引文格式:刘斌,周灿,饶维龙,等.顾及远场水文负荷影响的区域GNSS陆地水储量反演:以川滇地区为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(6):1156-1165.DOI:10.13203/j.whugis20240371

Citation: LIU Bin, ZHOU Can, RAO Weilong, et al. Inversion of Regional Terrestrial Water Storage Using GNSS Observations Considering Impact of Far-Field Hydrological Loading: A Case Study in the Sichuan-Yunnan Region, China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(6):1156-1165.DOI:10.13203/j.whugis20240371

顾及远场水文负荷影响的区域GNSS陆地水储量反演:以川滇地区为例

刘 斌[1,2] 周 灿[1,2] 饶维龙[1,2] 冯腾飞[1,2] 陈津津[3]

1 长沙理工大学公路地质灾变预警空间信息技术湖南省工程实验室,湖南 长沙,410114

2 长沙理工大学航空工程学院,湖南 长沙,410114

3 湖南省计量检测研究院,湖南 长沙,410014

摘 要:在利用全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)位移数据进行区域陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)反演研究中,一般通过拓展区域边界来顾及一定范围内的水文负荷变化影响,而忽略了GNSS站点位移受到的远场水文负荷效应影响。若直接利用包含远场负荷贡献的GNSS位移信息进行区域TWS反演,则其中包含的全球尺度信号与区域反演模型所描述的局部特征并不匹配。利用全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)和GRACE(gravity recovery and climate experiment)数据计算川滇地区GNSS站点处的水文负荷位移;进一步利用剔除了远场水文负荷影响的GNSS位移反演川滇地区TWS变化。结果显示,远场水文负荷引起的GNSS站点垂直位移最高可达约2.3 mm;利用GLDAS和GRACE计算的顾及远场效应的TWS反演结果平均振幅分别减小21.0%和25.4%,更加趋近GLDAS与GRACE结果;两种反演格网内等效水高序列与GRACE和GLDAS对应序列有着更高的相关性,与二者结果的差值均方根值都有不同程度减小。研究表明,在川滇地区进行区域TWS反演时,必须顾及并改正远场水文负荷的影响,以消除空间尺度失配导致的系统偏差,提升反演结果的可靠性。

关键词:GNSS位移;陆地水储量;水文负荷;远场影响

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-02-20

DOI:10.13203/j.whugis20240371 **文章编号**:1671-8860(2026)06-1156-10

Inversion of Regional Terrestrial Water Storage Using GNSS Observations Considering Impact of Far-Field Hydrological Loading: A Case Study in the Sichuan-Yunnan Region, China

LIU Bin[1,2] *ZHOU Can*[1,2] *RAO Weilong*[1,2] *FENG Tengfei*[1,2] *CHEN Jinjin*[3]

1 Highway Geological Hazard Early Warning Spatial Information Technology Hunan Provincial Engineering Laboratory, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

2 School of Aeronautic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

3 Hunan Institute of Metrology and Test, Changsha 410014, China

Abstract: **Objectives**: In the inversion of regional terrestrial water storage (TWS) using global navigation satellite system (GNSS) data, it is common to expand the boundary of the study area to account for hydrological loading variations. However, the effects of far-field hydrological loading on GNSS stations are often overlooked. GNSS displacement data are applied in the inversion of regional terrestrial water storage, but the far-field loading contributions in GNSS data may lead to a mismatch between global-scale signals and

基金项目:湖南省自然资源厅科研项目(HBZ20240115);国家自然科学基金(42304028);湖南省教育厅科学研究项目(25A0171,22B0346,22C0154);湖南省自然科学基金(2022JJ90009,2023JJ40022);长沙理工大学公路地质灾变预警空间信息技术湖南省工程实验室开放基金(kfj220602)。

第一作者:刘斌,博士,副教授,主要从事卫星大地测量学研究。binliu@csust.edu.cn

通信作者:饶维龙,博士,讲师。raoweilong@csust.edu.cn

the local characteristics of the regional inversion model. **Methods**: Based on the observation data from 49 GNSS stations in the Sichuan - Yunnan region, China, hydrological loading displacements are calculated using both global land data assimilation system (GLDAS) and gravity recovery and climate experiment (GRACE) data, and the loading effects are divided into local-field, near-field, far-field, and total-field components. Simulation experiments and inversion analysis by real GNSS observations are carried out. The inversion results before and after far-field correction are compared with GLDAS and GRACE data. **Results**: With GLDAS data as the global hydrologic loading, the displacement amplitudes of GNSS sites from local, near, and far fields can reach 3.8 mm, 1.6 mm, and 2.3 mm, respectively. Simulations using GLDAS-calculated site displacement show that the inversion results after removing far-field effects correlate most closely with GLDAS hydrologic loading scenarios, achieving a correlation of 0.98. After removing the far-field effect using GLDAS and GRACE, the extended inversion using GNSS data shows that the average amplitude of TWS inversion results is reduced by 21.0% and 25.4%, respectively. The grid equivalent water height series in the two inversions accounting for far-field effects have a higher correlation with those in GRACE and GLDAS than in the extended inversion. **Conclusions**: In the inversion of TWS in Sichuan-Yunnan region using vertical GNSS observations, the displacements caused by far-field hydrological loading cannot be ignored, and the far-field effect needs to be corrected while expanding the boundary inversion to ensure the accuracy of the inversion results.

