

段天奇, 占伟, 苏广利, 等. 2024. 基于 GNSS 观测的陆地水储量研究进展[J]. 地震研究, 47(3): 369–378, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0038.

Duan T Q, Zhan W, Su G L, et al. 2024. Progress in terrestrial water storage research based on GNSS observation[J]. Journal of Seismological Research, 47(3): 369–378, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0038.

# 基于 GNSS 观测的陆地水储量研究进展\*

段天奇<sup>1</sup>, 占伟<sup>2\*</sup>, 苏广利<sup>2</sup>, 刘 晓<sup>2</sup>

(1. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384; 2. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

**摘要:** 介绍了基于质量负荷理论利用 GNSS 观测反演陆地水储量的方法, 阐述了利用 GNSS 研究陆地水储量的进展、应用和发展趋势, 以及 GNSS 与 GRACE、水文模型等的联合研究。随着 GNSS 观测精度的不断提升和观测网络的迅猛发展, 利用 GNSS 观测研究陆地水储量取得了重要进展。GNSS 已成为陆地水储量监测的重要手段, 在中国大陆地区利用 GNSS 研究陆地水储量具有巨大的潜力和前景, 但仍需要在时间序列信号精细识别、反演算法优化和多源数据融合等方面深入研究。

**关键词:** GNSS; 陆地水储量; 质量负荷理论; 反演

**中图分类号:** TV21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)03-0369-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0038

## 0 引言

陆地水是水资源中重要的组成部分, 包含地表水、土壤水、地下水等, 在人类生活和社会发展中是不可或缺的 (Famiglietti *et al.*, 2011; Long *et al.*, 2014), 科学认识陆地水变化规律是对陆地水资源进行合理开发利用的前提。由于全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 连续观测具有低成本和高时间分辨率等优点, 可以与重力恢复和气候实验卫星 (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)、全球水文模型等其它技术相结合并优势互补。近年来, 全球范围内已经建立了密集的 GNSS 连续观测网络 (姜卫平, 2017), 在监测陆地水储量方面得到了广泛应用, 成为监测陆地水储量的利器 (Enzminger *et al.*, 2018; Adusumilli *et al.*, 2019; White *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023a)。在暴雨等极端天气下, GNSS 连续观测拥有近实时监控和潜在灾害预警的巨

大潜力 (Milliner *et al.*, 2018; Zhan *et al.*, 2021; Heki, Arief, 2022; 谭争光等, 2022)。

利用 GNSS 研究陆地水储量经历了“验证—应用—分离”的过程。本文首先介绍基于 GNSS 数据反演陆地水储量的方法, 然后介绍 GNSS 反演陆地水储量的研究进展, 并分析其发展趋势。

## 1 GNSS 反演陆地水储量方法

### 1.1 质量负荷理论

地表点质量源引力位如图 1 所示。如果将地球视为近似规则的球体, 根据万有引力定律, 地球上某一点引力位  $\Phi$  的计算公式为:

$$\Phi = \frac{Gm}{\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos\theta}} \quad (1)$$

式中:  $G$  表示引力常量;  $m$  表示点源的质量;  $R$  表示地球平均半径;  $r$  表示点位与地球中心的距离;  $\theta$  表示点位间的角距离。

\* 收稿日期: 2023-08-09.

**基金项目:** 地震科技星火计划项目 (XH23056YA); 国家自然科学基金 (42204008); 中国地震局第一监测中心科研项目 (FMC2022014).

**第一作者简介:** 段天奇 (1998-), 硕士研究生在读, 主要从事 GNSS 地壳形变研究. E-mail: 2571391853@qq.com.

**通信作者简介:** 占伟 (1983-), 研究员, 主要从事 GPS 数据处理及分析研究工作. E-mail: zw000373@163.com.

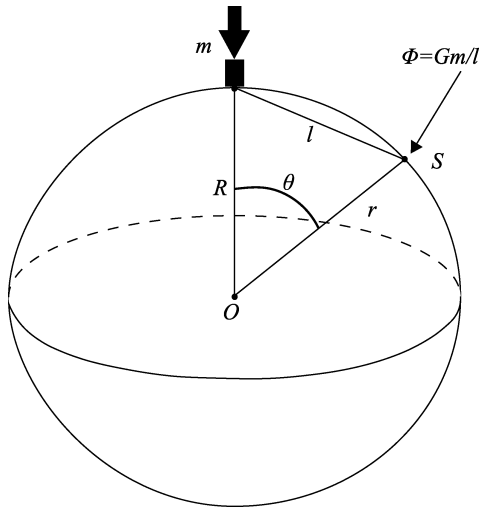


图1 地表点质量源引力位示意图 (据沈迎春, 2021)

