



引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20230363

Citation: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. DOI: 10.13203/j.whugis20230363

# 利用GNSS地表形变反演区域陆地水储量变化的进展

李建成<sup>1,2,3</sup> 李贤炮<sup>1,2</sup> 钟波<sup>1,2,3</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

**摘要:**连续密集的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测的地表形变可用于反演高时空分辨率的区域陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)变化,对区域水循环和气候变化的研究具有重要意义,已成为当前水文大地测量领域的一个研究热点。介绍了利用GNSS地表形变反演区域TWS变化的负荷格林函数法和Slepian基函数法,在此基础上评估了GNSS反演TWS变化的稳定性及性能,并重点评述了将其应用于区域水循环和极端气候变化研究的最新进展。对当前GNSS反演TWS变化方法存在的问题及未来发展趋势(如数据精细处理、多类数据联合反演等)进行了总结与展望,以期对未来利用GNSS监测技术研究区域TWS变化及相关应用提供参考。

**关键词:**GNSS地表形变;陆地水储量变化;负荷格林函数;Slepian基函数;联合反演

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2023-10-03

DOI:10.13203/j.whugis20230363

文章编号:1671-8860(2023)11-1724-12

## Review of Inverting GNSS Surface Deformations for Regional Terrestrial Water Storage Changes

LI Jiancheng<sup>1,2,3</sup> LI Xianpao<sup>1,2</sup> ZHONG Bo<sup>1,2,3</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Hubei LuoJia Laboratory, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Continuous and dense global navigation satellite system (GNSS) observations of surface deformation can be used to recover regional terrestrial water storage (TWS) changes with high spatiotemporal resolution, which is of great significance for the study of regional water cycle and climate changes and has become a hot topic in the field of hydro-geodesy. This paper introduces the basic theory and inversion algorithms of the loading Green's function method and Slepian basis function method, and the stability and performance of these two methods in retrieving regional TWS changes by using GNSS surface deformations are evaluated. Meanwhile, the latest progress in using GNSS-derived TWS changes to study regional water cycles and extreme climate changes is reviewed. The existing problems and future development trends of the inversion of GNSS observations (e.g. refined GNSS data processing and joint inversion of multi-source data) are summarized and analyzed. It provides important insights into the use of GNSS observations to investigate regional TWS changes and related applications in hydro-geodesy.

**Key words:** GNSS surface deformations; terrestrial water storage changes; loading Green's function; Slepian basis function; joint inversion

基金项目:国家自然科学基金(41974015, 42374002);湖北珞珈实验室专项基金(220100004)。

第一作者:李建成,博士,教授,中国工程院院士,主要从事卫星大地测量学和物理大地测量学研究。jcli@whu.edu.cn

通讯作者:钟波,博士,副教授。bzhong@sgg.whu.edu.cn

陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)是指存储在地表和地下的所有水分,包括地表水、地下水、土壤水、冰川、积雪和树冠水等成分,是水循环的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。准确估计 TWS 变化的时空分布有助于理解过去的水文事件和预测未来的水循环变化,对于气候变化的研究和预报、农业生产安全、洪水和干旱等自然灾害的监测及预警具有重要意义<sup>[3-5]</sup>。

自全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)技术问世以来,国际 GNSS 服务组织在全球范围内陆续建立了大量连续运行参考站。同时,许多国家和地区也建立了区域 GNSS 基准站网(如中国大陆构造环境监测网络),这些丰富的 GNSS 观测为大地测量学、地球物理学及相关地球科学的发展提供了重要的数据基础。GNSS 地表形变观测具有全天候、近实时和高精度的特点,被广泛应用于参考框架维持、板块构造运动、地震形变以及气候变化等研究<sup>[6]</sup>。根据质量负荷格林函数理论,地表质量负荷(如 TWS)的迁移与重新分布会导致地壳发生形变<sup>[7]</sup>,这种形变可以被 GNSS 以毫米级精度连续地进行监测。因此,可以利用 GNSS 地表形变数据独立地反演高精度的全球和区域 TWS 分布及变化<sup>[8-11]</sup>。

Blewitt 等<sup>[8]</sup>最早于 2001 年利用全球定位系统(global positioning system, GPS; 由于 GNSS 包括了 GPS, 文中统一用 GNSS 表述)形变数据反演了南北半球之间大尺度地表质量迁移的季节性交换,其主要对应于弹性地球对土壤水分、积雪和大气负荷等的一阶项球谐响应。Wu 等<sup>[9]</sup>基于全球 200 个 GNSS 测站反演了小于 6 阶次的球谐系数,结果表明由 GNSS 计算的季节性地心运动和带谐重力位变化与卫星激光测距结果保持了很好的一致性。而 Rietbroek 等<sup>[12]</sup>则是探讨了利用 GNSS 反演的低阶质量负荷变化填补重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)卫星及其继任者(GRACE follow-on, GFO)之间数据空白的可能性。由于占全球面积约 71% 的海洋区域没有 GNSS 测站分布<sup>[13]</sup>,因此,利用 GNSS 地表形变数据反演全球质量变化对应的高阶次球谐系数存在挑战。

相对于 GRACE/GFO 卫星遥感观测技术而言,GNSS 地表形变测量对距离站点约 100 km 范围内的质量负荷变化十分敏感<sup>[14]</sup>,更适用于反演区域或流域尺度的 TWS 变化<sup>[15-16]</sup>。近年来,

GNSS 监测的地表形变已被成功地应用于反演北美洲<sup>[10-11,17-21]</sup>、中国<sup>[22-27]</sup>以及南美洲<sup>[28-30]</sup>等国家和地区的 TWS 变化,并应用于极端气候事件和区域水循环研究。例如,Fu 等<sup>[18]</sup>利用 GNSS 形变数据反演了华盛顿和俄勒冈州季节性的 TWS 变化,结果表明 GNSS 估计值与 GRACE 和水文模型结果保持很好的一致性。Jin 和 Zhang<sup>[19]</sup>利用 GNSS 反演的 TWS 变化研究了美国西南地区 2012 年严重的干旱事件,结果表明 GNSS 估计的干旱量级与 GRACE 结果一致且大于水文模型结果,表明干旱主要由地表水和地下水亏损引起。Zhang 等<sup>[22]</sup>利用 34 个 GNSS 测站垂直位移时间序列反演了中国三江源地区的 TWS 变化,结果表明基于 GNSS 反演的 TWS 变化的空间分辨率可以达到  $1^\circ \times 1^\circ$ 。Zhong 等<sup>[24]</sup>分析了不同测站分布对 GNSS 反演结果的影响,并利用 GNSS 反演的 TWS 变化填补了中国西南地区 GRACE 和 GFO 之间的数据空白。Jiang 等<sup>[29]</sup>和 Tang 等<sup>[30]</sup>使用 GNSS 估计的大尺度 TWS 变化追踪了巴西的极端水文干旱事件。以上研究表明,GNSS 地表形变观测可有效用于区域 TWS 变化反演,并应用于水文学和气候变化等相关学科的研究。