Key words: GNSS displacement; terrestrial water storage; hydrological loading; far-field effect

陆地水储量(terrestrial water storage，TWS)变化的准确估计对于认识气候变化影响、揭示极端水文事件演变规律以及提升水资源安全保障能力具有重要科学意义和应用价值[1-3]。目前，研究大尺度TWS变化的方法主要包括水文模型模拟与卫星数据反演。例如，全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system，GLDAS)被广泛用于全球或典型区域TWS变化的估计与监测，但该类水文模型通常存在部分陆地水文成分模拟缺失的问题[4-5]。用于TWS反演的卫星数据主要有重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment，GRACE)卫星和全球导航卫星系统(global navigation satellite system，GNSS)。尽管GRACE卫星已广泛应用于大尺度TWS变化监测[6-7]，但其时间分辨率(月)和空间分辨率(300～500 km)较低，对小区域的TWS变化反演的敏感性不足。此外，部分月份重力场模型缺失及其与GRACE后继卫星(GRACE Follow-On，GRACE-FO)间的数据空白，也在一定程度上限制了GRACE数据的连续应用[8]。

基于GNSS监测的地表形变信息，可对区域TWS变化进行定量反演[9-10]。GNSS反演具有独特优势：一方面，可获得近实时的日尺度TWS变化信息；另一方面，在台站布设较为密集的区域，可实现较高空间分辨率的区域水储量变化监测[11-15]。目前，利用GNSS反演TWS的研究主要集中在反演模型的改进上[16]，如文献[17-19]通过引入不同的正则化约束提高反演的可靠性；文献[20]构建GRACE与GNSS数据点的联合反演模型；文献[11]提出边界包含约束的反演模型，有效提升了边界区域的反演精度等。此外，一些学者在GNSS数据的精细化处理方面也开展了深入研究，如利用主成分分析(principal component analysis，PCA)和独立成分分析等方法提取GNSS位移时间序列中水文负荷信号等[21-23]。这些研究均在一定程度上提升了GNSS区域TWS反演的准确性。

已有研究表明，地表负荷位移的影响范围为50～100 km[24]。因此，当前的GNSS反演研究中，普遍假设GNSS垂向坐标序列中的水文信号是由研究区域与有限的近场区域内的TWS变化引起的。如利用GNSS反演中国云南地区TWS变化研究中选取了2°作为扩展边界[16]，利用GPS估算美国华盛顿州和俄勒冈州的TWS时选取扩展2.5°[25]。这些研究均忽略了临近区域外的远场TWS变化引发的负荷位移效应。在大气负荷变化引起的地表垂直位移的研究中，利用全球气压数据计算的测站整体垂直位移达13 mm，若仅考虑测站周边100 km范围内的气压数据，计算得出的位移仅约为5 mm，而考虑1 000 km范围内的计算结果则最接近整体位移[26]；在研究新西兰大气负荷地表形变中也印证了相关结论[27]。这些研究表明，地表某点的负荷位移受远场负荷变化的影响同样是不可忽略的。基于此，本文提出了

一种顾及远场效应的GNSS TWS反演方法,通过GLDAS和GRACE数据定量评估不同范围内水文负荷变化对川滇地区GNSS站点位移的影响,并进一步分析了顾及远场水文负荷条件下利用GNSS反演川滇地区TWS变化的实际效果。

1 研究区域和数据说明

1.1 研究区域

川滇地区地处中国西南腹地,具有显著的地形起伏和气候分异,地理坐标为97°21′E~111°11′E,21°08′N~33°41′N。该地区位于青藏高原东南缘,是青藏高原地壳物质逃逸带,有着显著的构造运动,地表变形强烈;属亚热带高原季风气候,表现出明显的三维气候特征,受印度季风、东亚季风以及青藏高原气团的显著影响[28]。川滇地区是中国地壳运动观测网络GNSS站点重点布控区,丰富的GNSS观测资料为区域的TWS变化反演研究提供了重要数据基础。

1.2 数据来源

GNSS数据:选取中国地壳运动观测网络中位于川滇地区及周边的49个GNSS基准站,采用其观测数据进行TWS反演研究。数据预处理中去除了GNSS坐标时间序列中的异常值、阶跃项和趋势项,并使用PCA迭代插值方法对时间序列缺失值进行插补。利用德国地学研究中心(GeoForschungsZentrum, GFZ)提供的非潮汐大气负荷和非潮汐海洋负荷位移产品进行了改正。

GRACE/GRACE-FO数据:使用德克萨斯大学奥斯汀分校空间研究中心(center for space research, CSR)提供的每月GRACE和GRACE-FO Level-3 RL06 Mascon产品。CSR处理中扣除了非潮汐大气、非潮汐高频海洋信号、海潮、固体潮等影响,数据时间跨度为2013-01—2023-05,共计125个月,GRACE/GRACE-FO缺失月份数据采用三次样条插值进行补齐[29]。

GLDAS数据:由美国国家航空航天局(https://disc.gsfc.nasa.gov/)戈达德太空飞行中心和美国国家海洋和大气管理局国家环境预测中心联合发布的GLDAS,包含多组地表水数据集。采用GLDAS Noah空间分辨率1°×1°、时间分辨率3 h产品,数据时间跨度为2013-01-01—2023-05-31,使用地表以下2 m深度的浅层土壤水分量、雪水当量和树冠层水之和来模拟总的TWS变化。在实验中,将数据的时间分辨率平均到每日来进行远场负荷位移的计算;在结果对比分析中,使用产品的时间分辨率为月、空间分辨率为0.25°×0.25°。

2 实验方法

2.1 GNSS TWS变化反演理论

GNSS垂向坐标时间序列中的周期变化主要是由地表荷载形变引起的,由荷载引起的GNSS站点地表形变可以根据地球弹性理论计算得出[30]。地球表面某点质量荷载引起的弹性形变计算式为:

$$u(\theta)=\frac{\Delta M\times R}{M_e}\sum_{n=0}^{\infty}h_nP_n(\cos\theta) \tag{1}$$

式中,θ是荷载至站点的角距;ΔM是地表质量荷载;G是格林函数;R是地球半径;M_e是地球质量;h_n和P_n分别是弹性勒夫数和勒让德多项式。

假设反演区域内有n个GNSS站点和m个格网,则GNSS TWS变化反演的格网质量荷载计算式为:

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{u}=\left[u_1\ u_2\ \cdots\ u_n\right]^{\mathrm{T}}$,为经过预处理后的GNSS坐标时间序列;$\boldsymbol{x}=\left[x_1\ x_2\ \cdots\ x_m\right]^{\mathrm{T}}$为格网中的TWS变化;$\boldsymbol{G}$为格林函数确定的设计矩阵;$\boldsymbol{\varepsilon}$为观测噪声。考虑到区域内的格网数量$m$通常远大于GNSS站点数量$n$,通过引入拉普拉斯算子约束来处理反演中的不适定问题。此时,未知质量荷载$\boldsymbol{x}$的正则化解可表示为:

$$\hat{\boldsymbol{x}}=\left(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}+\sigma^2\lambda\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}\right)^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{L}$是拉普拉斯算子构成的约束矩阵;σ是GNSS站点垂直位移的标准差;λ是平滑因子,用于平衡数据拟合部分($\left|(\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}-\boldsymbol{u})/\sigma\right|^2$)和解部分($\left|\boldsymbol{L}\boldsymbol{x}\right|^2$)。

2.2 去远场影响的GNSS反演方法

参考相关研究[13],定义川滇区域扩展2°为近场,扩展外区域为远场,以GLDAS或GRACE估计得到TWS变化作为全球水文负荷质量源,分别计算本场、近场、远场、总场TWS变化对研究区域内GNSS垂直位移的影响。并结合GNSS TWS变化反演理论,探讨远场水文负荷对反演结果的影响。具体步骤包括:

1)利用GLDAS或GRACE估计得到的TWS数据,根据负荷理论计算区域远场水文负荷变化引起的GNSS站点的垂直位移;

2)扣除区域GNSS位移数据中非潮汐大气负荷、非潮汐海洋负荷影响,同时将计算得出的远场水文位移进行改正,以消除远场水文信息对

GNSS数据的影响;

3)分别利用GNSS垂向位移进行区域TWS反演,并与GRACE和GLDAS等数据进行对比分析。本文实验中将TWS格网划分为0.25°×0.25°。

在与GRACE、GLDAS衍生的TWS等效水高(equivalent water height, EWH)序列进行对比分析中,将TWS时间分辨率统一处理为每月。采用差值均方根误差(difference root mean square, DRMS)来定量评估GNSS反演得到的区域TWS变化与GLDAS或GRACE等外部模型之间的一致性,计算式为:

$$E_{\mathrm{DRMS}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{\mathrm{inv}}(t_i)-X_{\mathrm{ref}}(t_i))^2}{n}} \tag{4}$$

式中,$X_{\mathrm{inv}}(t_i)$表示常规方法GNSS反演结果和顾及远场效应的TWS反演结果,下文简称为GNSS(F)结果;$X_{\mathrm{ref}}(t_i)$表示参考的GRACE或GLDAS数据;n为观测时段数。DRMS越小,表示两组时间序列越接近。

3　川滇地区TWS反演结果与分析

3.1　远场水文负荷位移计算与分析

3.1.1　远场负荷效应模拟

选取全球作为总场区域,10°W～10°E、10°S～10°N作为模拟本场区域,本场周边2°作为近场区域,近场外为远场区域。假设不同区域均匀分布200 mm等效水高的负荷情况下,根据式(1)计算本场、近场、远场和总场位移影响。实验结果如图1所示,其中红色区域为输入水文负荷区域,三角形为选取的中心点与对角点,用于展示位移影响。由图1可以看出,在模拟实验中,研究区域的中心点和对角点的垂直位移均约为14.1 mm,其中由本场水文负荷引起的中心点和对角点的垂直位移分别约为10.1 mm和6.1 mm,由近场引起的垂直位移分别约为1.0 mm和2.6 mm,远场影响则分别约为3.0 mm和5.4 mm。对于中心点和对角点的位移,远场质量负荷的影响贡献分别达到了21.3%和38.3%,远场负荷对边缘区域的影响大于近场区域。这表明在该模拟环境中,垂直位移主要是由研究区域本场的影响,但远场和近场导致的位移也不容忽视。

3.1.2　远场水文负荷位移估算

使用GLDAS数据评估远场水文负荷对川滇地区GNSS站点垂直位移的影响。以2013-01-01—2023-05-31的GLDAS数据作为全球水文信息的输入数据,川滇区域外扩展2°区域为近场,扩展区域(2°)外为远场。根据负荷理论,计算出川滇地区GNSS站点位置的位移形变。