Fig. 1 A sketch of the gravitational position of a surface point mass source (according to Shen, 2021)

基于 Farrell (1972) 所提出的地壳负荷形变理论, 结合引力位函数相, 通过地壳负荷形变量求得单位质量的点负荷所产生的垂直和水平方向的形变量, 表示为:

$$\begin{cases} u_r = \sum_n h'_k \frac{1}{g_R} \frac{G}{R} P_n(\cos\theta) = \frac{R}{M_e} \sum_n h'_n P_n(\cos\theta) \\ u_\theta = \sum_n l'_h \frac{1}{g_R} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \theta} = \frac{R}{M_e} \sum_n l'_h \frac{1}{g_R} \frac{\partial P_n(\cos\theta)}{\partial \theta} \end{cases} \quad (2)$$

地表负荷造成的垂直形变会随着离负荷距离的增大而迅速减小, 如图 2 所示: 以圆盘半径 7 km、等效水深 4 m、约 0.62 Gt 负荷为例, 距离圆盘中心 10 km 处的垂向形变小于距离圆盘中心 5 km 垂直形变的一半, 距离圆盘中心 20 km 处的垂向形变小于距离圆盘中心 10 km 垂直形变的一半。

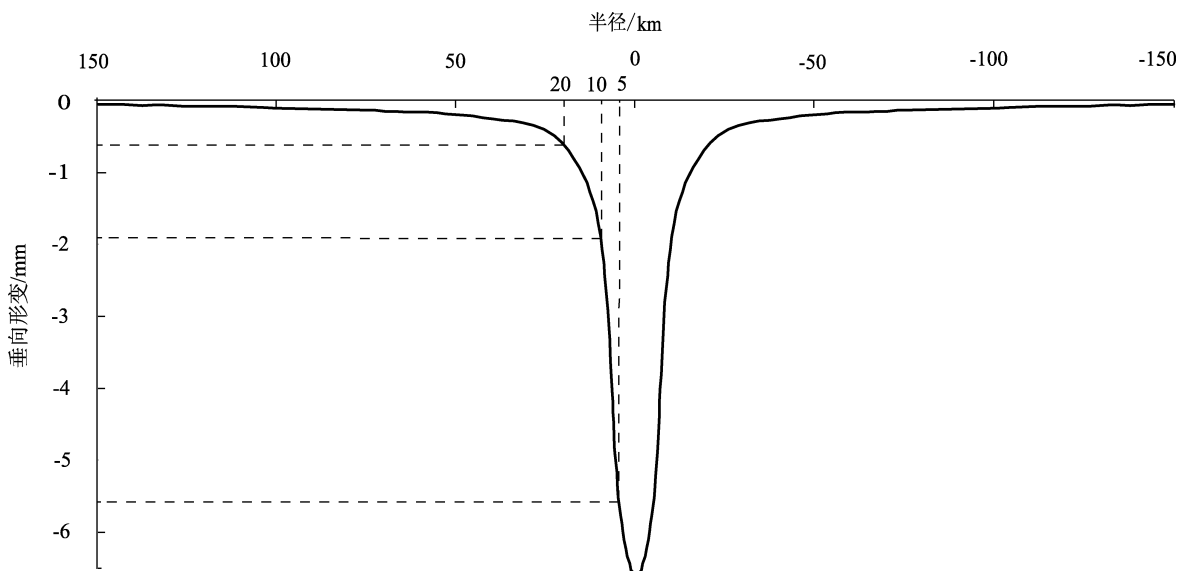


图2 圆盘半径 7 km、等效水深 4 m 时的地面负荷造成的地表垂直运动示意图

Fig. 2 A sketch of the vertical surface movement due to ground loading for a disk radius of 7 kilometers and an equivalent water depth of 4 meters