随着 GNSS 观测数据的不断积累和数据处理方法及策略的不断完善,GNSS 在大地测量和地球物理等研究领域的应用范围日益广泛和深入。近年来,利用 GNSS 地表形变反演区域 TWS 变化受到了广泛关注,国内外学者在反演算法及改进、反演结果分析与应用等方面取得了许多重要的研究成果。为此,有必要对 GNSS 地表形变反演区域 TWS 变化的研究现状和最新进展进行回顾和总结。本文首先介绍 GNSS 地表形变反演区域 TWS 变化的基本原理与反演方法,分析 GNSS 反演 TWS 变化的稳定性及性能潜力,然后评述其在区域水循环和气候变化研究中的典型应用及进展,最后对目前存在的主要问题及未来发展趋势进行总结与展望。

## 1 GNSS 地表形变反演区域 TWS 变化的基本原理

### 1.1 格林函数方法

#### 1.1.1 负荷格林函数理论

根据弹性负荷理论,地表质量负荷(如 TWS)的迁移与重新分布会导致地壳发生弹性形变,这种形变可以用负荷格林函数表示<sup>[7,31]</sup>:

$$\begin{cases} G_v(\varphi) = \frac{R}{M} \sum_{n=0}^{\infty} h_n P_n(\cos\varphi) \\ G_h(\varphi) = \frac{R}{M} \sum_{n=0}^{\infty} l_n \frac{dP_n(\cos\varphi)}{d\varphi} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $G_v$  和  $G_h$  分别表示垂直和水平格林函数;  $R$  和  $M$  分别表示地球的平均半径和质量;  $h_n$  和  $l_n$  分别为垂直和水平形变负荷 Love 数<sup>[32]</sup>;  $n$  为阶数;  $\varphi$  为 GNSS 测站与质量负荷之间的角距;  $P_n$  为勒让德多项式:

$$\begin{cases} P_0(x) = 1, n = 0 \\ P_1(x) = x, n = 1 \\ (n+1)P_{n+1}(x) = \\ (2n+1)xP_n(x) - nP_{n-1}(x), n > 1 \end{cases} \quad (2)$$

地表垂直形变  $U$  和水平形变  $H$  可以表示为质量负荷  $\Delta m$  与式(1)中格林函数的褶积:

$$\begin{cases} U = \Delta m \times G_v \\ H = \Delta m \times G_h \end{cases} \quad (3)$$

假设将半径为 20 km、高度为 1 m 的圆盘负荷从地球表面移除, 根据式(3), 其导致的形变如图 1 所示。由图 1 可以看出, 对相同的质量负荷变化而言, 垂直形变振幅远大于水平形变, 表明垂直形变对质量负荷变化的响应更为敏感<sup>[31]</sup>, 因此当前大多数研究是利用 GNSS 垂直形变反演 TWS 变化。

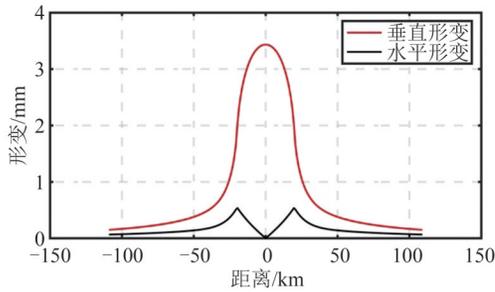


图1 圆盘负荷从地球表面移除后导致的垂直和水平形变  
Fig. 1 Vertical and Horizontal Deformations Induced by Removing the Disc Load from the Earth's Surface

根据式(3), GNSS 地表形变与地表质量负荷之间的观测方程可以表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{x} + \mathbf{e}, \quad \mathbf{e} \sim (0, \sigma^2 \mathbf{I}) \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{y}$  为 GNSS 地表形变观测向量;  $\mathbf{G}$  为格林函数系数矩阵;  $\mathbf{x}$  为待求的 TWS 变化参数向量, 通常采用等效水高表示;  $\mathbf{e}$  和  $\sigma^2$  分别是 GNSS 地表形变  $\mathbf{y}$  的观测值残差向量和误差方差;  $\mathbf{I}$  是与  $\mathbf{y}$  相对应的单位矩阵。

### 1.1.2 病态问题的求解

利用 GNSS 地表形变反演区域 TWS 变化属

于离散病态问题, 需要采用合适的正则化方法对病态问题进行稳定求解。常用的正则化方法包括 Tikhonov 正则化<sup>[33]</sup>和截断奇异值分解(truncated singular value decomposition, TSVD), 其中 Tikhonov 正则化是当前 GNSS 地表形变反演区域 TWS 变化中病态问题求解的常用方法。

Tikhonov 正则化的基本思想是通过引入正则化约束矩阵以减小法矩阵  $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$  的病态性, 进而提高解的稳定性。根据式(4)的观测方程, 基于 Tikhonov 正则化求解 TWS 变化参数向量  $\mathbf{x}$  的目标函数为<sup>[10]</sup>:

$$\min \left\{ \left\| \frac{(\mathbf{G}\mathbf{x} - \mathbf{y})}{\sigma} \right\|^2 + \beta^2 \|\mathbf{L}\mathbf{x}\|^2 \right\} \quad (5)$$

式中,  $\beta > 0$  为正则化参数, 可通过 L-曲线法<sup>[34]</sup>、广义交叉检验法<sup>[35]</sup>和权衡曲线法等确定;  $\mathbf{L}$  为正则化约束矩阵, 这里主要为拉普拉斯矩阵<sup>[36]</sup>;  $\|\cdot\|^2$  表示二范数。则待求的 TWS 变化参数向量的估计值  $\hat{\mathbf{x}}$  为:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \sigma^2 \beta^2 \mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{y} \quad (6)$$