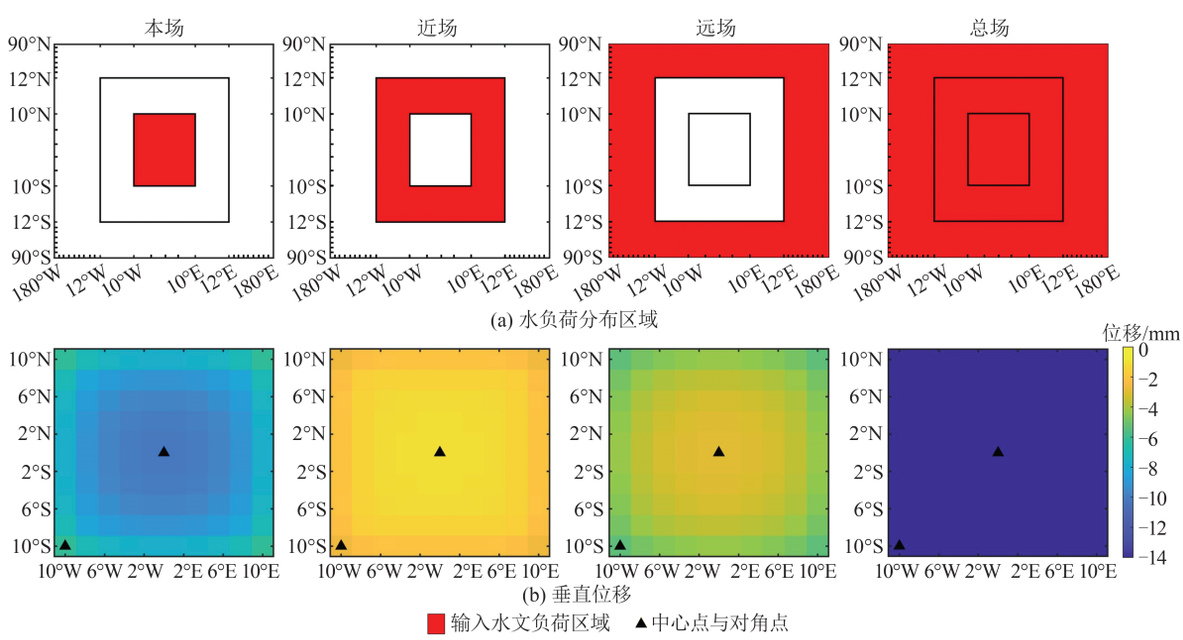


图1　模拟区域负荷分布及位移

Fig. 1　Loading Distribution and Displacements of Simulation Region

图2为利用GLDAS计算出的GNSS站点位置的本场、近场及远场位移影响季节性幅值结果。由图2可以看出,川滇本场水文负荷引起的站点位移振幅较为明显,周边2°区域近场引起的站点位移振幅较小,2°外远场累积造成的站点位移振幅大于近场位移。其中,本场引起的站

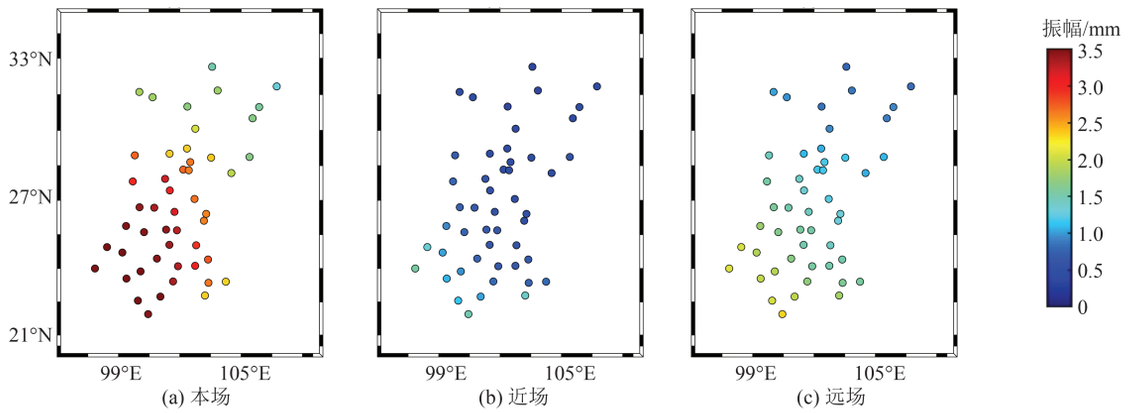


图2 本场、近场、远场负荷效应对GNSS站点垂直位移的影响振幅

Fig. 2 Amplitude of Local-, Near-, and Far-Field Loading Effects on Vertical Displacement of GNSS Sites

点振幅最高可达3.8 mm,近场和远场引起的振幅最大可分别达到1.6 mm和2.3 mm。三者振幅空间分布趋势相同,靠近川滇西南部的站点影响的振幅较大,向川滇东北部逐渐下降。

选取川滇地区最北部站点SCSP、中心站点SCYY和最南部站点YNMH进行分析,其位置如图3(a)所示。3个站点本场、近场、远场以及总场水文负荷导致的站点位移变化的时间序列分别如图3(b)~3(d)所示。结合图2和图3(a)可以看出,站点负荷位移主要由本场质量负荷变化引起,但远场和近场的影响也不可忽略,四者的空间分布趋势类似,均为南部大于北部。由图3(b)、3(c)、3(d)可以看出,3个站点的本场、近场、远场、总场的时间变化趋势相同,其中SCSP站点的本场、近场、远场、总场位移振幅分别为1.5 mm、0.3 mm、0.8 mm、2.7 mm,SCYY站点的位移振幅分别为3.0 mm、0.6 mm、1.3 mm、4.9 mm,YNMH站点的位移振幅分别为3.5 mm、1.5 mm、2.3 mm、7.1 mm。在区域站点位移的影响中,远场效应均大于所定义的2°近场,进一步说明了远场的影响是不可忽略的。

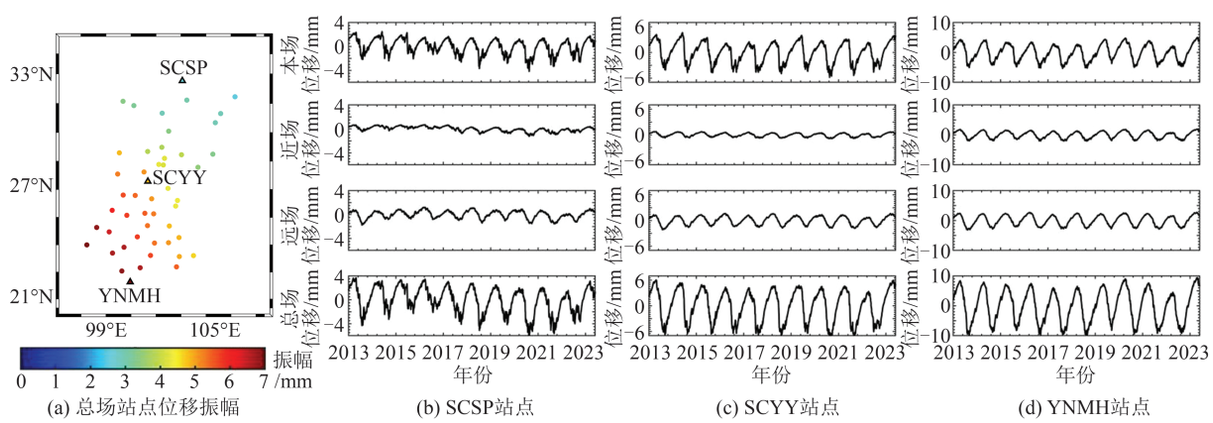


图3 总场位移振幅及3个代表站点的本场、近场、远场及总场位移序列

Fig. 3 Total-Field Displacements Amplitude and Local-, Near-, Far-, and Total-Field Displacements at Three GNSS Sites