目前计算负荷与地壳位移之间联系的方法主要有格林函数积分法、球谐函数法及 Slepian 基函数法。这 3 种方法都是基于地球初始参考模型 (Preliminary reference earth model, PREM) 质量负荷引起垂直位移的计算方法。负荷格林函数为单一点负荷的垂向基函数, 主要用于解决单位质量的点负荷问题 (Guo, 2004)。球谐函数主要用于描述质量源在地球外部产生引力位的作用, 对于地球表面流体质量变化可以将其看成连续球面函数并进行球谐函

数展开 (Hofmann - Welenhof, Moritz, 2005)。Slepian 基函数是一种常用的球面径向基函数, 相较前两种方法, 它可以有效减少信号泄露, 提高结果的信噪比 (Albertella *et al*, 1999)。

## 1.2 质量负荷反演理论

首先, 设  $U$  表示观测到的垂直位移,  $m$  表示区域网格质量模型,  $G$  表示通过负荷格林函数建立的系数矩阵。在完全理想的情况下, 观测数  $n$  与模型  $t$  相等 ( $n=t$ ), 且系数矩阵  $G$  存在逆矩阵, 则

可以求得：

$$\mathbf{m} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{U} \quad (3)$$

获得质量模型  $\mathbf{m}$  是基本的反演过程，可以通过直接求  $\mathbf{G}$  的逆系数阵来实现这一线性观测函数。然而实际的地球物理反演比较复杂，通常表现为欠定问题，需要添加约束条件建立约束矩阵，在求解法方程后得到约束解析式。

在计算中通常进行 Tikhonov 正则化 (Tikhonov, Arseninn, 1977)，加入正则化因子  $\lambda^2$ ，其求解结果如下：

$$\mathbf{m} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{U} \quad (4)$$

Argus 等 (2014, 2017, 2022) 在反演过程中

$$\left\| \mathbf{W} \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{G}_{g,i} & \mathbf{G}_{g,c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{h}_{w,i} \\ \mathbf{h}_{w,c} \end{pmatrix} - \mathbf{U} \right\} \right\|_2^2 + \lambda^2 \left\| \mathbf{L}_o \begin{pmatrix} \mathbf{h}_{w,i} \\ \mathbf{h}_{w,c} \end{pmatrix} \right\|_2^2 = \min \quad (6)$$

式中： $\mathbf{h}_{w,i}$  和  $\mathbf{h}_{w,c}$  分别为研究区内和扩展边界外的质量负荷模型； $\mathbf{G}_{g,i}$  和  $\mathbf{G}_{g,c}$  分别为格林函数得到的系数矩阵和约束矩阵； $n$ 、 $q$  和  $s$  分别为向量  $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{h}_{w,i}$  和  $\mathbf{h}_{w,c}$  的维度信息。通过此方法可以对区域质量的圆盘反演起约束作用。

Wang 等 (2022) 在反演过程中，加入了 GNSS 水平位移，使用格林函数  $G(\psi)$  的卷积积分计算由多个质量负荷源  $q(\theta', \varphi')$  引起的点位移  $b(\theta, \varphi)$ ，式 (7) 为曲面变形对质量负荷的反演：

$$\left\| \begin{bmatrix} G(\psi) \\ \beta \mathbf{L} \end{bmatrix} q(\theta', \varphi') - \begin{bmatrix} b(\theta, \varphi) \\ 0 \end{bmatrix} \right\| = \min \quad (7)$$

式中： $q$  表示最小二乘的反演质量，并且假设水平分量和垂直分量是等权的； $\beta$  是平滑因子，用于调整质量的最小二乘拟合和平滑度之间的相对权重； $\mathbf{L}$  是拉普拉斯算子，有 3 种表现形式，分别对应与网格位置位于角落 (2 个相邻斑块)、边缘 (3 个相邻斑块)、其他地方 (4 个相邻斑块)。