## 1.2 Slepian 基函数方法

### 1.2.1 Slepian 基函数理论

Slepian<sup>[37]</sup>于 1983 年首次提出了 Slepian 问题, 以解决信号在一维连续空间中时域和频域的能量集中问题。后来, Slepian 问题被引入三维空间, 用于解决地球物理学和宇宙学等相关的科学问题<sup>[38-39]</sup>。球面空间的 Slepian 基函数  $g_\alpha(\theta, \lambda)$  可以用一组面球谐函数  $Y_{lm}(\theta, \lambda)$  来表示:

$$g_\alpha(\theta, \lambda) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=-l}^l g_{\alpha, lm} Y_{lm}(\theta, \lambda) \quad (7)$$

式中,  $\theta$  和  $\lambda$  分别表示研究区域格网点余纬和经度;  $l$  和  $m$  分别为面球谐函数的阶和次;  $L$  为面球谐函数的最大展开阶数;  $g_{\alpha, lm}$  表示  $g_\alpha(\theta, \lambda)$  的球谐展开系数。

为了使  $g_\alpha(\theta, \lambda)$  的能量很好地集中在局部区域  $\Delta$  内,  $g_\alpha(\theta, \lambda)$  应该满足:

$$\gamma_\alpha = \frac{\|g_\alpha(\theta, \lambda)\|_{\Delta}^2}{\|g_\alpha(\theta, \lambda)\|_{\Omega}^2} = \max \quad (8)$$

式中,  $\Omega$  表示整个球面;  $\gamma_\alpha \in (0, 1)$  为聚集因子, 表示  $g_\alpha(\theta, \lambda)$  在区域  $\Delta$  中的集中程度。

式(8)中求解  $\gamma_\alpha$  的最大值的过程称为 Slepian 问题, 其又可表示为频域内特征方程组的求解问题:

$$\begin{cases} \sum_{l'=0}^L \sum_{m=-l'}^{l'} D_{lm,l'm'} g_{\alpha,lm} = \gamma_{\alpha} g_{\alpha,lm}, 0 \leq l \leq L \\ D_{lm,l'm'} = \int_{\Delta} Y_{lm} Y_{l'm'} d\Omega \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)进行求解,便可得到 $(L+1)^2$ 个特征值 $\gamma_{\alpha}$ 和对应的特征向量 $g_{\alpha,lm}$ 。

### 1.2.2 反演模型及求解

根据 Slepian 基函数局部集中的特性,由 GNSS 监测的地表形变测量可以由一系列的 $g_{\alpha}(\theta, \lambda)$ 表示:

$$\mathbf{u}_L(\theta, \lambda) = R \sum_{\alpha=1}^{(L+1)^2} s_{\alpha} g_{\alpha}(\theta, \lambda) \quad (10)$$

式中, $\mathbf{u}_L$ 为 GNSS 垂直形变观测数据; $s_{\alpha}$ 是和第 $\alpha$ 个 $g_{\alpha}(\theta, \lambda)$ 相对应的 Slepian 系数。

式(10)的线性模型可以表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}_1 + \mathbf{e} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{A}$ 是由 $g_{\alpha}(\theta, \lambda)$ 构成的系数矩阵; $\mathbf{x}_1$ 为 Slepian 系数向量的估计值,可通过最小二乘方法得到:

$$\mathbf{x}_1 = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (12)$$

根据负荷格林函数理论<sup>[7]</sup>,与 GNSS 垂直形变相对应的 Slepian 系数 $s_{\alpha}$ 可通过负荷 Love 数转换为与质量负荷相对应的 Slepian 系数向量 $s_{\beta}^{\text{ewh}[40]}$ ,计算式为:

$$s_{\beta}^{\text{ewh}} = \sum_{\alpha=1}^J s_{\alpha} \sum_{l=0}^L \sum_{m=-l}^l \left( \frac{\rho_e}{3\rho_w} \right) \frac{2l+1}{h_l} g_{\alpha,lm} g_{\beta,lm} \quad (13)$$

式中, $\rho_e$ 和 $\rho_w$ 分别为地球和淡水的平均密度; $J$ 表示最优集中因子,可用 Shannon 数表示。

因此,基于特征值加权的 TWS 变化向量的估计值 $\hat{\sigma}_L$ 可以表示为:

$$\hat{\sigma}_L(\theta, \lambda) = R \sum_{\alpha=1}^J \gamma_{\alpha} s_{\beta}^{\text{ewh}}(\theta, \lambda) g_{\alpha}(\theta, \lambda) \quad (14)$$

## 2 GNSS 反演结果评估与典型应用

在精确分离了其他非水文信号成分(包括非潮汐大气与海洋负荷、构造形变以及冰后回弹等效应)的贡献后,便可以利用 GNSS 地表形变反演区域 TWS 变化。类似于 GRACE/GFO 观测,GNSS 反演的 TWS 变化也包含了地表水、地下水以及土壤水等多种形式水文成分的综合贡献,因此可用于水文学、极端气候变化及相关研究。

### 2.1 GNSS 反演结果的稳定求解

利用 GNSS 地表形变基于格林函数方法反演区域 TWS 变化属于典型的离散病态问题。当前多数研究是利用 Tikhonov 正则化方法通过引

入正则化约束矩阵(主要为拉普拉斯矩阵)以及确定合理的正则化参数对病态问题进行稳定求解<sup>[10-11,18]</sup>,为有偏估计。为获得更加稳定和可靠的反演结果,文献[27,41]通过构建不同的拉普拉斯矩阵和引入不同的最优正则化参数估计策略来提高解的可靠性,结果显示改进的拉普拉斯矩阵可有效提高边缘区域 TWS 变化估计的可靠性。为了克服拉普拉斯矩阵的缺陷,如信号泄漏和过度平滑等问题,文献[20]以美国西部山区积雪负荷反演为例进行闭环模拟实验,通过引入线性尺度因子和增加 GNSS 观测站来减少由平滑约束引起的信号泄漏。而文献[42]则是以陆面模型计算的空间协方差函数替代传统的拉普拉斯矩阵作为正则化约束矩阵,以提高 GNSS 反演结果的可靠性。另外,文献[43]提出边界包含约束的反演模型并用于美国西海岸 TWS 变化的反演,结果表明改进的模型可将边界区域反演结果的精度提高 10%~20%。

