



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 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  
作者： 刘斌，周灿，饶维龙，冯腾飞，陈津津  
DOI： 10.13203/j.whugis20240371  
收稿日期： 2025-02-20  
网络首发日期： 2025-03-13  
引用格式： 刘斌，周灿，饶维龙，冯腾飞，陈津津. 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/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240371>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240371

引用格式:

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), 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240371 (LIU Bin, ZHOU Can, RAO Weilong, et al. Inversion of Regional Terrestrial Water Storage Using GNSS Observations Considering the Impact of Far-Field Hydrological Loading: A Case Study in the Sichuan-Yunnan Region[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 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<sup>1,2</sup> 周灿<sup>1,2</sup> 饶维龙<sup>1,2\*</sup> 冯腾飞<sup>1,2</sup> 陈津津<sup>3</sup>

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

2 长沙理工大学交通运输工程学院, 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。利用完整(全波段)的 GNSS 位移信息来约束反演区域的陆地水储量变化, 二者频谱信息并不完全对应。以川滇地区为例, 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)数据计算了川滇地区 GNSS 站点中水文负荷位移, 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 2mm; 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 19.1%和 25.4%, 都更加趋近 GLDAS 与 GRACE 结果; 同时, 两种反演格网内等效水高序列与 GRACE 和 GLDAS 中序列的有着更高的相关性, 与二者结果的差值均方根值(Difference Root Mean Square, DRMS)都有不同程度减小。

**关键词:** GNSS 位移; 陆地水储量; 水文负荷; 远场影响

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

LIU Bin<sup>1,2</sup>, ZHOU Can<sup>1,2</sup>, RAO Weilong<sup>1,2\*</sup>, FENG Tengfei<sup>1,2</sup>, CHEN Jinjin<sup>3</sup>

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 Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

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

收稿日期: 2025-02-20

项目来源: 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(22B0346, 22C0154); 湖南省自然科学基金(2022JJ90009, 2023JJ40022); 长沙理工大学公路地质灾害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, 特聘副教授, 主要从事卫星大地测量学研究。binliu@csust.edu.cn

通讯作者: 饶维龙, 博士, 讲师。raoweilong@csust.edu.cn

**Abstract: Objectives:** In the inversion of regional terrestrial water storage (TWS) using Global Navigation Satellite System (GNSS) data, it is common to expand the study area's boundaries to account for hydrological loading variations. However, effects of far-field hydrological loading on GNSS stations are often overlooked. When using full-range GNSS displacement data to constrain the TWS within the inversion region, the displacement information of the two does not completely correspond. **Methods:** We propose a GNSS regional TWS inversion method that considers far-field hydrological loading effects, focusing on the Sichuan-Yunnan region. Using Global Land Data Assimilation System (GLDAS) and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data from January 2013 to May 2023, we calculate the displacements at GNSS stations in Sichuan-Yunnan due to hydrological loading from local, near, and far fields. Far-field displacement information is subtracted from the total GNSS displacements to refine the regional TWS inversion. **Results:** (1) 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. (2) Simulations using GLDAS-calculated site displacement show that de-remote field inversion results correlate most closely with GLDAS hydrologic loading scenarios, achieving a correlation of 0.98. (3) Extended inversion using GNSS data, after removing the far-field effect, shows that the average amplitude of TWS inversion results (GNSS(F\_GL) and GNSS(F\_GR)) is reduced by 19.1% and 25.4%, respectively. (4) The grid equivalent water height series in the two inversion 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 can not be ignored, and the far-field effect need 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) 是指地球表面各种水体的总储量, 包括地下水、地表水、土壤水、树冠水、积雪等成分<sup>[1,2]</sup>。准确估计 TWS 变化有利于分析水文事件和监测极端气候, 对人类社会的可持续发展有着至关重要的作用<sup>[3,4]</sup>。目前研究大尺度范围内的 TWS 变化主要有水文模型和卫星数据反演等方法。如常见的水文模型 GLDAS (Global Land Data Assimilation System), 被广泛应用于估计全球或主要区域的 TWS 时空变化监测中, 但水文模型通常存在部分陆地水文成分模拟的缺失<sup>[5,6]</sup>。另外卫星数据 TWS 反演主要有 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 与 GNSS (Global Navigation Satellite System)。GRACE 卫星也广泛应用大尺度的 TWS 变化监测中<sup>[7,8]</sup>, 但存在着时间分辨率 (月) 和空间分辨率 (300km~500km) 较低的不足, 且数据处理与应用中存在信号截断与泄露误差, 在小区域内的水储量反演中敏感性不强。此外, 部分月份重力场模型缺失及其与继任计划 GRACE Follow-on 间数据的空白, 也对 GRACE 应用具有一定影响<sup>[9]</sup>。

GNSS 可以有效监测水文负荷变化引起的地表垂直位移形变, 结合负荷变形理论可以有效反演出区域的 TWS 变化。在 GNSS 站点密集布设区域, 能有效弥补其它 TWS 监测方法的部分不足<sup>[10-13]</sup>, 在不同区域水文气象事件的监测中有着较广泛的应用<sup>[14-17]</sup>。当前 GNSS 进行 TWS 反演通常是针对反演模型的改进<sup>[18]</sup>, 如 Li 等<sup>[19-21]</sup>通过构建不同的拉普拉斯矩阵和引入不同的正则化约束提高反演的可靠性; 杨兴海等<sup>[22]</sup>和 Liu<sup>[23]</sup>等针对 GRACE 与 GNSS 数据进行联合反演模型的构建; Shen 等<sup>[14]</sup>提出边界包含约束的反演模型提高了边界区域反演精度等。此外针对 GNSS 数据精细化处理也有许多学者做了相关研究, 如利用主成分分析法和独立成分分析法等方法提取 GNSS 位移时间序列中水文负荷信号等<sup>[24-26]</sup>。这些研究均在一定程度上提升了 GNSS 进行区域 TWS 反演的准确性。

有些研究表明地表负荷位移的影响范围为 50-100km<sup>[27]</sup>, 因此目前的 GNSS 反演研究中普遍认为 GNSS 垂向坐标序列中的水文信息是由研究区域与有限的近场区域 TWS 变化引起<sup>[28, 29]</sup>。在利用垂向 GNSS 坐标序列进行区域 TWS 反演中通常只考虑邻近区域的水负荷对研究区域本身的垂直位移影响, 如, 何思源等<sup>[16]</sup>利用 GPS 反演云南地区 TWS 选取 2°作为扩展边界, Fu 等<sup>[30]</sup>利用 GPS 估算华盛顿和俄勒冈州的 TWS 选取扩展 2.5°等, 而忽略了临近区域外的远场区域的 TWS 变化引起的负荷位移。在研究大气负荷变化引起的地表垂直位移的研究中, Van Dam 等<sup>[31]</sup>利用全球气压数据计算的研究站点垂直位移达 13mm, 距离研究点 100km 计算的结果约为 5mm, 距离 1000km 的计算结果最为接近整体位移; Vladislav 等<sup>[32]</sup>在研究新西兰大气负荷引起的地表位移中同样验证了相关结论。这些研究