Carlson 等 (2022) 使用 GNSS 和 GRACE 数据联合反演，反演公式类似于式 (5)，联合反演的权重矩阵为：

引入正则化参数和拉普拉斯算子，其目标函数为：

$$\left\| \mathbf{W} \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{G}_{g,i} & \mathbf{h}_{w,i} \end{pmatrix} - \mathbf{U} \right\} \right\|_2^2 + \lambda^2 \left\| \mathbf{L}_i \mathbf{h}_{w,i} \right\|_2^2 = \min \quad (5)$$

式中： $\mathbf{W}$  为 GNSS 垂向位移权重； $\mathbf{h}_{w,i}$  为第  $i$  个网格内的等效水高； $\mathbf{G}_{g,i}$  表示负荷格林函数的系数矩阵； $\mathbf{L}$  为拉普拉斯算子； $\lambda^2$  为正则化参数； $n$  为垂向位移数值； $q$  为研究区内的格网数量。

由于反演过程中的负荷格林函数卷积是对全球范围进行计算，而一般情况下反演只是针对某一个小区域进行计算，因此研究区外的负荷形变会被当成噪声从而影响反演结果。为了减小这个影响，可以对质量模型参数及其约束矩阵扩充，以降低外部区域对研究区内质量反演造成的影响。式 (5) 可以变化为 (沈迎春, 2021)：

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \alpha \sum_D^{-1} & 0 \\ 0 & (1 - \alpha) \sum_G^{-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $\sum_D$  和  $\sum_G$  分别为 GNSS 和 GRACE 观测值的对角方差 - 协方差矩阵； $\alpha$  为 0 ~ 1 之间的数值，表示 GRACE 和 GNSS 的相对权重。

## 2 GNSS 反演陆地水储量研究进展

### 2.1 GNSS 反演陆地水储量的验证与应用

#### 2.1.1 GNSS 反演陆地水储量的验证

固体地球在水、雪、冰和大气等负荷作用下会产生弹性形变。研究表明，GNSS 记录的垂直位移与陆地水变化相关：当负荷增加时，地面下降，附近 GNSS 站点会向下并向负荷源方向移动；当负荷减小时地面反弹，附近 GNSS 站点会向上并远离负荷源方向移动。Van Dam 和 Wahr (1998) 发现 GNSS 观测的位移时间序列包含了可以用来监测陆地水储量等地表负荷变化产生的地壳形变。Heki 等 (2001) 将雪深数据与 GNSS 观测到的垂直表面

位移进行比较,证明可以根据 GNSS 观测到的形变估计水文负荷。Dong 等 (2002) 研究表明,GNSS 时间序列中的地球系统质量周期性变化主要是由陆地水储量迁移、大气负荷、非潮汐海洋负荷等多种因素综合作用导致的,并提出可以通过去除其它分量来研究一种负荷的影响。Heki (2004) 对主导日本季节性质量变化因素的研究表明,利用 GNSS 垂向时间序列可以有效地监测陆地水文负荷的季节性变化,并可以对 GRACE 起到补充作用。Bevis 等 (2005) 研究认为 GNSS 观测能够对

周围 100 km 范围内的负荷变化产生响应,获取高时间分辨率 (天尺度) 陆地水储量空间变化信息。

随着研究的不断深入,Argus 等 (2014) 利用美国加州地区密集的 GNSS 连续观测网络数据研究了该地区的陆地水储量空间变化,对该地区陆地水储量反演结果与 GRACE 和全球水文模型结果进行了对比,发现三者有很好的一致性。研究表明 GNSS 能够给出高空间分辨率 (小于 50 km) 的陆地水储量变化,可以成为独立的陆地水储量变化监测手段 (图 3)。