针对格林函数方法,通过引入先验约束矩阵虽可以获得相对稳定的解,其代价是解算结果中包含了先验信息的贡献。此外,如何确定合理的正则化参数也是一项具有挑战性的工作。为了减少先验信息的影响,文献[44]引入 TSVD 正则化对 GNSS 反演 TWS 变化的病态问题进行求解,结果表明 TSVD 可有效用于 GNSS 测站密集分布地区(如中国台湾)的 TWS 变化反演。TSVD 正则化是首先对设计矩阵进行奇异值分解,然后通过舍弃贡献较小的奇异值进而对设计矩阵进行重构,以获得稳定解。虽然 TSVD 减少了外部约束信息的干扰,但 GNSS 形变时间序列存在较大误差,由于没有任何先验信息作为约束,在 GNSS 测站分布相对稀疏的区域,其估计的 TWS 变化异质性较大。为了综合利用 Tikhonov 和 TSVD 正则化方法的各自优势,文献[45]引入 TSVD-Tikhonov 组合正则化方法,对 GNSS 反演 TWS 变化的病态问题进行求解,结果表明 TSVD-Tikhonov 组合正则化比单独的 Tikhonov 或 TSVD 正则化反演结果的可靠性和精度更优。此外,文献[26,46]将机器学习和深度学习等算法引入 GNSS 地表形变反演模型以提高反演结果的精度和可靠性,为利用 GNSS 反演可靠的 TWS 变化提供了新思路。不同于格林函数方法,Slepian 基函数法通过限定信号的频域和空域范围,可有效削弱法方程求解的病态性<sup>[40]</sup>,基于经典的最小二乘方法或引入宽松

的约束条件即可解算稳定的 TWS 变化<sup>[29,47-50]</sup>。总之,虽然格林函数法相比 Slepian 基函数法病态性更强,但其适用于 GNSS 测站分布密集地区的高空间分辨率的 TWS 变化反演,而 Slepian 基函数则更适用于 GNSS 测站相对稀疏区域的大尺度 TWS 变化的反演。

## 2.2 GNSS 反演结果的性能评估

利用 GNSS 反演区域 TWS 变化是 GNSS 观测在水文大地测量学中的一项新应用,需要有效评估其反演 TWS 变化的性能及潜力。文献[10]利用密集的 GNSS 垂直形变数据,基于格林函数方法反演了美国加利福尼亚地区的 TWS 变化,结果显示 GNSS 反演结果与 GRACE 和水文模型结果保持较好的一致性。此外,GNSS 反演 TWS 变化的空间分辨率可以达到约 50 km,远优于 GRACE 观测的反演结果(约 300~500 km)。文献[40]利用稀疏分布的 GNSS 观测数据,基于 Slepian 基函数法反演了澳大利亚的地表质量变化,结果表明 GNSS 估计值与 GRACE 及地球物理模型结果一致,但在靠近海岸线区域的小盆地尺度内,GNSS 相比 GRACE 与陆面模型结果更为接近。文献[28]分析了利用单日尺度的 GNSS

形变时间序列恢复南美大陆 TWS 变化的性能,发现基于南美大陆现有 GNSS 测站可恢复 TWS 变化的空间分辨率约为 300 km,与 GRACE 相当。总体而言,除了 GNSS 形变时间序列的精度以外,GNSS 反演结果的性能主要依赖于测站密集程度和分布情况。GRACE/GFO 和 GNSS 作为现代大地测量的两种重要观测手段,其反演的 TWS 变化可以相互检核。此外,由于 GRACE 和 GFO 卫星任务之间存在近 1 a 的数据缺失,由 GNSS 反演的 TWS 还可用于填补 GRACE 和 GFO 之间的数据空白<sup>[12,18,24]</sup>。

以中国云南省 TWS 变化反演为例,图 2 给出了由 GNSS、GRACE/GFO 和全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)陆面模型反演的云南省 2010-12—2021-02 期间 TWS 变化的周年振幅空间分布(修改自文献[42])。由图 2 可以看出,GNSS 反演结果与 GRACE/GFO 和 GLDAS 估计值保持很好的一致性,且都很好地揭示了云南省 TWS 变化信号从西南向东北逐渐减弱的趋势。但是 GNSS 信号振幅总体偏大,这是因为 GNSS 相比 GRACE/GFO 对局部水文负荷信号更为敏感。

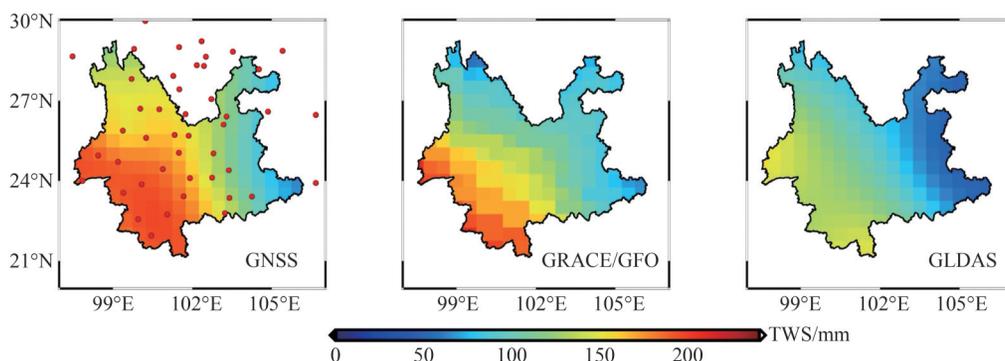


图2 云南省 2010-12—2021-02 期间不同反演策略计算的 TWS 变化周年振幅(修改自文献[42])

Fig. 2 Annual Amplitudes of TWS Changes in Yunnan Province Derived from Different Inversion Strategies from Dec. 2010 to Feb. 2021(Modified from Reference [42])

## 2.3 在区域水循环和极端气候变化研究中的应用

利用 GNSS 反演的 TWS 变化并结合水量平衡方程和独立的水文气象数据,可研究区域水循环过程及极端气候变化事件。例如,文献[51]利用 GNSS 反演的 TWS 变化基于水量平衡方程估计了美国密西西比河流域的蒸散发变化,结果表明 GNSS 估计结果与其他独立的蒸散发产品的相关性高于 0.8。文献[21]利用每天的 GNSS 垂直位移估计了美国西部内华达山脉的 TWS 变化,并结合其他水文气象数据揭示了次地表水(如土壤水和地下水)在区域水循环

过程中的重要性。文献[52]联合 GNSS 和 GRACE/GFO 反演了美国加利福尼亚中央峡谷和其源头流域的 TWS 变化,并结合水库和积雪数据估计了研究区域内的次地表水变化。文献[53-54]利用 GNSS 形变数据分别研究了中国云南省西部和陕甘宁地区的地下水变化,结果显示 GNSS 的估计结果与实测的地下水位数据保持很好的一致性。