表明，地表某点的负荷位移受远场负荷变化影响同样是不可忽略的。基于此，提出了一种顾及远场影响的 GNSS 水储量反演方法，并以川滇地区为例，通过 GLDAS 和 GRACE 数据计算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的 GNSS 反演川滇地区 TWS 变化结果。

## 1 研究区域和数据集合

### 1.1 研究区域

川滇地区位于中国西南，具有丰富的地理和气候多样性。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。同时，川滇地区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<sup>[33]</sup>。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 观测资料为区域的水储量动态反演研究提供了重要基础。

### 1.2 数据来源

GNSS 数据：选取了位于川滇及周边的中国地壳运动观测网络 49 个 GNSS 基准站数据进行 TWS 反演研究，站点信息如图 1。GNSS 坐标时间序列由中国地震局提供 (ftp://ftp.cgns.ac.cn/)，其由 Bernese 5.0 软件通过双差分方法对 GNSS 数据进行均匀分析，得到单日解。数据处理过程中采用 IGS 精密轨道、地球定向参数、绝对天线相位中心以及 FES2004 海潮模型。此外，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，使用 PCA 迭代插值方法对时间序列缺失值进行补充。为了得到 GNSS 坐标序列中的水文负荷位移，还利用德国国家地理研究中心(GeoForschungsZentrum, GFZ)提供的非潮汐大气负荷和非潮汐海洋负荷位移产品(采样间隔为 3h，空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ )对 GNSS 时间序列中进行改正，最后得到用于反演的 GNSS 坐标时间序列数据。

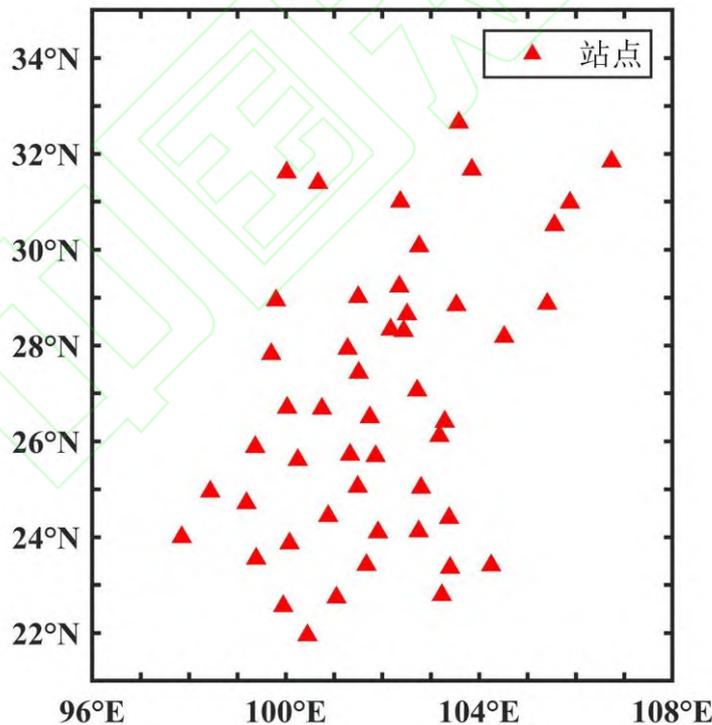


图 1 研究区域 GNSS 站点分布

Fig. 1 Distribution of GNSS sites in the study area

GRACE/GRACE-FO 数据：使用德克萨斯大学奥斯汀分校空间研究中心(University of Texas Austin Center for Space Research, CSR)提供的每月 GRACE 和 GRACE-FO Level-2 RL06 Mascon 产品。CSR 的处理方法扣除非潮汐大气、非潮汐高频海洋信号、海潮、固体潮等影响<sup>[34]</sup>。时间跨度为 2013 年 1 月—2023 年 5 月共计 125 月，由卫星维护、测量误差等原因缺失部分月份数据采用三次样条插值补齐，GRACE 与 GRACE-FO 中间存在 11 月空白<sup>[35]</sup>，最

终时长 114 月。

GLDAS 数据：GLDAS 数据来自美国国家航空航天局 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)、戈达德太空飞行中心、美国国家海洋和大气管理局和国家环境预测中心，包含多组地表水数据集<sup>[36]</sup>。GLDAS 包含 Noah、CLSM、CLM、VIC 四个陆地表面模型<sup>[37, 38]</sup>，文中采用 GLDAS Noah 空间分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ 、时间分辨率 3h 产品中 2013 年 1 月 1 日-2023 年 5 月 31 日地表以下 2m 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陆地水储量变化。在实验中将数据时间分辨率平均到每日来进行远场负荷位移的计算。时间分辨率月、空间分辨率  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  产品用于和 GNSS 水储量反演结果和 GRACE 产品的对比分析<sup>[39]</sup>。

## 2 实验方法

### 2.1 质量负荷反演理论

地表水文质量变化引起的地壳负荷变形可以根据地球弹性形变理论计算得到。同样，区域水储量变化也可由地表变形观测结果与负荷理论反演出。当前常用的水储量变化反演与负荷变形研究方法有格林函数方法和 Slepian 基函数方法<sup>[40, 41]</sup>，本文采用格林函数法进行负荷位移的计算与 TWS 的反演<sup>[42, 43]</sup>，由质量荷载引起的弹性形变计算公式如下：

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

其中  $u(\theta)$  是至圆盘中心的角距  $\theta$  的点荷载引起的形变， $\Delta M$  是地表质量荷载， $R$  是地球半径， $M_e$  是地球质量，

$h_n$  和  $P_n$  分别是垂直形变 Love 数和勒让德多项式。式(1)可简化成  $u(\theta) = G(\theta) \cdot x$ ， $G(\theta)$  是角距离为  $\theta$  的格林函数矩阵， $x$  是地表的质量荷载。

### 2.2 去远场影响的 GNSS 反演方法

实验中以川滇地区为研究区域，探讨 GNSS 反演中的远场水文负荷效应。参考前人相关研究<sup>[16, 44]</sup>，选取研究区域扩展  $2^\circ$  为近场，扩展外区域为远场，以 GLDAS 或 GRACE(FO)估计得到 TWS 变化作为全球水文负荷质量源，分别计算本、近、远、总场水储量变化对川滇地区 GNSS 垂直位移的影响，并以 GNSS 坐标时间序列为基础，去除非潮汐大气负荷、非潮汐海洋负荷、远场水文负荷引起的位移信息，获取其中去除远场影响的水文负荷信息，结合区域负荷格林函数，反演区域 TWS 变化。具体包括以下三步，实验流程如图 2。