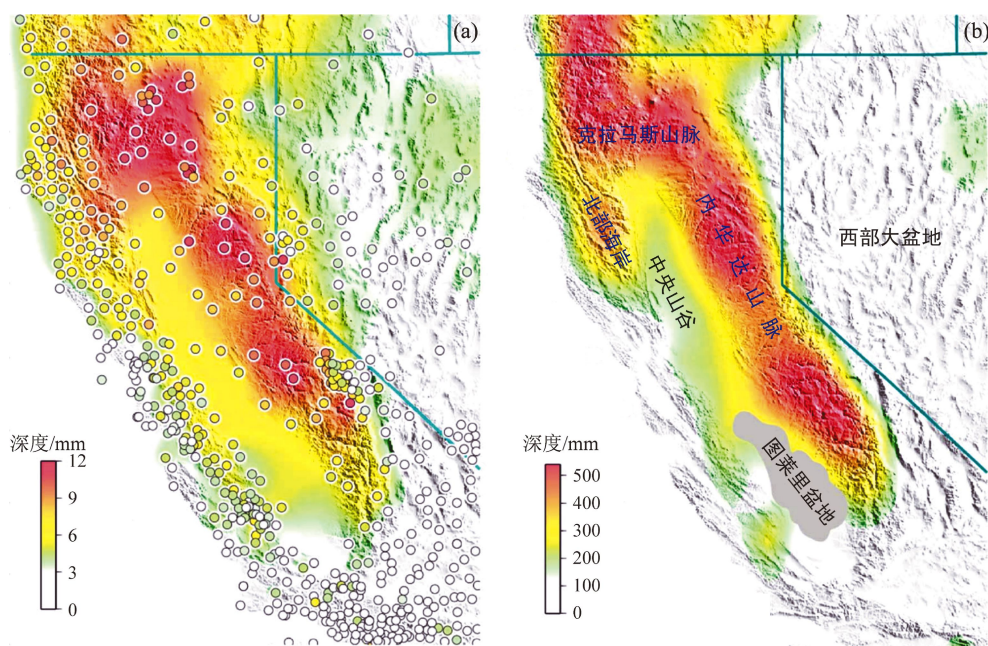


图 3 GNSS 观测到的美国加州地区地表抬升 (a) 和利用 GNSS 位移反演的该地区等效水深变化 (b) (据 Argus 等, 2014)

Fig. 3 The average uplift (a) observed with GNSS compared with the inferred average increase (b) in equivalent water thickness in California, USA (according to Argus *et al.*, 2014)

### 2.1.2 GNSS 反演陆地水储量的应用

美国学者 Argus 在陆地水储量研究领域取得较大进展,其发表的 3 篇论文具有较好的代表性,完整勾勒出利用 GNSS 监测陆地水储量研究从验证到应用的过程,研究手段从单一的 GNSS 手段到 GNSS、GRACE、全球水文模型等多手段联合等过程。Argus 等 (2017) 还利用 GNSS 观测数据估算了 2012—2015 年美国加州 4 个地区干旱和强降雨期间陆地水储量在时间上的动态变化,为固体地球弹性响应的评估以及水资源管理提供参考。Ar-

gus 等 (2022) 整合美国加州中央山脉 GNSS、GRACE、水库水和积雪数据,通过从 GNSS 和 GRACE 联合计算得到的总陆地水储量中扣除积雪、土壤水等成分,细化、分离该地区地下水的变化。

在过去的 10 年中,基于 GNSS 的陆地水储量研究有了更广泛的应用,越来越多的成果应用于全球范围内的陆地水储量研究 (Zhan 等, 2017, Fok, Liu, 2019; Hsu 等, 2020; Jiang 等, 2021; Zhu 等, 2023; Ferreira 等, 2018; Young 等, 2021, Silverii 等, 2016; Pintori, Serpelloni,

2023)。Borsa 等 (2014) 基于美国西部地区的 GNSS 连续观测站的垂向形变序列反演该区域的陆地水储量变化, 结果表明 GNSS 观测有足够的精度和采样密度用来测量地壳垂直运动, 并以此估算陆地水储量变化, 为水文研究提供了新的思路。王林松等 (2014) 利用喜马拉雅山脉周边的 GNSS 垂向形变序列对喜马拉雅山脉的冰雪质量进行反演, 并尝试利用水平位移与垂直位移的比值估计质量变化来分析质量源的位置。Amos 等 (2014) 利用 GNSS 垂直位移研究加利福尼亚州中部地下水变化导致的地壳运动, 使用模型模拟总水储量变化导致的负荷变化响应。Fu 等 (2015) 采用阻尼最小二乘法反演陆地水储量变化, 论证了该方法反演结果可以用来填补 GRACE 和 GRACE Follow-On 之间的空白。