由于 TWS 变化异常的亏损和盈余可作为量化极端干旱和洪涝事件的指标<sup>[55]</sup>,因此,GNSS 反演的高时空分辨率的 TWS 变化也可用

于研究局部短时间尺度的极端气候事件。例如,文献[11]首次将 GNSS 观测反演的 TWS 变化用于探测美国西部严重的干旱事件,结果显示由 GNSS 估计的水流失与降水和径流观测数据保持一致,表明 GNSS 观测可作为极端干旱的指示器。文献[17]利用 GNSS 估计了美国加利福尼亚山区 2012—2015 年间持续干旱导致的水流失量,但是水文模型低估了该亏损量级,表明 GNSS 在监测局部极端干旱的优势。文献[56]利用 GNSS 数据研究了 2017-08-26 发生于墨西哥湾的 Harvey 飓风带来的水质单日尺度的瞬时变化,表明 GNSS 观测网络可以很好地追踪由极端降雨事件导致的 TWS 变化的空间分布及瞬时发展态势,这对洪水预报和了解排水系统对大量涌水的响应具有重要意义。文献[29-30, 57-58]使用 GNSS 反演的 TWS 变化分别研究了云南和中国西南地区和巴西极端干旱事件,结果表明,基于 GNSS 反演 TWS 变化计算的水文干旱指数可以很好地揭示干旱的严重程度和持续时间。此外,文献[19, 59-60]也将 GNSS 反演的 TWS 变化用于美国西南地区和云南西南地区的极端干旱事件的研究。

以 2011—2021 年中国云南省干旱监测为例,图 3 比较了由 GNSS、GRACE/GFO 和 GLDAS 计算的水文干旱指数(terrestrial water storage-derived drought severity index, TWS-DSI)以及自校准帕尔默干旱指数(self-calibrating Palmer drought severity index, scPDSI)和标准化降雨蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)两种气象干旱指数(修改自文献[42])。其中,浅灰色区域表示研究时段内两次严重的干旱事件(2011 年夏季至 2012 年夏季,2019 年夏季至 2020 年夏季)。表 1 则统计了水文干旱指数和气象干旱指数时间序列之间的相关系数。由图 3 可知,不同的水文干旱指数总体与气象干旱指数保持很好的一致性,且都很好地揭示了研究时段内先上升后下降的变化趋势以及两次严重的干旱事件。由表 1 可知,在云南省由 TWS 计算的水文干旱指数与 scPDSI 的相关性更好,且 GNSS 与气象干旱指数的相关性居于 GRACE/GFO 和 GLDAS 结果之间,说明利用 GNSS 反演的 TWS 变化探测极端气候事件(如干旱)是可行和有效的。

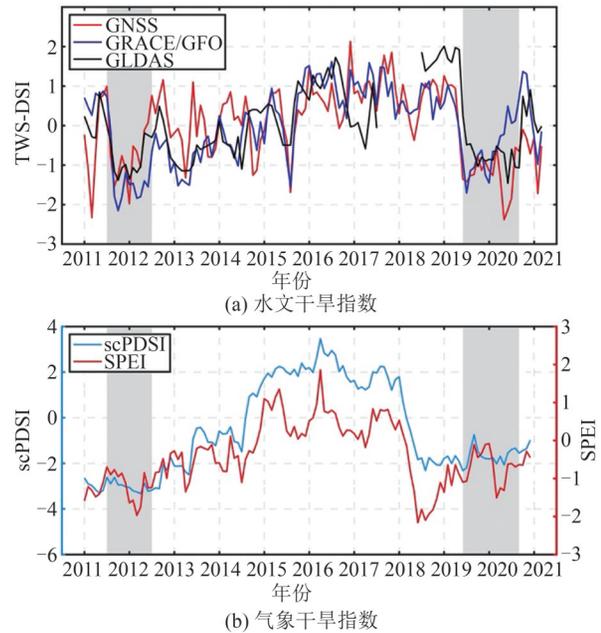


图 3 云南省 2011—2021 年不同水文干旱指数和气象干旱指数(修改自文献[42])

Fig. 3 Different Hydrological and Meteorological Drought Indices in Yunnan Province from 2011 to 2021 (Modified from Reference [42])

表 1 不同水文干旱指数与气象干旱指数的相关系数  
Tab. 1 Correlation Coefficients Between Different Hydrological and Meteorological Drought Indices

气象干旱指数	水文干旱指数		
	GNSS	GRACE/GFO	GLDAS
scPDSI	0.41	0.40	0.54
SPEI	0.28	0.19	0.32

### 3 存在的主要问题及发展趋势

#### 3.1 GNSS 形变数据的精细处理

受到人类活动、设备更换以及外界环境变化等多种因素的影响,原始 GNSS 形变时间序列中存在数据空白、跳跃和粗差等,需要使用一系列后处理方法(包括粗差去除、阶跃探测和数据插值等)来获得连续可靠的时间序列。此外,虽然 GNSS 相比传统的 GRACE/GFO 卫星观测具有近实时观测的优势,但其复杂的噪声特性(包括白噪声、闪烁噪声和随机游走噪声等)导致单天解估计结果的不确定性很大。因此,为了削弱噪声的影响,当前多数研究是通过将单天解平均到月(次月)尺度,与 GRACE/GFO 进行对比并应用于水文学研究。为了充分发挥 GNSS 近实时监测的优势,需要开发和研究更加优化的精密数据处理方法和完备的地球物理模型以提取“干净”的水文负荷形变<sup>[61]</sup>。

GNSS形变时间序列包含了丰富的地球物理信息,既包括由板块构造和冰后回弹等长期地壳运动触发的线性变化,也包括由非潮汐大气和海洋负荷以及水文负荷等导致的非线性变化<sup>[6]</sup>。当前的处理策略主要是利用不同的地球物理模型扣除GNSS坐标时间序列中非水文负荷信号,但不同的地球物理模型的精度和可靠性有限,这对准确估计TWS变化的时空特征产生了重要影响。在外部地球物理模型的可靠性短期内很难获得极大提升的背景下,为了提取有效的水文负荷信号,不同研究基于统计分析算法来提高TWS变化的可靠性。例如,文献[25]和文献[62]分别利用变分主成分分析方法和独立成分分析方法提取GNSS形变时间序列中主要的水文负荷信号,在降低数据误差影响的同时提高了反演结果的可靠性。此外,文献[59]通过变分贝叶斯独立成分分析方法,有效分离了GNSS形变时间序列中的交点年误差。但是,这些统计分析方法都是从信号分解的角度出发以获得更加真实的水文负荷信号,而非水文负荷模型引起的改正偏差仍需要进一步深入研究。