(1) 利用 GLDAS 或 GRACE(FO)估计得到的 TWS 数据，根据式(1)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，即：

$$u = GNSS - NTAL - NTOL - u_{FarField} \quad (2)$$

其中  $u$  是处理后 GNSS 站点垂直位移时间序列，GNSS 是原始站点时间序列， $NTAL$  是非潮汐大气负荷数据， $NTOL$  是非潮汐海洋负荷数据，文中  $NTAL$  与  $NTOL$  由德国国家地理研究中心(GeoForschungsZentrum, GFZ)提供、 $u_{FarField}$  为计算得到的远场水文负荷影响。

(3) 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。反演中 TWS 网格划分为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，反演模型中添加正则化约束：

$$\begin{cases} A \cdot x = u \\ L \cdot x = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $A$  是格林函数矩阵， $x$  是格网待求质量荷载， $u$  是每个 GNSS 站点的垂直位移， $L$  是拉普拉斯算子构成的约束矩阵，方程中的待求质量荷载  $x$  的正则化解可以由下式表示<sup>[45]</sup>：

$$\hat{x} = (A^T A + \sigma^2 \lambda L^T L)^{-1} A^T u \quad (4)$$

其中  $\lambda$  是平滑因子，本文中  $\lambda$  由 L 曲线方法确定， $\sigma$  是 GNSS 站点垂直位移标准差。

在得到去除远场影响的 TWS 反演结果后，与 GRACE(FO)、GLDAS 结果的等效水高序列进行对比分析，将 TWS 时间分辨率统一处理为月。采用差值均方根误差（Difference Root Mean Square, DRMS）来对比两种结果序列间的一致性：

$$DRMS = RMS(TWS_{GNSS\&GNSS(F)} - TWS_{GRACE\&GLDAS}) \quad (5)$$

式中  $TWS_{GNSS\&GNSS(F)}$  表示传统方法 GNSS 反演结果和顾及远场效应的 TWS 反演结果（GNSS(F)），

$TWS_{GRACE\&GLDAS}$  表示 GRACE&GLDAS 数据，DRMS 越小表示两组时间序列越接近。

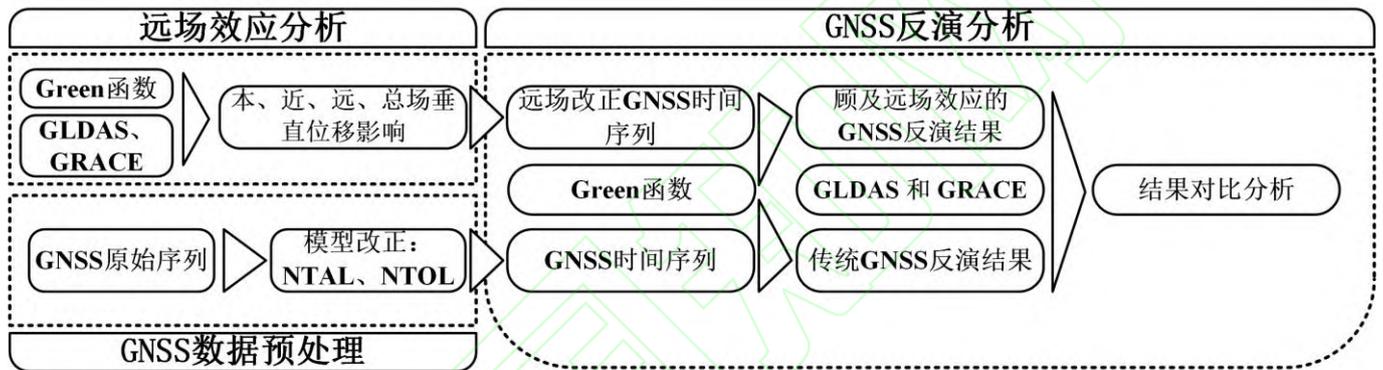


图 2 实验流程

Fig. 2 Experimental process

### 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

为区分本场、近场和远场水文负荷对研究区域垂直位移影响的贡献，本节进行模拟实验。选取全球作为总场区域， $10^{\circ}W-10^{\circ}E$ 、 $10^{\circ}S-10^{\circ}N$  作为模拟本场区域，本场周边  $2^{\circ}$  作为近场区域，近场外为远场区域。假设不同区域均匀分布 200mm 等效水高的负荷情况下，根据公式（1）计算本场、近场、远场和总场位移影响，探讨不同范围内负荷对本场产生的负荷位移。实验结果如图 3 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展示位移影响。由图 3（d）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 14.1mm，其中由本场导致的中心点和对角点的垂直位移分别约为 10.1mm 和 6.1mm，由近场导致的约为 1.0mm 和 2.6mm，由远场导致的为 3.0mm 和 5.4mm。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的影响，但远场和近场导致的位移也不容忽视。