3.1.3 TWS反演中远场效应影响模拟

利用GLDAS计算的位移数据进一步模拟反演[31-32],将GLDAS计算的川滇站点总场位移作为原始GNSS位移数据,并添加标准差为3 mm的随机噪声误差。分别在不扩展、2°扩展以及去远场效应3种情况下进行模拟反演,并将反演结果与输入数据GLDAS进行对比,结果见图4,其中EWH(equivalent water height)表示等效水高。从图4可以看出,在3种反演中,不进行边界扩展反演的结果与真实结果差异最大,扩展2°能在很大程度上提高反演结果的准确性的。模拟去远场反演的结果与输入的GLDAS最为接近,其相关性高达0.98。进一步定量计算了3种结果中的振幅、相位和趋势变化,结果见表1。从表1可以看出,去远场反演结果无论是在振幅、相位和趋势上都更加接近GLDAS数据。

3.2 顾及远场效应的川滇地区GNSS TWS反演

3.2.1 反演结果与时间序列对比

选取川滇地区进行实验,分别根据GLDAS和GRACE数据计算区域外远场水文效应引起的位移,并利用实验区域GNSS站点的垂直位移

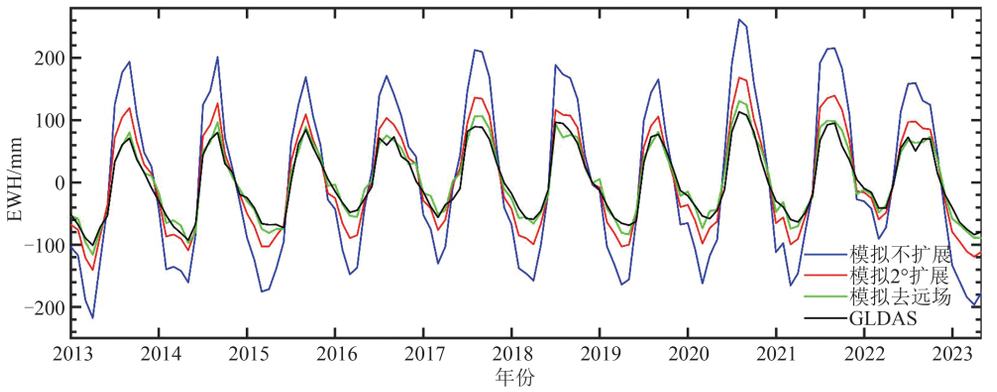


图 4　川滇地区 TWS 模拟反演时间序列

Fig. 4　Simulated TWS Inversion Time Series in the Sichuan-Yunnan Region

表 1　模拟时间序列振幅、相位、趋势统计

Table 1　Amplitude, Phase, and Trend of Simulated Time Series

数据类型	振幅/mm	相位/月	趋势/(mm·a^{-1})
模拟不扩展	167.02	8.11	3.08
模拟 2°扩展	104.31	8.04	2.31
模拟去远场	76.17	7.91	2.28
GLDAS	71.73	7.91	2.25

序列扣除远场位移影响后进行水储量反演,得到 EWH 变化来表示 TWS 变化,下文分别简称为 GNSS(F-GL)、GNSS(F-GR)结果。同时采用不进行远场水文负荷改正,仅采用 2°空间扩展的 GNSS 反演结果进行对比。图 5 为不同方法得到的川滇地区 TWS 平均时间序列变化图。由图 5 可见,3 种 GNSS 反演结果与 GRACE 和 GLDAS 有着良好的一致性。

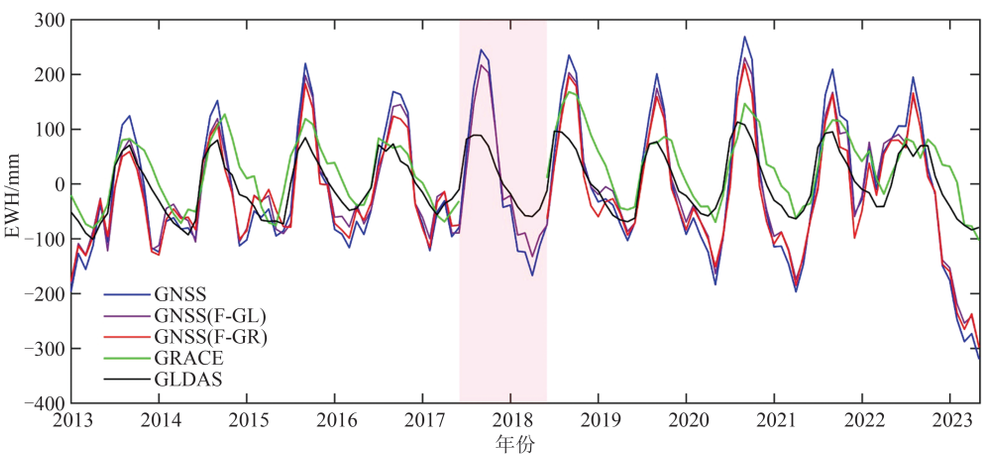


图 5　川滇地区 TWS 平均时间序列

Fig. 5　Average Time Series of TWS in the Sichuan-Yunnan Region

考虑 GRACE 的数据缺失,对不同时段结果进行了振幅、相位统计,结果见表 2。由表 2 可以看出,3 种 GNSS 反演结果中相位变化不明显,但估计远场效应后,振幅有了明显的降低。经过远场效应改正后,整个实验时间段内两种 GNSS(F)反演的 TWS 平均振幅由 141.01 mm 下降为 111.43 mm 和 105.21 mm,分别减小 21.0% 和 25.4%,两种 GNSS(F)的反演结果更加趋近 GRACE 与 GLDAS 数据。

3.2.2　反演结果的振幅与相位空间分布

图 6 展示了不同方法中 TWS 变化的振幅与相位的空间分布图。由图 6 可以看出,3 种 GNSS 反演的结果有着相同的空间分布,即由西南向东北逐渐减小,且两种 GNSS(F)结果在幅值上有着明显的降低,其中 GNSS(F-GR)降低更明显,这可能与 GLDAS 产品未包含完整 TWS 变化信息有关。川滇西南区域 TWS 反演结果幅值差异最为显著,推测是该区域更接近于印度季风影响区域,其远场区域有着更显著的水文变化。此外,利用 GNSS 反演所得的 TWS 空间上振幅大于 GLDAS 与 GRACE 结果,且揭示的空间信息更丰富。3 种 GNSS 反演中相位结果变化趋势一致,仅在川滇东北部地区部分格网中有所变化,但该区域本身 TWS 变化并不显著。