### 3.2 三维地表形变数据的联合反演

虽然GNSS垂直形变相比水平形变对质量负荷变化更为敏感,但水平形变观测精度更高,因此有必要将垂直和水平形变观测综合利用起来,通过联合反演得到更加可靠的TWS变化。文献[31]的研究结果表明,相比垂直形变,水平形变可以对质量负荷变化的空间位置进行更好的约束。文献[63]通过数值模拟实验表明,在当前GNSS地表形变观测的精度水平下,联合三维形变数据的反演结果比单独的垂直形变反演结果的可靠性提高了约10%。文献[59-60]则利用实测的GNSS三维形变数据反演了中国西南地区的TWS变化,并用于研究极端水文干旱事件。

尽管联合GNSS三维形变数据有望在实测数据反演中获得更加可靠的解,但仍有许多问题亟需进一步解决。例如,文献[59-60, 63]在联合反演模型中将垂直形变和水平形变观测的贡献做等权处理,这种简单的定权策略可能会降低联合反演的实际效果,因为垂直形变和水平形变分量的信号振幅、噪声水平以及对质量负荷变化敏感性等方面的差异决定了不同分量对最终联合解的贡献有所不同。此外,由于水平形变的信号振幅偏小,在通过外部地球物理模型扣除非水文信号的贡献时,其更容易受到模型误差的影

响<sup>[63]</sup>。因此,如何有效地联合实测的GNSS三维形变数据反演更加稳定和可靠的TWS变化仍然存在挑战性。

### 3.3 与其他大地测量数据的联合反演

受到地形条件的限制及各地区经济发展的差异,并非所有地区都布设有GNSS站点,GNSS站点在经济比较发达的国家和地区(如美国和日本)或者板块构造运动活动明显的区域分布较为密集。当前利用GNSS反演TWS变化主要是针对有GNSS测站分布的区域,而没有测站分布的区域仍旧需要依靠卫星测量手段(例如GRACE/GFO)和水文模型进行观测和模拟。在经济和自然环境条件允许的前提下,布设更多的GNSS测站有利于对区域TWS变化进行连续监测,但建设和维护基准站需要耗费大量的人力、物力和财力。为此,基于现有的观测数据和模型产品,可将多源大地测量和水文气象数据产品进行融合处理以获得更加可靠的TWS变化。

考虑到GNSS和GRACE/GFO在时空分辨率、空间覆盖以及频谱敏感范围等方面的互补性,可以联合GNSS和GRACE/GFO数据反演更加稳定和可靠的TWS变化。联合GNSS和GRACE/GFO数据反演区域TWS变化已取得一定的进展,目前主要有两种模式。一是将GRACE/GFO观测的TWS变化转换为一系列虚拟观测站的垂直形变,然后将GNSS和GRACE/GFO获得的形变进行联合反演<sup>[59-60, 64-66]</sup>。例如,文献[64]在GNSS测站分布稀疏的云南省边缘区域设置GRACE形变虚拟观测站,通过联合GNSS和GRACE形变数据提高了整个研究区域内TWS变化的可靠性。但是,将其GNSS和GRACE监测的形变时间序列在联合反演模型中做等权处理,这与GNSS和GRACE的测站分布以及对TWS变化的频谱敏感性存在差异的情况不符。为此,以长江流域的TWS变化反演为例,文献[65]将GRACE/GFO mascon格网产品转换为研究区域范围内 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 间隔均匀分布测站的形变时间序列,与GNSS垂直形变进行联合反演,并讨论了两种常用的定权策略(方差分量估计和Akaike信息准则)对反演结果的影响。图4为长江流域2005年各月份不同反演结果与原始信号的TWS变化时间序列及其差值的均方根误差(root mean square error, RMSE)和相关系数(correlation coefficient, CC)(改自文献[65])。表2统计了不同反演结果与原始信号

时间序列之间的平均 RMSE 和 CC。由图 4(a) 可知,GNSS、GRACE 以及联合反演结果总体与原始输入信号保持很好的一致性,但是联合反演对应的平均 RMSE 更小且相关性更高(参见图 4(b)、4(c)和表 2),表明联合反演相对单独的 GNSS 或 GRACE,可获得的 TWS 变化的可靠性和精度更高。

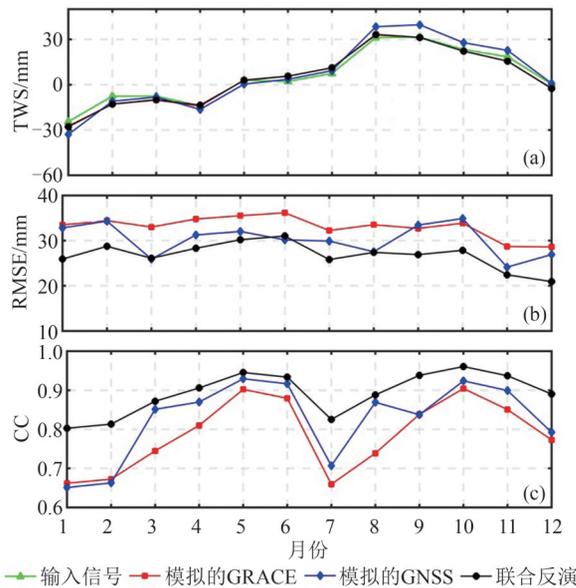


图 4 不同反演结果与原始信号及其差值的均方根误差和相关系数(修改自文献[65])

Fig. 4 Comparison of Different Inversion Results with Input Signals and the Corresponding RMSE of Differences and CC(Modified from Reference [65])

表 2 不同反演结果对应的平均 RMSE 和 CC

Tab. 2 Mean RMSE and CC Derived from Different Inversion Results

指标	GNSS	GRACE	联合反演
RMSE/mm	33.08	30.05	26.80
CC	0.79	0.83	0.89

另一种联合反演模式是将 GNSS 形变观测与 GRACE/GFO 获得的 TWS 变化(例如 JPL GRACE/GFO mascon 产品)直接进行联合反演<sup>[52, 67-68]</sup>。例如,文献[67]利用 GRACE 结果对 GNSS 垂直位移进行约束反演,得到了美国本土 2007—2017 年周时间尺度、分辨率比 GRACE 更高的 TWS 变化,证明了联合反演的有效性。文献[68]基于同样的策略联合反演了美国加利福尼亚和内华达西部区域的 TWS 变化,并通过引入时变随机模型来提高联合反演结果的可靠性。