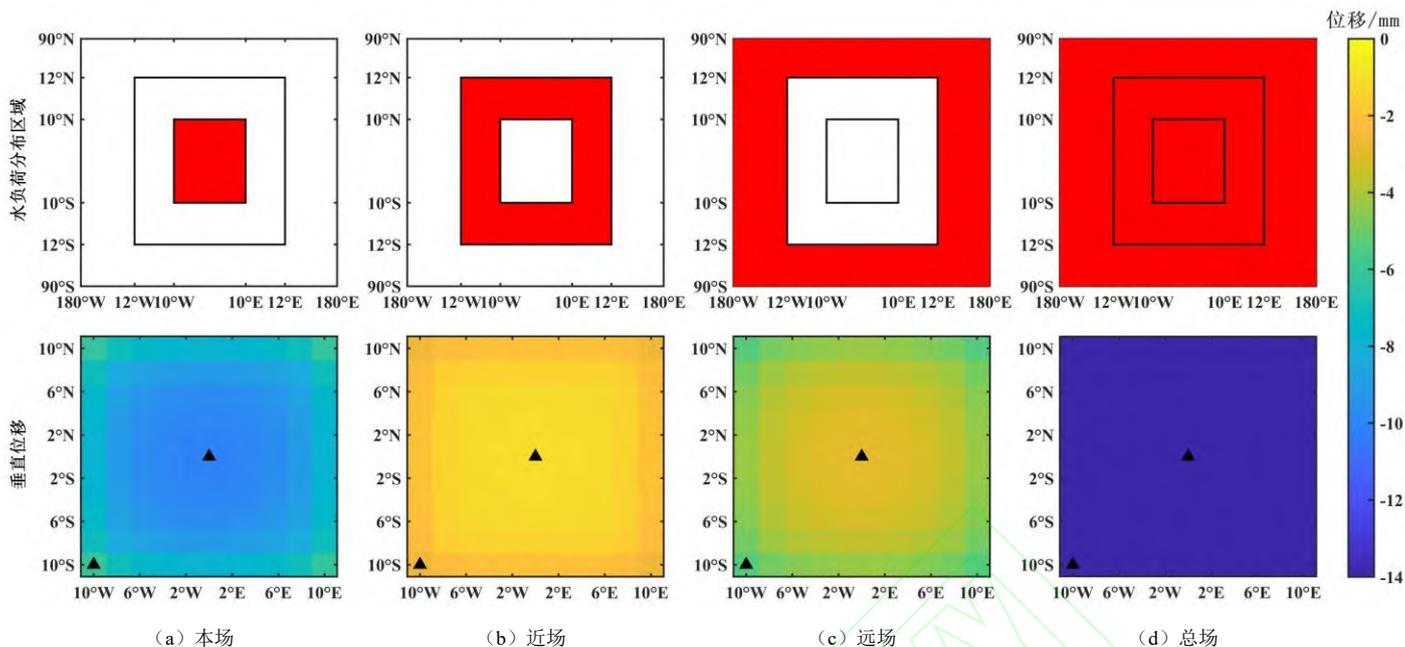


图3 模拟区域负荷分布及位移

Fig. 3 Simulation of regional loading distribution and displacements

### 3.1.2 远场水文负荷位移估算

进一步，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 年 1 月 1 日至 2023 年 5 月 31 日的 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 4 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，本场引起的站点振幅最高可到 3.8mm，近场和远场引起的振幅最大可分别达到 1.6mm 和 2.3mm。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。

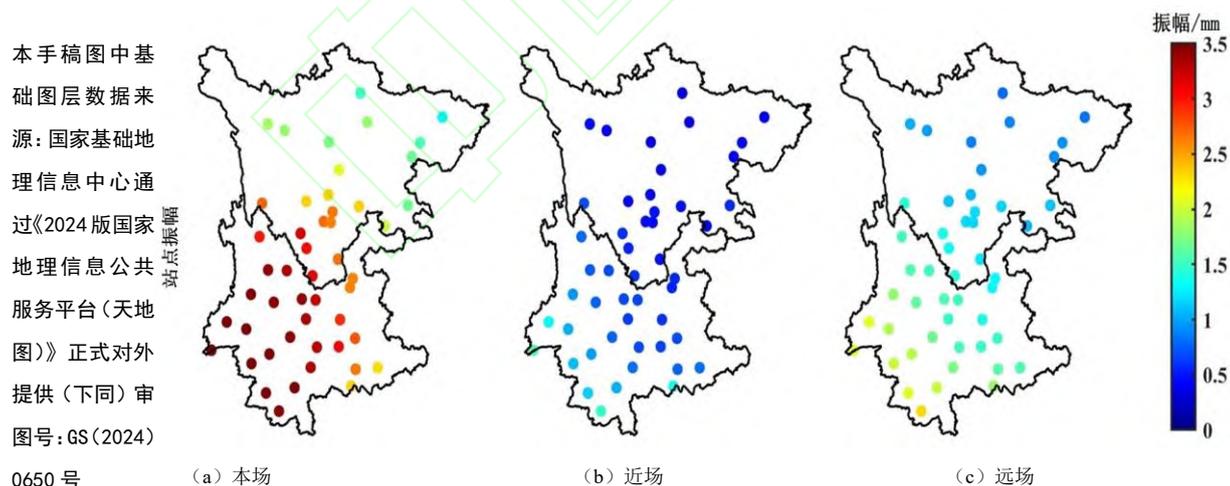


图4 本场、近场、远场负荷效应对 GNSS 站点垂直位移影响振幅

Fig. 4 Amplitude of local, near, and far-field loading effects on the vertical displacement of GNSS sites

图 5 (a) 为 GLDAS 总场水文负荷对川滇区域内站点位移影响的振幅图，选取了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，其位置在图 5 (a) 三角形示意。图 5 (b) 为三个站点本场、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图。结合图 4、图 5 (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 5 (b)

可以看出，三个站点的本、近、远、总场的时间变化趋势相同，其中 SCSP 站点本、近、远、总场位移分别达 4.2mm、1.2mm、1.7mm、6.8mm，SCYY 分别为 5.8mm、0.9mm、2.1mm、8.1mm，YNMH 分别为 5.3mm、2.0mm、3.1mm、10.0mm，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，进一步说明远场影响的影响是不可忽略的。