表2 不同TWS时间序列结果数据统计

Table 2 Data Statistics of Different TWS Time Series

数据	时间范围	振幅/mm	相位/月
GNSS	2013-01—2023-05	141.01	7.96
	2013-01—2017-06	115.95	7.99
	2018-06—2023-05	149.11	7.95
GNSS(F-GL)	2013-01—2023-05	111.43	7.84
	2013-01—2017-06	86.41	7.84
	2018-06—2023-05	119.75	7.84
GNSS(F-GR)	2013-01—2023-05	105.21	8.07
	2013-01—2017-06	82.87	8.12
	2018-06—2023-05	120.68	8.02
GLDAS	2013-01—2023-05	71.73	7.91
	2013-01—2017-06	67.44	7.71
	2018-06—2023.05	74.03	8.03
GRACE	2013-01—2023-05	79.79	7.22
	2013-01—2017-06	78.64	7.29
	2018-06—2023-05	78.35	7.12

为了定量评估远场效应在空间尺度上的影响,本文将图6中各格网的GNSS反演结果分别与GRACE、GLDAS的振幅作差,差值分布如图7所示。由图7可以看出,GNSS方案的振幅残差普遍高于GNSS(F-GL)和GNSS(F-GR)结果,表明顾及远场效应后,GNSS反演结果有显著改善。此外,研究区域绝大部分的格网振幅都有不同程度改善,在西南部最为明显,与§3.1中远场位移影响的空间分布特征吻合。

3.2.3 反演结果序列DRMS分析

为进一步量化数据间的一致性,计算了3种GNSS反演结果与GRACE和GLDAS格网TWS序列的DRMS,结果如图8所示。从图8可以看出,3种GNSS结果与GRACE和GLDAS的DRMS在空间分布上具有高度相似性,均呈现出在西南边缘高、东北部低的特征。

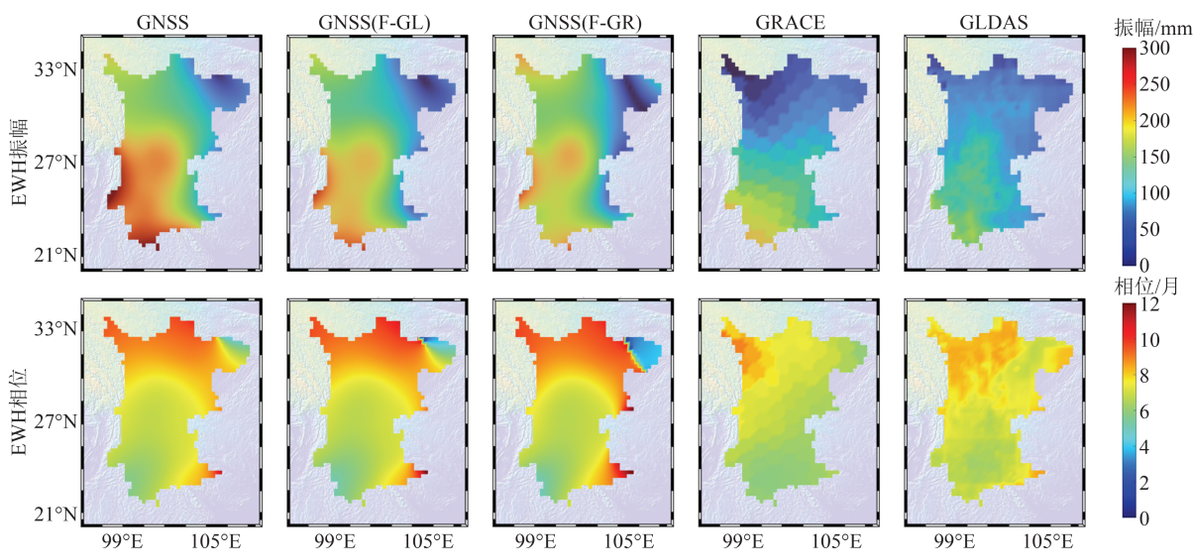


图6 5种方法TWS结果的振幅与相位

Fig. 6 Amplitude and Phase of Five TWS Results

表3为不同方法格网TWS序列间的DRMS数值统计。从统计结果看,相比于GLDAS,3种GNSS反演结果与GRACE之间的DRMS更小,表明GNSS反演结果与GRACE的结果更接近,这可能归因于GLDAS模型中地下水等分量的缺失。图8和表3都显示,经过远场效应改正的两种GNSS反演结果整体上更趋近于GRACE与GLDAS,其中GNSS(F-GL)与二者DRMS的结果更优。统计显示,与GRACE相比,GNSS(F-GL)和GNSS(F-GR)分别有90.5%和61.4%的格网TWS序列DRMS值有所减小,平均降幅分别为8.6%与2.1%;对比GLDAS数据,两种方案的格网改善率分别达到100%和77.5%,平均改善7.1%和5.7%。

4 结 语

本文利用川滇地区49个GNSS基准站观测数据,结合GLDAS和GRACE数据,定量分析了远场水文负荷对区域GNSS位移的影响,并系统评估了顾及远场改正后的TWS反演效果。主要结论如下:

1)在川滇地区,GNSS测站垂向位移受区域(2°范围)外远场水文负荷的影响显著,其贡献量最高可达约2.3 mm。这表明传统的仅扩展边界而忽略远场负荷的做法会引入系统性偏差。