虽然联合 GNSS 和 GRACE/GFO 获得了更加可靠的 TWS 变化,但是 GRACE/GFO 在时空

分辨率上的不足在一定程度上限制了联合反演的性能。因此,为了获得时空分辨率更高的 TWS 变化,可考虑将 GNSS 地表形变观测与 GRACE/GFO Level 1b 级数据或其他大地测量观测技术(如合成孔径雷达干涉测量)进行联合反演。此外,随着地面观测、卫星遥感及陆面模型等数据的不断累积,将多源数据进行数据同化也是水文大地测量领域的一个热点方向<sup>[16]</sup>。例如,文献[69-71]分别将不同的大地测量观测数据同化到陆面模型以提高 TWS 变化估计的时空分辨率和精度。

## 4 结 语

GNSS 地表形变反演的区域 TWS 变化是 GNSS 观测在水文大地测量学领域的新应用,其对局部水质负荷变化的敏感性以及近实时监测的特性,特别适用于研究区域水循环过程、瞬时的极端气候事件以及改进陆面模型的精度和可靠性等,可作为现有卫星重力测量技术 GRACE/GFO 的有益补充。近年来,随着 GNSS 数据的不断积累和反演算法的日趋成熟,利用 GNSS 地表形变反演区域 TWS 变化取得了重要进展。本文介绍了 GNSS 反演区域 TWS 变化的基本原理与反演方法,探讨了 GNSS 反演 TWS 变化中解的稳定性及时空分辨能力,评述了其反演的高时空分辨率的 TWS 变化在区域水循环和极端气候变化等研究中的应用进展。同时,对当前存在的主要问题进行了分析和总结,并对未来发展趋势进行了展望。尽管 GNSS 地表形变监测拓展了人们对区域 TWS 变化的认知和了解,但现有的水文负荷信号的准确分离和测站分布不均等问题限制了其应用潜力。因此,如何提取“干净”的水文负荷形变时间序列以及与其他大地测量数据进行联合反演和数据同化处理将是今后一段时期内的重点研究课题。

## 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): 2705-2723.
- [2] Rodell M, Famiglietti J S, Wiese D N, et al. Emerging Trends in Global Freshwater Availability [J]. *Nature*, 2018, 557(7707): 651-659.
- [3] Xu Houze, Lu Yang, Zhong Min, et al. Satellite

- Gravimetry and Its Application in Monitoring the Change of Geophysical Environment[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2012, 42(6): 843-853. (许厚泽, 陆洋, 钟敏, 等. 卫星重力测量及其在地球物理环境变化监测中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 843-853.)
- [4] Long D, Scanlon B R, Longuevergne L, et al. GRACE Satellite Monitoring of Large Depletion in Water Storage in Response to the 2011 Drought in Texas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(13): 3395-3401.
- [5] Tapley B D, Watkins M M, Flechtner F, et al. Contributions of GRACE to Understanding Climate Change[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(5): 358-369.
- [6] Jiang Weiping, Wang Kaihua, Li Zhao, et al. Prospect and Theory of GNSS Coordinate Time Series Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2112-2123. (姜卫平, 王锴华, 李昭, 等. GNSS坐标时间序列分析理论与方法及展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2112-2123.)
- [7] Farrell W E. Deformation of the Earth by Surface Loads[J]. *Reviews of Geophysics*, 1972, 10(3): 761-797.
- [8] Blewitt G, Lavallée D, Clarke P, et al. A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected[J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2342-2345.
- [9] Wu X P, Hefflin 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): 1742.
- [10] 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.
- [11] Borsa A A, Agnew D C, Cayan D R. Ongoing Drought-Induced Uplift in the Western United States[J]. *Science*, 2014, 345(6204): 1587-1590.
- [12] Rietbroek R, Fritsche M, Dahle C, et al. Can GPS-derived Surface Loading Bridge a GRACE Mission Gap?[J]. *Surveys in Geophysics*, 2014, 35(6): 1267-1283.
- [13] Zhang X G, Jin S G, Lu X C. Global Surface Mass Variations from Continuous GPS Observations and Satellite Altimetry Data[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1000.
- [14] Bevis M. Seasonal Fluctuations in the Mass of the Amazon River System and Earth's Elastic Response[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(16): L16308.
- [15] Heki K. Seasonal Modulation of Interseismic Strain Buildup in Northeastern Japan Driven by Snow Loads[J]. *Science*, 2001, 293(5527): 89-92.
- [16] 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.
- [17] Argus D F, Landerer F W, Wiese D N, et al. Sustained Water Loss in California's Mountain Ranges During Severe Drought from 2012 to 2015 Inferred from GPS[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(12): 10559-10585.
- [18] 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.
- [19] Jin S G, Zhang T Y. Terrestrial Water Storage Anomalies Associated with Drought in Southwestern USA from GPS Observations[J]. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37(6): 1139-1156.
- [20] Enzinger 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.
- [21] Enzinger T L, Small E E, Borsa A A. Subsurface Water Dominates Sierra Nevada Seasonal Hydrologic Storage[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(21): 11993-12001.
- [22] 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.
- [23] Hsu Y J, Fu Y N, Bürgmann R, et al. Assessing Seasonal and Interannual Water Storage Variations in Taiwan, China Using Geodetic and Hydrological Data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 550: 116532.
- [24] Zhong B, Li X P, Chen J L, et al. Surface Mass Variations from GPS and GRACE/GFO: A Case Study in Southwest China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1835.
- [25] 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.
- [26] Shen Y F, Zheng W, Yin W J, et al. Inverted Algorithm of Terrestrial Water-Storage Anomalies Based on Machine Learning Combined with Load Model and Its Application in Southwest China [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3358.
- [27] 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.
- [28] Ferreira V, Ndehedehe C, Montecino H, et al. Prospects for Imaging Terrestrial Water Storage in South America Using Daily GPS Observations [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 679.
- [29] Jiang Z S, Hsu Y J, Yuan L G, et al. Insights into Hydrological Drought Characteristics Using GNSS-Inferred Large-Scale Terrestrial Water Storage Deficits [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 578: 117294.
- [30] Tang M, Yuan L G, Jiang Z S, et al. Characterization of Hydrological Droughts in Brazil Using a Novel Multiscale Index from GNSS [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128934.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Tikhonov A N. On the Solution of Ill-Posed Problems and the Method of Regularization [J]. *Russian Academy of Sciences*, 1963, 151(3): 501-504.
- [34] Hansen P C. Analysis of Discrete Ill-Posed Problems by Means of the L-curve [J]. *SIAM Review*, 1992, 34(4): 561-580.
- [35] Golub G H, Heath M, Wahba G. Generalized Cross-Validation as a Method for Choosing a Good Ridge Parameter [J]. *Technometrics*, 1979, 21(2): 215-223.
- [36] 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. (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.)
- [37] Slepian D. Some Comments on Fourier Analysis, Uncertainty and Modeling [J]. *SIAM Review*, 2006, 25(3): 379-393.
- [38] Simons F J, Dahlen F A. Spherical Slepian Functions and the Polar Gap in Geodesy [J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(3): 1039-1061.
- [39] Dahlen F A, Simons F J. Spectral Estimation on a Sphere in Geophysics and Cosmology [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 174(3): 774-807.
- [40] Han S C, Razeghi S M. GPS Recovery of Daily Hydrologic and Atmospheric Mass Variation: A Methodology and Results from the Australian Continent [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(11): 9328-9343.
- [41] 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. (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.)
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Lai Y R, Wang L, Bevis M, et al. Truncated Singular Value Decomposition Regularization for Estimating Terrestrial Water Storage Changes Using GPS: A Case Study over Taiwan, China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3861.
- [45] 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. (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.)
- [46] Shen Y F, Zheng W, Yin W J, et al. Improving the Inversion Accuracy of Terrestrial Water Storage Anomaly by Combining GNSS and LSTM Algorithm and Its Application in China's Mainland [J].