### 2.1.3 GNSS 反演陆地水储量在极端气候下的应用

近年来, 在全球气候变化背景下, 极端干旱、暴雨等事件日益增多。GNSS 以其高时间分辨率 (天尺度)、低成本的优势, 成为监测干旱、暴雨等极端事件陆地水储量动态变化的一种新手段。Jin 和 Zhang (2016) 利用连续的 GNSS 观测数据估算美国西南部陆地水储量变化, 揭示了水储量季节性变化较大的区域位于落基山脉和密西西比河流域, 并指出 GNSS 拥有用于监测干旱引起水储量异常信号的能力。姚朝龙等 (2020) 基于中国区域的 GNSS 台站形变序列对 2018 年太平洋西北洋面上生成的台风“山竹”进行分析, 发现通过 GNSS 时间序列可以观测到台风“山竹”尾流导致的地壳产生厘米级形变。Zhan 等 (2021) 利用 GNSS 连续观测网络获取了 2019 年太平洋超强台风“海贝思”登陆日本期间陆地水储量的时空动态变化, 突显了极端天气下 GNSS 近实时、远程监测水文变化和预测潜在洪水灾害的作用。

## 2.2 GNSS 反演陆地水储量的进展

### 2.2.1 反演方法的进展

由于使用 GNSS 垂直位移反演区域陆地水储量变化是一个病态问题, 因此常使用 Tikhonov 正则化方法 (Tikhonov *et al.*, 1995) 来稳定病态问题。其中二阶拉普拉斯矩阵用于正则化约束矩阵, L 曲线或广义交叉验证法用于确定最优正则化参数 (Argus *et al.*, 2014)。然而, 拉普拉斯矩阵是基于几何角度的稀疏矩阵, 不具有明确的物理意义。

此外, 有时难以使用 L 曲线或广义交叉验证法准确估计最优正则化参数。目前, 使用 GNSS 观测值量化陆地水储量变化的反演方法仍存在一定困难, 需要引入改进的求解策略以提高 GNSS 反演结果的可靠性, 包括正则化约束矩阵的构建和正则化参数的最优估计。Li 等 (2023a) 基于 Tikhonov 正则化方法, 提出了用地球物理模型计算的先验协方差矩阵作为正则化约束矩阵。为了获得更稳定可靠的反演结果, 使用迭代最小二乘估计方法, 通过数据本身自适应地确定最优正则化参数。与拉普拉斯矩阵相比, 先验协方差矩阵具有明确的物理意义, 引入的先验地球物理信息可以提高 GNSS 反演结果的可靠性。研究表明, GNSS 反演得到的陆地水储量变化可以达到较高的空间分辨率, 由先验约束矩阵正则化的 GNSS 数据推断的陆地水储量变化比传统拉普拉斯约束矩阵更可靠, 并且由 GNSS 数据推断的陆地水储量变化与用 GRACE、GRACE Follow-On 和 GLDAS 推断的陆地水储量变化在时间域、空间域和降水数据上均显示出较好的一致性。

### 2.2.2 基于 GNSS 三维形变的陆地水储量反演

目前相关的研究主要使用 GNSS 垂直方向位移, 在反演陆地水储量的过程中加入水平位移, 这将有助于提升反演的稳定性。Wahr 等 (2013) 使用加州北部和格陵兰岛南部的 GNSS 数据, 结合水平和垂直运动方向, 来确定负荷区域及质量变化, 结果表明水平位移同样可以用于地面负荷形变的研究。Wang 等 (2022) 在我国华中地区利用 GNSS 垂直和水平位移进行了质量载荷反演的综合实验。棋盘格实验结果表明, 当站点少于该区域总网格数量的 2/3 时, 即使位移观测没有任何噪声, 仅使用垂直位移的质量反演也会变得不可靠。当 GNSS 站点数量大于在整个区域内相对均匀分布的总网格数量的 1/3 时, 水平位移与垂直位移的组合显著改善了反演结果。其结果表明: 与仅使用垂直位移反演相比, 使用三维位移反演的结果更加精确, 尤其在 GNSS 站点稀疏的区域。在当前的测量精度水平下 (3 mm), 包含水平位移的反演可以提升约 10% 的精度, 未来如果可以将测量精度提升到 0.1 mm 的水平, 包含水平位移的反演精度就可以提升超过 30%。

