[J]. 地球物理学报, 2022, 65(8): 2828-2843.
YANG Xinghai, YUAN Linguo, JIANG Zhongshan, et al. Quantitative Analysis of Abnormal Drought in Yunnan Province from 2011 to 2020 Using GPS Vertical Displacement Observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(8): 2828-2843.

[19] LI X P, ZHONG B, LI J C, et al. Inversion of Terrestrial Water Storage Changes from GNSS Vertical Displacements Using a Priori Constraint: A Case Study of the Yunnan Province, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 129126.

[20] 杨兴海, 袁林果, 姜中山, 等. 联合GNSS与GRACE/GRACE-FO数据反演中国西南地区陆地水储量变化[J]. 测绘学报, 2024(5): 813-822.
YANG Xinghai, YUAN Linguo, JIANG Zhongshan, et al. Joint Inversion of GNSS and GRACE/GRACE-FO Data for Terrestrial Water Storage Changes in Southwest China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024(5): 813-822.

[21] 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.

[22] DAVIS J L, ELÓSEGUI P, MITROVICA J X, et al. Climate-Driven Deformation of the Solid Earth from GRACE and GPS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(24): 2004GL021435.

[23] 段旭, 尤卫红, 郑建萌. 云南旱涝特征[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 84-90.
DUAN Xu, YOU Weihong, ZHENG Jianmeng. The Drought and Flood Feature in Yunnan[J]. *Pla-*

teau Meteorology, 2000, 19(1): 84-90.

[24] BEVIS M, BROWN A. Trajectory Models and Reference Frames for Crustal Motion Geodesy[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(3): 283-311.

[25] DONG D, FANG P, BOCK Y, et al. Anatomy of Apparent Seasonal Variations from GPS-Derived Site Position Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B4): ETG9-1-ETG9-16.

[26] YOU W, LIU Z J, JIANG Z S, et al. Revealing the Characteristics and Propagation Patterns of Hydrological Drought in Sichuan Using GNSS-Based Runoff Estimates[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2025, 18(1): 2484670.

[27] 胡顺强, 王坦, 管雅慧, 等. 利用GPS和水文负载模型研究云南地区垂向季节性波动变化和构造变形[J]. 地球物理学报, 2021, 64(8): 2613-2630.
HU Shunqiang, WANG Tan, GUAN Yahui, et al. Analyzing the Seasonal Fluctuation and Vertical Deformation in Yunnan Province Based on GPS Measurement and Hydrological Loading Model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(8): 2613-2630.

[28] DILL R, DOBSLAW H. Numerical Simulations of Global-Scale High-Resolution Hydrological Crustal Deformations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(9): 5008-5017.

[29] LIU N, DAI W J, SANTERRE R, et al. A MATLAB-Based Kriged Kalman Filter Software for Interpolating Missing Data in GNSS Coordinate Time Series[J]. *GPS Solutions*, 2017, 22(1): 25.

[30] DAVIS J L, WERNICKE B P, TAMISIEA M E. On Seasonal Signals in Geodetic Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B1): 2011JB008690.

[31] 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.
FENG Tengfei, SHEN Yunzhong, WANG Fengwei, et al. Signal Extraction and Physical Mechanism Analysis of the Seasonal Vertical Displacement in North China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 866-874.

[32] ZHAN W, LI F, HAO W F, et al. Regional Characteristics and Influencing Factors of Seasonal Vertical Crustal Motions in Yunnan, China[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 210(3): 1295-1304.

[33] YI S, SNEEUW N. Filling the Data Gaps Within GRACE Missions Using Singular Spectrum Analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(5): e2020JB021227.

[34] LOOMIS B D, RACHLIN K E, LUTHCKE S B. Improved Earth Oblateness Rate Reveals Increased Ice Sheet Losses and Mass-Driven Sea Level Rise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(12): 6910-6917.

[35] 张岚, 孙文科. 重力卫星GRACE Mascon产品的应用研究进展与展望[J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(1): 35-52.
ZHANG Lan, SUN Wenke. Progress and Prospect of GRACE Mascon Product and Its Application[J]. *Reviews of Geophysiscs and Planetary Physics*, 2022, 53(1): 35-52.

[36] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The Global Land Data Assimilation System[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394.

[37] WAHR J, KHAN S A, VAN DAM T, et al. The Use of GPS Horizontals for Loading Studies, with Applications to Northern California and Southeast Greenland[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(4): 1795-1806.

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

[39] JIANG Z S, ZHANG Y H, CHANG M J, et al. Weighted Laplacian Smoothing Constraints for Terrestrial Water Storage Changes Considering GNSS Station Density: A Case Study in Pacific Northwest[J]. *GPS Solutions*, 2025, 29(3): 104.

[40] WANG H S, XIANG L W, JIA L L, et al. Load Love Numbers and Green's Functions for Elastic Earth Models PREM, iasp91, ak135, and Modified Models with Refined Crustal Structure from Crust 2.0[J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 49: 190-199.

[41] HANSEN P C. REGULARIZATION TOOLS: A Matlab Package for Analysis and Solution of Discrete Ill-Posed Problems[J]. *Numerical Algorithms*, 1994, 6(1): 1-35.

[42] FERREIRA V G, NDEHEDEHE C E, MONTECINO H C, et al. Prospects for Imaging Terrestrial Water Storage in South America Using Daily GPS Observations[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 679.

[43] 杨厚明, 鲁铁定, 孙喜文, 等. SSA-VMD与小波分解结合的GNSS坐标时序降噪方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(4): 360-365.
YANG Houming, LU Tieding, SUN Xiwen, et al. GNSS Coordinate Time Series Denoising Method Combining SSA-VMD and Wavelet Decomposition[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, 44(4): 360-365.