- Remote Sensing*, 2022, 14(3): 535.
- [47] Jiang Z S, Hsu Y J, Yuan L G, et al. Estimation of Daily Hydrological Mass Changes Using Continuous GNSS Measurements in China's Mainland[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126349.
- [48] Cheng Shuai, Yuan Linguo, Jiang Zhongshan, et al. Investigating Terrestrial Water Storage Change in Sichuan, Yunnan and Chongqing Using Slepian Basis Functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(4): 1167-1180. (成帅, 袁林果, 姜中山, 等. 应用GPS数据和Slepian基函数反演川云渝地区陆地水储量变化[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(4): 1167-1180.)
- [49] Tang Miao, Zhong Ping, Jiang Zhongshan, et al. Investigation of Spatiotemporal Characteristics of Terrestrial Water Storage Changes in the Yangtze River Basin Using GNSS Vertical Displacement Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(10): 3780-3796. (汤苗, 钟萍, 姜中山, 等. 利用GNSS垂直位移研究长江流域陆地水储量变化的时空分布特征[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(10): 3780-3796.)
- [50] Li X P, Zhong B, Li J C, et al. Inversion of GNSS Vertical Displacements for Terrestrial Water Storage Changes Using Slepian Basis Functions [J]. *Earth and Space Science*, 2023, 10(2): e2022EA002608.
- [51] Zhang T Y, Jin S G. Evapotranspiration Variations in the Mississippi River Basin Estimated from GPS Observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4694-4701.
- [52] Argus D F, Martens H R, Borsa A A, et al. Sub-surface Water Flux in California's Central Valley and Its Source Watershed from Space Geodesy[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(22): e2022GL099583.
- [53] Xu P F, Jiang T, Zhang C Y, et al. Recovering Regional Groundwater Storage Anomalies by Combining GNSS and Surface Mass Load Data: A Case Study in Western Yunnan[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 4032.
- [54] Li W Q, Zhang C Y, Wang W, et al. Inversion of Regional Groundwater Storage Changes Based on the Fusion of GNSS and GRACE Data: A Case Study of Shaanxi - Gansu - Ningxia [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(2): 520.
- [55] Zhao M, Geruo A, Velicogna I, et al. Satellite Observations of Regional Drought Severity in the Continental United States Using GRACE-based Terrestrial Water Storage Changes [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(16): 6297-6308.
- [56] Milliner C, Materna K, Bürgmann R, et al. Tracking the Weight of Hurricane Harvey's Stormwater Using GPS Data [J]. *Science Advances*, 2018, 4(9): eaau2477.
- [57] 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.
- [58] 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. (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.)
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Peidou A, Argus D, Landerer F, et al. GPS Displacement Dataset for Study of Elastic Surface Mass Variations [J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2023, 1: 1-23.
- [62] 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.
- [63] Wang S Y, Li J, Chen J L, et al. On the Improvement of Mass Load Inversion with GNSS Horizontal Deformation: A Synthetic Study in Central China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(10): e2021JB023696.
- [64] Fok H S, Liu Y X. An Improved GPS-Inferred Seasonal Terrestrial Water Storage Using Terrain-Corrected Vertical Crustal Displacements Constrained by GRACE [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1433.
- [65] Li X P, Zhong B, Li J C, et al. Joint Inversion of

- GNSS and GRACE/GFO Data for Terrestrial Water Storage Changes in the Yangtze River Basin[J]. *Geophysical Journal International*, 2023, 233(3): 1596-1616.
- [66] Yang X H, Yuan L G, Jiang Z S, et al. Investigating Terrestrial Water Storage Changes in Southwest China by Integrating GNSS and GRACE/GRACE-FO Observations [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 48: 101457.
- [67] Adusumilli S, Borsa A A, Fish M A, et al. A Decade of Water Storage Changes Across the Contiguous United States from GPS and Satellite Gravity [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 13006-13015.
- [68] Carlson G, Werth S, Shirzaei M. Joint Inversion of GNSS and GRACE for Terrestrial Water Storage Change in California[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2022, 127(3): e2021JB023135.
- [69] Zaitchik B F, Rodell M, Reichle R H. Assimilation of GRACE Terrestrial Water Storage Data into a Land Surface Model: Results for the Mississippi River Basin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(3): 535-548.
- [70] Yin G H, Forman B A, Wang J. Assimilation of Ground-based GPS Observations of Vertical Displacement into a Land Surface Model to Improve Terrestrial Water Storage Estimates[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(2): e2020WR028763.
- [71] Chen K, Liu G X, Xiang W, et al. Assimilation of SBAS-InSAR Based Vertical Deformation into Land Surface Model to Improve the Estimation of Terrestrial Water Storage[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 2826-2835.