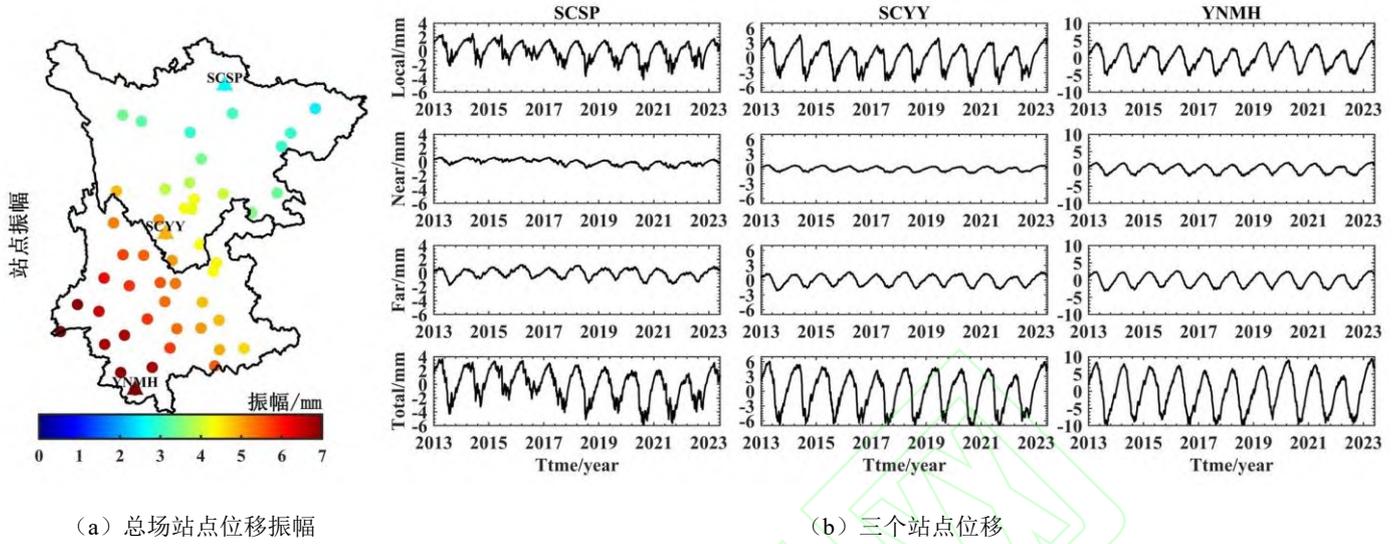


图 5 总场位移振幅及代表站点本场、近场、远场、总位移情况

Fig. 5 Total-field displacements amplitude and the local, near, far, and total field displacements at the representative 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，利用完整的 GLDAS 信息正演计算的川滇站点的位移作为原始 GNSS 的位移数据，并添加标准差为 3mm 的随机噪声误差。分别在不扩展、2° 扩展、以及去远场效应的三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<sup>[46, 47]</sup>，对比结果如图 6。从图 6 可以看出三种反演结果中，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。表 1 进一步计算了不同结果的振幅、相位和趋势变化。从表 1 可以看出去远场反演结果无论是从振幅、相位还是趋势方面都是更加接近 GLDAS 数据。

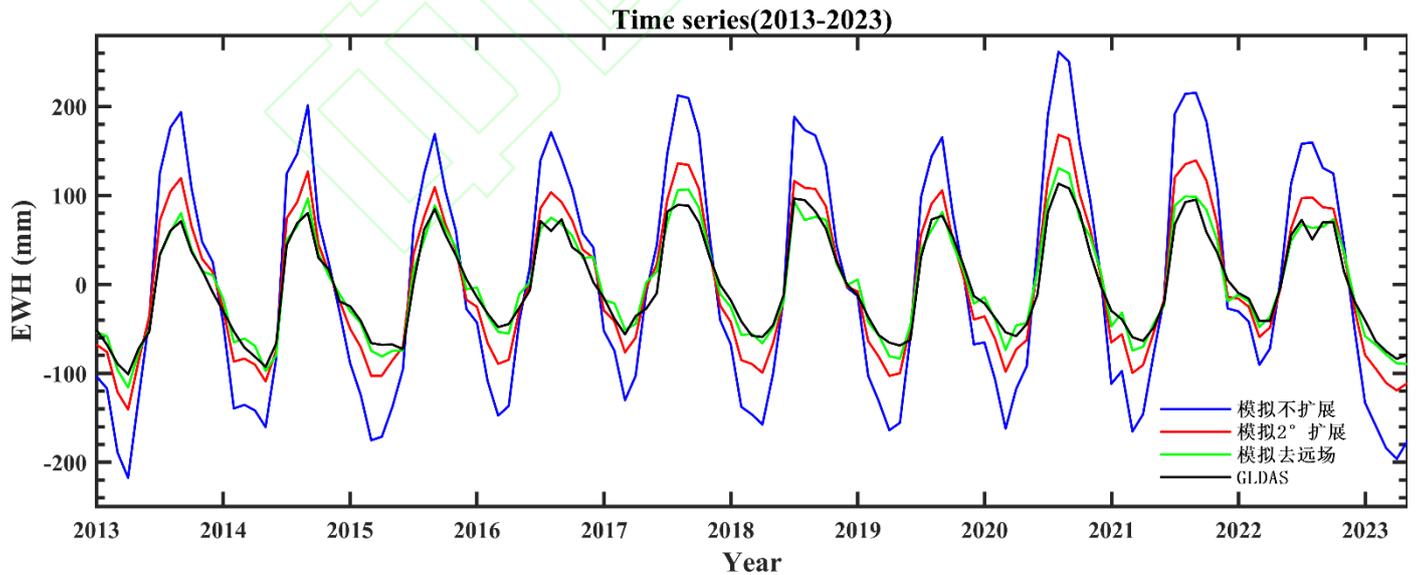


图 6 模拟川滇地区反演 TWS 时间序列图

Fig.6 Simulated inversion of TWS 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 The amplitude, phase, and trend of the simulated time series

数据类型	振幅 mm	相位 months	趋势 mm*a <sup>-1</sup>
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

### 3.2 顾及远场效应的川滇地区 GNSS 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(Fo)数据计算区域外远场水文效应引起的位移，并利用陆态网在实验区域的 GNSS 站点的垂直位移序列扣除远场位移影响后进行水储量反演，得到等效水高变化表示 TWS 变化（简称 GNSS(F\_GL)、GNSS(F\_GR)结果）。图 7 为不同方法得到的川滇地区 TWS 平均时间序列变化图。考虑 GRACE(Fo)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。可以看出三种 GNSS 反演结果与 GRACE 和 GLDAS 有着良好的一致性，两种 GNSS(F)结果时间序列高度相关，都更加接近 GRACE 与 GLDAS 结果。三种 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 GNSS 反演的 TWS 平均幅值由 141.01mm 下降为 114.43mm 和 105.21mm，分别减小 19.1% 和 25.4%，两种 GNSS(F)的反演结果更加趋近 GRACE 与 GLDAS 数据。