2)模拟实验结果显示,顾及远场效应后的反

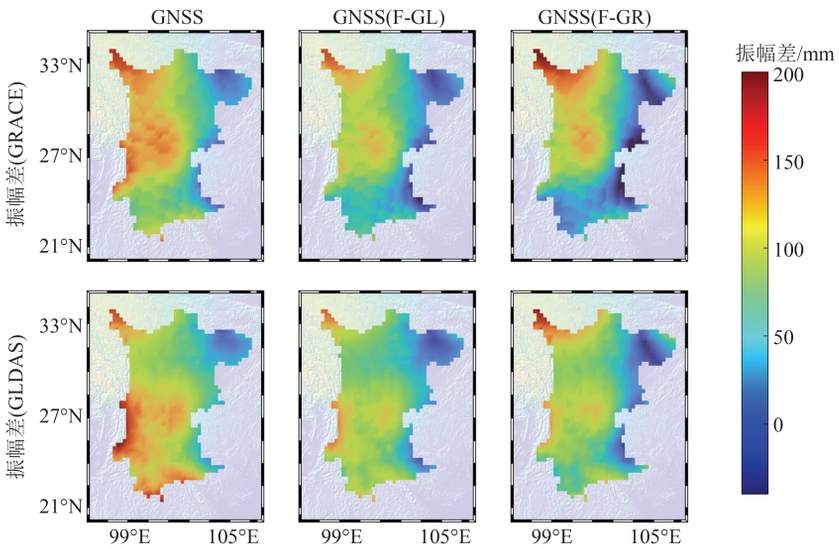


图7　GNSS反演TWS与GRACE和GLDAS振幅差值结果

Fig. 7　Amplitude Differences Between GNSS Inversion TWS and GRACE and that Between TWS and GLDAS

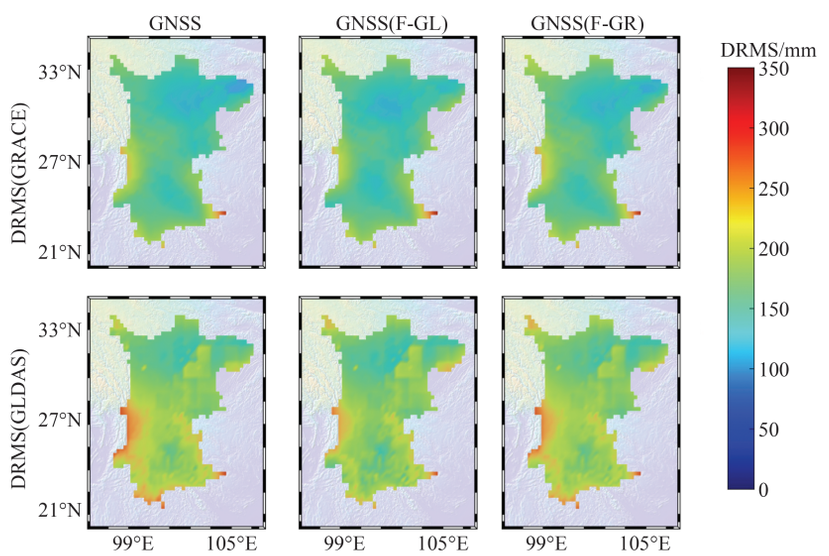


图8　3种GNSS与GRACE、GLDAS间格网TWS时间序列DRMS分布图

Fig. 8　DRMS Distribution of Grid TWS Time Series Between Three GNSS Results and GRACE and GLDAS

表3　格网时间序列DRMS/mm

Table 3　DRMS of Grid Time Series/mm

方法	GRACE			GLDAS		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
GNSS	317.89	68.37	136.08	310.98	106.77	173.71
GNSS(F-GL)	320.62	69.70	124.33	310.80	94.93	161.31
GNSS(F-GR)	333.33	90.26	133.25	299.34	101.67	163.81

演结果与真实值(GLDAS输入)的相关性高达0.98,在振幅、相位和趋势上均表现出更高的一致性。在实测数据反演中,经过远场改正后的TWS平均振幅分别减小21.0%(GNSS(F-GL))和25.4%(GNSS(F-GR)),消除了因空间尺度失配导致的振幅高估现象,使反演结果更趋近于GRACE与GLDAS的独立观测结果。

3)空间分布分析表明,顾及远场效应后,区域格网内各TWS序列与GRACE和GLDAS对应序列的相关性进一步提高。两种GNSS(F)反演结果中绝大部分格网的反演结果与GRACE、GLDAS的DRMS显著降低。

综上,在川滇地区利用GNSS进行TWS反演,须通过全球水文模型或卫星重力数据预先改

正远场负荷效应,以保证反演结果的准确性。

参 考 文 献

[1] RODELL M, FAMIGLIETTI J S, WIESE D N, et al. Emerging Trends in Global Freshwater Availability [J]. *Nature*, 2018, 557(7707): 651-659.

[2] 熊景华,郭生练,王俊,等. 长江流域陆地水储量变化及归因研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(12): 2241-2248.
XIONG Jinghua, GUO Shenglian, WANG Jun, et al. Variation and Attribution of Terrestrial Water Storage in the Yangtze River Basin[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(12): 2241-2248.

[3] 成思雨,吴云龙,刘素兰,等. 融合注意力机制的水储量异常重构与干旱识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(7): 1382-1392.
CHENG Siyu, WU Yunlong, LIU Sulan, et al. Reconstruction of Water Storage Anomalies and Drought Identification Using Integrated Attention Mechanism[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(7): 1382-1392.

[4] 李霞,高艳红,王婉昭,等. 黄河源区气候变化与GLDAS数据适用性评估[J]. 地球科学进展, 2014, 29(4): 531-540.
LI Xia, GAO Yanhong, WANG Wanzhao, et al. Climate Change and Applicability of GLDAS in the Headwater of the Yellow River Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(4): 531-540.

[5] 刘任莉,余敦先,李敏,等. 利用卫星观测数据评估GLDAS与WGHM水文模型的适用性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(11): 1596-1604.
LIU Renli, SHE Dunxian, LI Min, et al. Using Satellite Observations to Assess Applicability of GLDAS and WGHM Hydrological Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(11): 1596-1604.