### 2.2.3 GNSS 与 GRACE 联合研究

GRACE 是美国国家航空航天局和德国航空航天中心于 2002 年 3 月 17 日发射的重力卫星,也是区域水储量变化监测的重要工具,能较好地给出数百千米尺度陆地水储量变化的特征 (Rodell, Famiglietti, 2002; Swenson *et al*, 2006; 杨元德等, 2009; 钟敏等, 2009; 冯伟等, 2012)。首先, GNSS 和 GRACE 联合研究可以利用 GRACE 获得的陆地水储量变化信息, 去除 GNSS 坐标时间序列中由陆地水储量变化所引起的非构造形变影响, 从而更为准确地获取地壳垂直运动情况。其次, 联合反演可以弥补 GNSS 测站分布不均匀和 GRACE 空间分辨率低等不足, 实现两种手段的优势互补, 进而获得时空分辨率更高的陆地水储量结果。

GNSS 和 GRACE 联合研究也经历了从验证到应用的过程。Byron 等 (2004) 利用 GRACE 时变重力场数据研究亚马逊流域陆地水负荷形变, 发现 GRACE 所得流域水储量与 GNSS 坐标位移时间序列有较强的相关性。后续研究也证明了 GNSS 与 GRACE 信号在全球多个典型区域均有较强的相关性 (Kusche, Scharma, 2005; 刘任莉等, 2013; 盛传贞, 2014; 郝明等, 2017)。人们发现可以利用二者较强的相关性这一特点进一步开展研究。如 Wang 等 (2017) 利用 GNSS 垂直位移数据对华北平原地区进行研究, 并利用 GRACE 数据模拟水文负荷变化导致的垂向位移, 发现二者较为一致的物理机制为气候变化导致的季节性水圈团块运动引起的岩石圈周期性位移。Pan 等 (2019) 进一步利用 GRACE 时间序列中的信息改正了天山地区 GNSS 位移中负荷变化产生的形变。随着研究的不断深入, 部分学者开始利用 GNSS 和 GRACE 数据联合研究陆地水储量 (何思源, 2017; Su, Zhan, 2022), 这些研究表明二者联合反演的地壳形变具有较高的时空一致性, 可以较为精确地反演出陆地储水量变化。Carlson 等 (2022) 基于小波分析提出一种新的联合反演框架, 使用连续小波变换将 GNSS 和 GRACE 时间序列分解为长期和短期分量并分别进行反演, 再分别赋予不同的权重并计算最佳权重分配, 得到了 2003—2016 年美国加州的陆地水储量。上述结果表明, GNSS 和 GRACE 联合反演比 GRACE 单独反演结果时空分辨率更

高, 还可以校正局部因素对 GNSS 反演结果的干扰、捕捉长期的陆地水储量变化。

### 2.2.4 GNSS 与全球水文模型、InSAR 联合研究

全球水文模型可以提供全球高时空分辨率的多种最优化、接近实时的陆地表面状态和通量场, 例如降水、蒸散、地表径流和地下径流等。全球陆地同化系统 (Global Land Data Assimilation System, GLDAS) 水文模型通过结合数据同化技术、卫星遥感数据和地面观测数据等多种数据, 对全球陆地表面的水文循环过程进行模拟和预测。其优点是在陆地水储量的研究中, GLDAS 水文模型可以用于验证反演结果的准确性, 例如 Scanlon (2019) 使用 GRACE 和 GLDAS 评估人类活动对全球水储量趋势的影响和陆地水储量的季节性波动; Li 等 (2023b) 使用 GLDAS 数据验证 GNSS 和 GRACE 联合反演中国西南地区 and 长江流域陆地水储量的结果, 并将其用于仿真模拟研究的输入信号, 结果表明二者在半年时间尺度上有很好的 consistency。现有的水文模型也存在一定的不足, 比如 Jin 和 Zhang (2016) 发现 GLDAS Noah 模型缺乏部分地表水和深层地下水数据, 不能完整地监测区域陆地水变化, 部分地区径流与蒸散结果不够精确。这些水文模型中未建模的成分通常会导致人类干预和气候变化有关的水储量变化遭到低估。