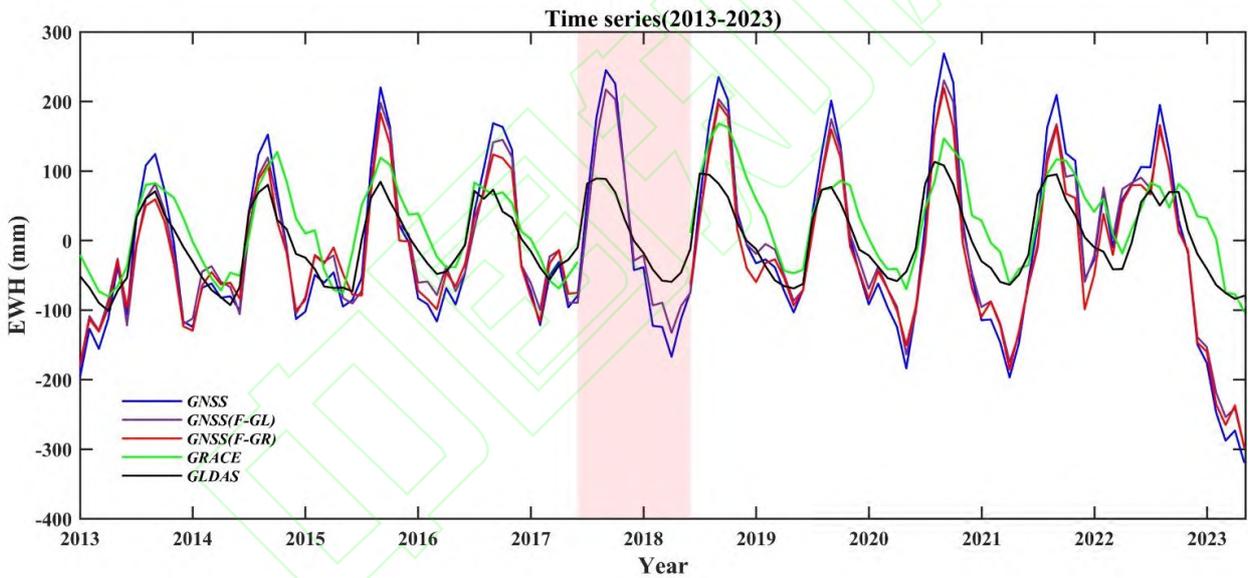


图 7 川滇地区 TWS 平均时间序列

Fig. 7 Average time series of TWS in Sichuan-Yunnan region

表 2 不同 TWS 时间序列结果数据统计

Table 2 Data statistics of Different TWS time series results

数据	时间范围	振幅 mm	相位 months
GNSS	2013.1-2023.5	141.01	7.96
	2013.1-2017.6	115.95	7.99
	2018.6-2023.5	149.11	7.95
GNSS(F_GL)	2013.1-2023.5	111.43	7.84
	2013.1-2017.6	86.41	7.84
	2018.6-2023.5	119.75	7.84
GNSS(F_GR)	2013.1-2023.5	105.21	8.07

	2013.1-2017.6	82.87	8.12
	2018.6-2023.5	120.68	8.02
GLDAS	2013.1-2023.5	71.73	7.91
	2013.1-2017.6	67.44	7.71
	2018.6-2023.5	74.03	8.03
	2013.1-2023.5	79.79	7.22
GRACE	2013.1-2017.6	78.64	7.29
	2018.6-2023.5	78.35	7.12

### 3.2.2 反演结果振幅、相位空间分布

图 8(a)、(b)、(c) 分别为利用传统 GNSS 方法与 GNSS(F\_GL)、GNSS(F\_GR)反演出的川滇地区振幅、相位的空间分布结果图，图 8(c)、(d)分别为 GRACE 与 GLDAS 估计结果。由图 8 可以看出 GNSS(F\_GL)、(F\_GR)的振幅与 GNSS 的结果有着相同的空间分布由西南向东北逐渐减小，同时可以看出两种 GNSS(F)结果在幅值上有着明显的降低，其中 GRACE(F\_GR)降低更明显，这是由于 GLDAS 估计远场影响时缺少地下水变化的影响。川滇区域西南区域 TWS 反演结果幅值差异最为显著，可以理解的是该区域更接近于印度季风影响区域，该远场区域有着显著的水文动态。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<sup>[15, 16, 48]</sup>。至于相位，三种 GNSS 结果变化趋势一致，在川滇东北部地区部分格网中有所变化，但川滇东北部本身陆地水储量变化并不显著。结合表 2，远场负荷效应对反演结果相位变化影响不大。

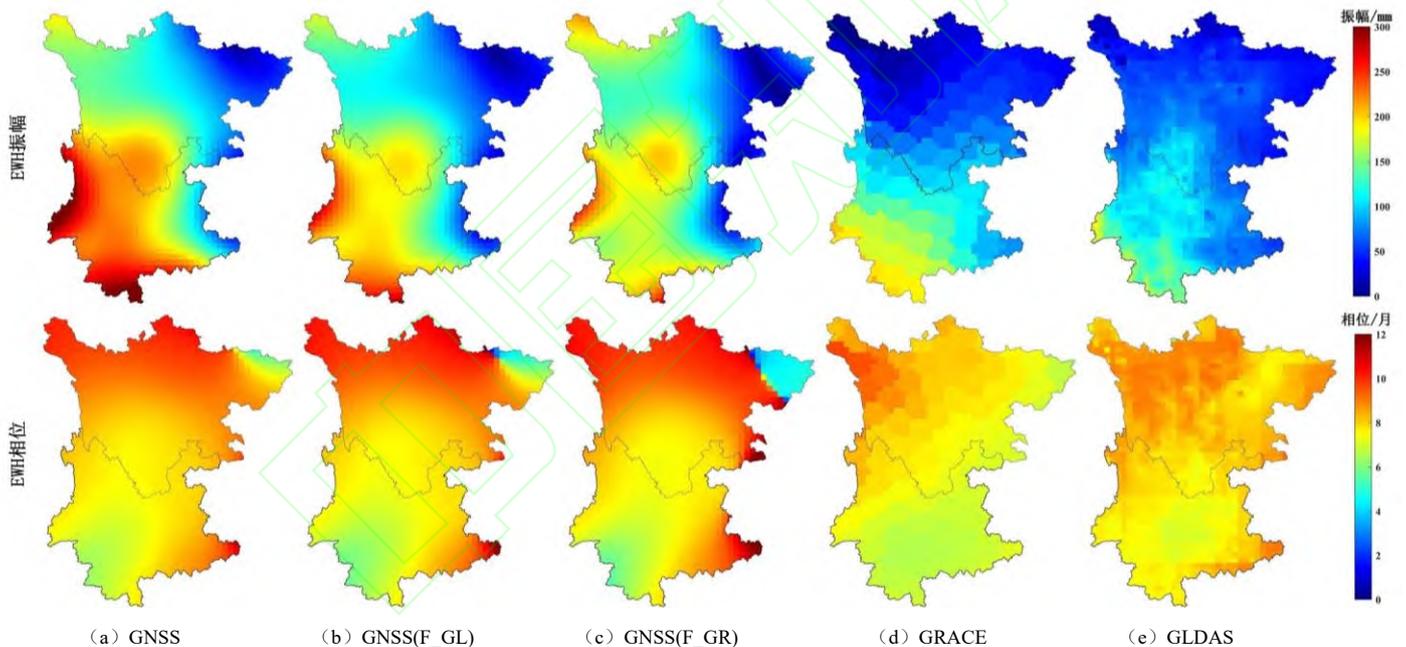


图 8 四种反演 TWS 结果振幅、相位

Fig. 8 The amplitude and phase of four TWS inversion results

同时将图 8 中将每个格网上 GNSS 反演结果与 GRACE、GLDAS 振幅结果进行差分，用以具体展示远场效应在空间格网上的影响，结果如图 9 所示。可以看出 GNSS 与 GRACE 和 GLDAS 之间的振幅残差普遍大于 GNSS(F\_GL)和 GNSS(F\_GR)结果，表明顾及远场效应后的两种 GNSS(F)反演结果均有所改善。图 8 表明，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 节中远场位移影响空间分布结果一致。