[6] 瞿伟,陈沛男,张普方,等. GRACE/GRACE-FO揭示黄河上游2002—2022年GWS及可持续性时空演化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1287-1299.
QU Wei, CHEN Peinan, ZHANG Pufang, et al. Spatiotemporal Changes of GWS Changes and Their Sustainability in the Upper Reaches of the Yellow River Basin from 2002 to 2022 Revealed by GRACE/GRACE-FO Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1287-1299.

[7] 禤键豪,张兴福,陈秋杰. GRACE/GRACE-FO重力卫星揭示近20年河西走廊陆地水储量时空变化[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(1): 100-110.
XUAN Jianhao, ZHANG Xingfu, CHEN Qiujie. Spatiotemporal Terrestrial Water Storage Changes in the Hexi Corridor Derived by GRACE/GRACE-FO Gravity Satellites over the Past 20 Years[J]. *Progress in Geophysics*, 2024, 39(1): 100-110.

[8] 张仕泽,王正涛,许婷. 利用LSTM重构与预报珠江流域长时序陆地水储量变化[J]. 测绘地理信息, 2025, 50(6): 113-119.
ZHANG Shize, WANG Zhengtao, XU Ting. Reconstruction and Prediction of Long Term Terrestrial Water Storage Change in the Pearl River Using LSTM Network[J]. *Journal of Geomatics*, 2025, 50(6): 113-119.

[9] 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.

[10] WU X P, HEFLIN M B, IVINS E R, et al. Large-Scale Global Surface Mass Variations Inferred from GPS Measurements of Load-Induced Deformation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 2003GL017546.

[11] SHEN Y C, YAN H M, PENG P, et al. Boundary-Included Enhanced Water Storage Changes Inferred by GPS in the Pacific Rim of the Western United States[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2429.

[12] ZHANG B, YAO Y B, FOK H S, et al. Potential Seasonal Terrestrial Water Storage Monitoring from GPS Vertical Displacements: A Case Study in the Lower Three-Rivers Headwater Region, China[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1526.

[13] ZHU H, CHEN K J, HU S Q, et al. Characterizing Hydrological Droughts Within Three Watersheds in Yunnan, China from GNSS-Inferred Terrestrial Water Storage Changes Constrained by GRACE Data [J]. *Geophysical Journal International*, 2023, 235(2): 1581-1599.

[14] 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.

[15] 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), 2025, DOI:10.13203/j.whugis20250142.
LU Tieding, YANG Houming, ZHANG Yuan, et al. The Spatiotemporal Distribution Characteristics of Terrestrial Water Storage Changes in Yunnan Region Using GNSS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, DOI:10.13203/j.whugis20250142.

[16] 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.

[17] LI X P, ZHONG B, CHEN J L, et al. Investigation of 2020—2022 Extreme Floods and Droughts in Sichuan Province of China Based on Joint Inversion of GNSS and GRACE/GFO Data[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130868.

[18] LI X P, ZHONG B, LI J C, et al. Analysis of Terrestrial Water Storage Changes in the Shaan-Gan-Ning Region Using GPS and GRACE/GFO[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2022, 13(2): 179-188.

[19] ZHONG B, TAN J T, LI Q, et al. Simulation Analysis of Regional Surface Mass Anomalies Inversion Based on Different Types of Constraints[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2021, 12(4): 298-307.

[20] LIU B, SHAN C H, RAO W L, et al. A GNSS Terrestrial Water Storage Inversion Method Based on GRACE Spatial Constraints[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 16487-16496.

[21] JIANG Z S, HSU Y J, YUAN L G, et al. Characterizing Spatiotemporal Patterns of Terrestrial Water Storage Variations Using GNSS Vertical Data in Sichuan, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(12): e2021JB022398.

[22] LIU B, YU W K, DAI W J, et al. Estimation of Terrestrial Water Storage Variations in Sichuan-Yunnan Region from GPS Observations Using Independent Component Analysis[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 282.

[23] ZHU H, CHEN K J, HU S Q, et al. Using the Global Navigation Satellite System and Precipitation Data to Establish the Propagation Characteristics of Meteorological and Hydrological Drought in Yunnan, China[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(4): e2022WR033126.

[24] BEVIS M, ALSDORF D, KENDRICK E, et al. Seasonal Fluctuations in the Mass of the Amazon River System and Earth's Elastic Response[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(16): 2005GL023491.

[25] FU Y N, ARGUS D F, LANDERER F W. GPS as an Independent Measurement to Estimate Terrestrial Water Storage Variations in Washington and Oregon[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(1): 552-566.

[26] VAN DAM T M, WAHR J M. Displacements of the Earth's Surface Due to Atmospheric Loading: Effects on Gravity and Baseline Measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1987, 92(B2): 1281-1286.

[27] GLADKIKH V, TENZER R, DENYS P. Crustal Deformation Due to Atmospheric Pressure Loading in New Zealand[J]. *Journal of Geodetic Science*, 2011, 1(3): 271-279.

[28] JIANG W P, YUAN P, CHEN H, et al. Annual Variations of Monsoon and Drought Detected by GPS: A Case Study in Yunnan, China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 5874.

[29] LOOMIS B D, RACHLIN K E, WIESE D N, et al. Replacing GRACE/GRACE-FO C30 with Satellite Laser Ranging: Impacts on Antarctic Ice Sheet Mass Change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(3): e2019GL085488.

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

[31] 李贤炮, 钟波, 刘滔. GNSS垂直位移反演区域地表质量变化的模拟分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 45-54.
LI Xianpao, ZHONG Bo, LIU Tao. Simulation Analysis of Inverting Regional Surface Mass Variations Using GNSS Vertical Displacement[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 45-54.

[32] 钟波, 李贤炮, 李建成, 等. 利用GPS垂直位移反演区域陆地水储量变化的TSVD-Tikhonov正则化方法[J]. 地球物理学报, 2023, 66(3): 997-1014.
ZHONG Bo, LI Xianpao, LI Jiancheng, et al. Inversion of Regional Terrestrial Water Storage Changes Using GPS Vertical Displacements Based on TSVD-Tikhonov Regularization Method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(3): 997-1014.