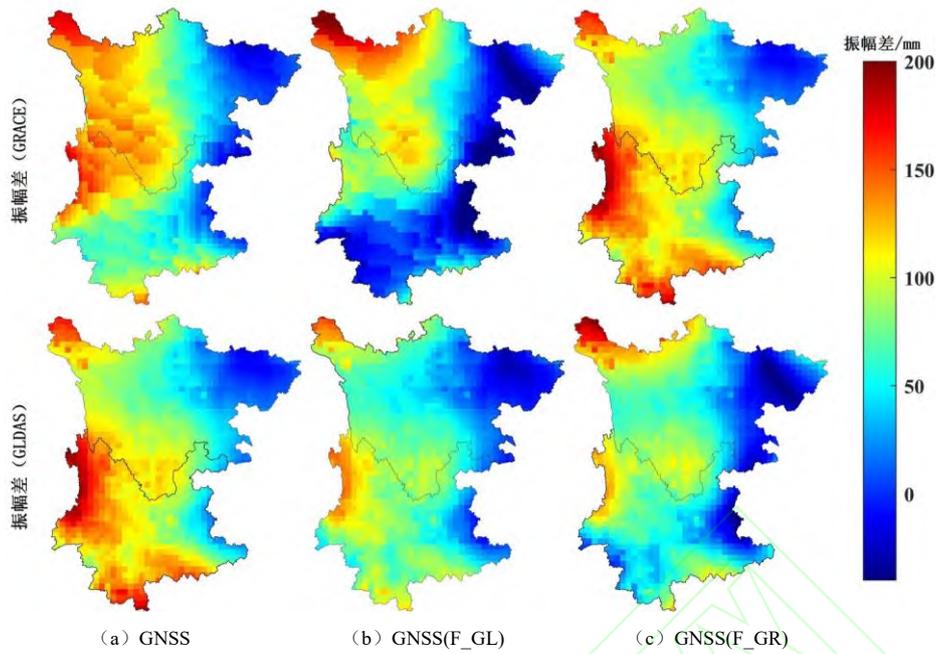
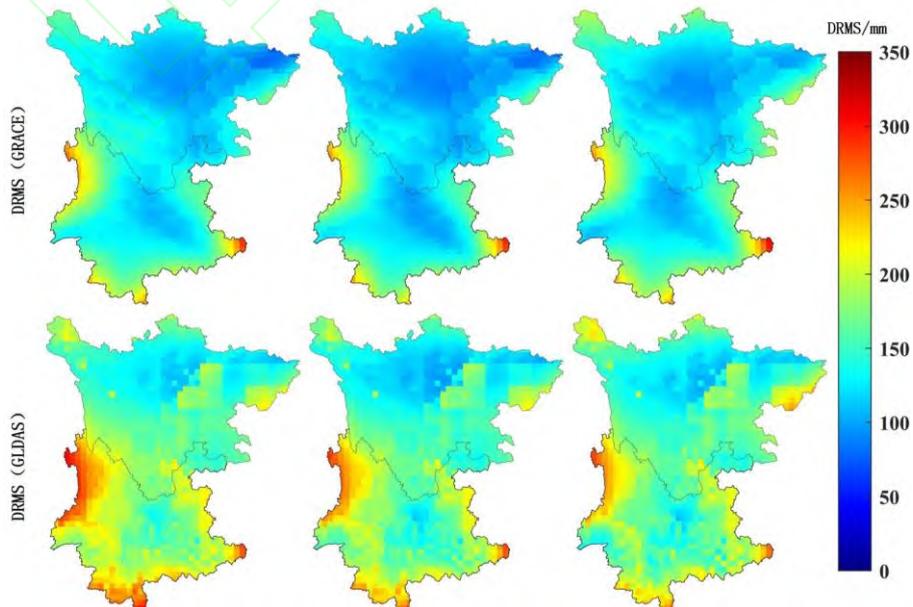


图9 GNSS 反演 TWS 与 GRACE 和 GLDAS 振幅差分结果

Fig. 9 The differences between GNSS inversion of TWS and GRACE and GLDAS amplitude

### 3.2.3 反演结果序列差值均方根分析

同时计算了三种 GNSS 与 GRACE 和 GLDAS 格网 TWS 时间序列的 DRMS，用于展示数据间的相关性，结果如图 10。从图 10 中可以看出三种 GNSS 结果与 GRACE 和 GLDAS 的 DRMS 有着相似的空间分布趋势，在川滇西南部边缘地区 DRMS 较大，在东北部分较小。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，相比与 GLDAS，三种 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，这是可能由于 GLDAS 作为简化版水文产品（缺少地下水、湖泊水等信息）引起的。图 10 和表 3 都显示进行远场效应改正后的两种 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。经过统计，与 GRACE 数据相比，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，分别平均减小 8.6%与 2.1%；对比 GLDAS 数据，得到改进的格网序列分别达到了 100%和 77.5%，平均改善 7.1%和 5.7%。说明顾及远场影响后的研究区域格网的 TWS 变化大部分更加接近 GRACE 与 GLDAS。



(a) GNSS (b) GNSS(F\_GL) (c) GNSS(F\_GR)

图 10 三种 GNSS 与 GRACE、GLDAS 间格网 TWS 时间序列差值均方根分布图

Fig. 10 DRMS distribution of grid TWS time series between the two GNSS and GRACE and GLDAS

表 3 格网时间序列差值均方根数据统计

Table 3 DRMS of grid time series data

方法	格网时间序列差值均方根 (mm)					
	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	69.7	124.33	310.8	94.93	161.31
GNSS (F_GR)	333.33	90.26	133.25	299.34	101.67	163.81

## 4 结语

本文利用 GLDAS 数据实例在川滇地区研究了远场水文负荷对研究区域垂直位移的影响, 并进一步探讨了利用 GLDAS 和 GRACE(Fo)数据计算的远场影响对 GNSS 反演区域陆地水储量变化的影响, 得到以下结论:

(1) 在 GNSS 区域陆地水储量反演中, 采用全波段的 GNSS 位移信息是不够准确的, 其中站点位移的贡献中远场负荷导致的位移不可忽略。在川滇地区, 区域  $2^\circ$  范围外的远场水文负荷对区域内 GNSS 站点的位移影响可高达约 2mm;

(2) 顾及远场效应的 GNSS 反演结果与传统的扩展边界的反演结果在时间序列和振幅空间分布上相似, 但前者在振幅大小和空间分布上更加接近 GLDAS 与 GRACE 数据;

(3) 顾及远场效应后, GNSS 反演格网内等效水高序列与 GRACE 和 GLDAS 中序列的有着更高的相关性。两种 GNSS(F)反演结果与二者格网序列 DRMS 都有不同程度的降低。

综上, 利用 GNSS 进行川滇地区进行陆地水储量反演中, 远场水文负荷导致的站点位移信息不可忽略, 在扩展边界反演的同时还应进行远场影响的改正, 保证反演结果的准确性。

## 参考文献

- [1] RODELL M, FAMIGLIETTI J S. Detectability of variations in continental water storage from satellite observations of the time dependent gravity field [J]. Water resources research, 1999, 35(9): 2705-23.
- [2] RODELL M, FAMIGLIETTI J S, WIESE D N, et al. Emerging trends in global freshwater availability [J]. Nature, 2018, 557(7707): 651-9.
- [3] 李琼, 罗志才, 钟波, et al. 利用 GRACE 时变重力场探测 2010 年中国西南干旱陆地水储量变化 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1843-9.
- [4] 谢小伟, 幸茂仁, 汪璐璐, et al. 利用 GRACE/GRACE-FO 重力卫星探测黄河流域水储量能力及极端气候发生的可能性 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(12): 1269-75.
- [5] 李霞, 高艳红, 王婉昭, et al. 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.
- [6] 刘任莉, 余敦先, 李敏, et al. 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): 1596-604.
- [7] LI W, WANG W, ZHANG C, et al. Monitoring groundwater storage variations in the Guanzhong area using GRACE satellite gravity data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(6): 2237-45.
- [8] 翟键豪, 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(01): 100-10.
- [9] FAMIGLIETTI J S, MATTHEW R. Environmental science. Water in the balance [J]. Science, 2013, 340(6138): 1300-1.
- [10] ARGUS D F, FU Y, 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): 1971-80.
- [11] BLEWITT G, LAVALLÉE D, CLARKE P, et al. A new global mode of Earth deformation: Seasonal cycle detected [J]. Science, 2001, 294(5550): 2342-5.

- [12] BORSA A A, AGNEW D C, CAYAN D R. Ongoing drought-induced uplift in the western United States [J]. *Science*, 2014, 345(6204): 1587-90.
- [13] WU X, 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).
- [14] SHEN Y, YAN H, 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.
- [15] ZHANG B, YAO Y, 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.
- [16] 何思源, 谷延超, 范东明, et al. 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.
- [17] 杨兴海, 袁林果, 姜中山, et al. 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): 2828-43.
- [18] 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*, 2023, 48(11): 1724-35.
- [19] LI X, ZHONG B, CHEN J, 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.
- [20] LI X, ZHONG B, LI J, 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): 179-88.
- [21] ZHONG B, TAN J, 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.
- [22] 杨兴海, 袁林果, 姜中山, et al. 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, 53(5): 813-22.
- [23] LIU B, SHAN C, RAO W, 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.
- [24] JIANG Z, HSU Y J, YUAN L, 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.
- [25] LIU B, YU W, DAI W, 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.
- [26] ZHU H, CHEN K, HU S, 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.
- [27] 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).
- [28] HEKI K. Seasonal modulation of interseismic strain buildup in northeastern Japan driven by snow loads [J]. *Science*, 2001, 293(5527): 89-92.
- [29] WHITE A M, GARDNER W P, BORSA A A, et al. A review of GNSS/GPS in hydrogeodesy: Hydrologic loading applications and their implications for water resource research [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(7): e2022WR032078.
- [30] FU Y, 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): 552-66.
- [31] VAN DAM T, WAHR J. 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): 1281-6.
- [32] GLADKIKH V, TENZER R, DENYS P. Crustal deformation due to atmospheric pressure loading in new Zealand [J]. *Journal of Geodetic Science*, 2011, 1(3): 271-9.
- [33] JIANG W, 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(1): 5874.
- [34] BETTADPUR S. Level-2 gravity field product user handbook [J]. *The GRACE Project*, 2007.
- [35] LOOMIS B D, RACHLIN K E, WIESE D N, et al. Replacing GRACE/GRACE - FO with satellite laser ranging: Impacts on Antarctic Ice Sheet mass change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(3): e2019GL085488.
- [36] 钱安, 易爽, 孙广通, et al. GLDAS\_NOAH\_M. 2.1 水文模型在青藏高原的适应性分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38(3): 254-9.
- [37] CHEN C, HAGEMANN S, LIU J. Assessment of impact of climate change on the blue and green water resources in large river basins in China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74: 6381-94.
- [38] 刘君龙, 袁喆, 许继军, et al. 长江流域气象干旱演变特征及未来变化趋势预估 [J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(10): 28.
- [39] BAI P, LIU X, YANG T, et al. Evaluation of streamflow simulation results of land surface models in GLDAS on the Tibetan plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(20): 12,180-12,97.

- [40] FARRELL W. Deformation of the Earth by surface loads [J]. *Reviews of Geophysics*, 1972, 10(3): 761-97.
- [41] 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): 1795-806.
- [42] DAHLEN F, SIMONS F J. Spectral estimation on a sphere in geophysics and cosmology [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 174(3): 774-807.
- [43] SIMONS F J, DAHLEN F J. Spherical Slepian functions and the polar gap in geodesy [J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(3): 1039-61.
- [44] ZHU H, CHEN K, HU S, 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): 1581-99.
- [45] JIANG Z, HSU Y-J, YUAN L, 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.
- [46] 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(01): 45-54.
- [47] 钟波, 李贤炮, 李建成, et al. 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(03): 997-1014.
- [48] 贾路路, 汪汉胜, 相龙伟. 利用 GRACE, GPS 和绝对重力数据监测斯基的纳维亚陆地水储量变化 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(2): 170.

## 网络首发:

标题: 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

作者: 刘斌, 周灿, 饶维龙, 冯腾飞, 陈津津

收稿日期: 2025-02-20

DOI:10.13203/j.whugis20240371

## 引用格式:

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)*, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240371 (LIU Bin, ZHOU Can, RAO Weilong, et al. Inversion of Regional Terrestrial Water Storage Using GNSS Observations Considering the Impact of Far-Field Hydrological Loading: A Case Study in the Sichuan-Yunnan Region[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240371)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

## 您感兴趣的其他相关论文:

利用小波分解重构 GRACE 地下水储量成分研究

张勇刚, 王正涛, 高瑀, 田坤俊

*武汉大学学报(信息科学版)*, 2025, 50(1): 20-29.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220407>

长江流域陆地水储量变化及归因研究

熊景华, 郭生练, 王俊, 尹家波, 李娜

*武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(12): 2241-2248.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230017>

联合重力卫星和水井资料监测华北平原地下水储量变化

曹杰, 肖云, 龙笛, 崔英杰, 刘淼, 张锦柏, 王宇康, 洪晓东, 陈培宁

*武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(5): 805-818.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230116>