合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 是一种主动式空间对地微波遥感技术, 可以大范围、低成本获取地面高程或形变信息, 并拥有高空间分辨率。InSAR 与 GNSS 的数据融合也是目前的研究热点, 可以用于验证地面沉降或估算地下水开采造成的地表形变 (Bui *et al*, 2021; Sha, 2021)。

## 3 讨论

近年来 GNSS 观测在陆地水储量研究中得到了广泛的应用, 取得了重要进展和成果, 但今后还需要在以下几个方面开展更加深入的工作:

(1) 提高陆地水储量反演结果的准确性和可靠性。由于 GNSS 时间序列包含了多种地球物理因素引起的形变信息, 如未建模的基岩热膨胀和土壤膨胀效应、冰后期反弹效应、非潮汐大气负荷

和非潮汐海洋负荷。因此,在今后的研究中需要建立更加精确的模型和数据处理方法,用来识别并分离出GNSS时间序列中各种非水文负荷造成的形变信息,进而提高陆地水储量反演结果的精度。其次,在GNSS与GRACE、InSAR等技术手段联合反演时,如何科学、合理地赋予各种技术手段最佳的权重,以期实现多种技术优势互补、进而获取最优的陆地水储量反演结果,也将是一个重点研究方向。

(2) 提升陆地水储量反演结果的应用价值。陆地水中包含了地表水、地下水、土壤水等多种成分,而单独依据GNSS反演难以将陆地水储量的不同成分分离出来。在今后的研究中,可以联合全球水文模型、降雨、积雪等水文资料构建更加精细的地球物理模型,对陆地水的不同成分进行精细化处理和综合分析。

(3) 在中国大陆地区利用GNSS研究陆地水储量具有巨大的潜力和前景,如利用GNSS技术进行陆地水储量研究可以为水资源管理、农业生产等领域提供重要的支持和决策依据,GNSS技术还可以用于监测地表沉降和地壳运动等现象,为地质灾害预警提供数据支持。然而,这一领域也面临挑战,包括数据处理和分析的复杂性、仪器精度的提高以及数据共享和隐私保护等问题。随着技术的不断进步和政策的支持,利用GNSS研究陆地水储量将为我国的水资源管理、农业发展和地质灾害预警带来更多的机遇和挑战。

## 4 结论

本文介绍了基于质量负荷理论利用GNSS观测反演陆地水储量的方法,阐述了利用GNSS研究陆地水储量的进展、应用和发展趋势。随着GNSS观测精度的不断提升和观测网络的迅猛发展,利用GNSS观测研究陆地水储量的优点愈发明显。首先GNSS可以利用高精度卫星信号定位,获取研究区的精确位置信息;其次,GNSS可以对大范围、大面积的陆地水储量进行实时观测。GNSS已成为陆地水储量监测的重要手段,在中国大陆地区,利用GNSS研究陆地水储量具有巨大的潜力和前景,我国已经建立了较为完善的GNSS观测网络和数据处理系统,可以提供高精度的位置信息观测服务,

并且在地形测量、水文和气象观测等领域拥有丰富的经验和技術积累,但仍需要在时间序列信号精细识别、反演算法优化和多源数据融合等方面开展深入研究。未来,随着大数据、人工智能等技术的不断发展,可以利用GNSS等观测数据进行数据挖掘和识别,实现更精确的水文预报和预警。此外,本文还介绍了GNSS、GRACE、InSAR与水文模型等的联合研究,以实现更精确的陆地水储量监测和预测。这些技术将有助于更好地理解 and 预测水文循环的变化,对于水资源管理和环境保护具有重要意义。

由于所能收集的文献有限和论文篇幅的限制,本文介绍的仅仅是陆地水储量变化研究的一些摘要成果,随着未来研究的不断深入,其应用前景更加广阔。可以预见,随着对陆地水资源的深入研究,将有更多的发现和创新应用不断涌现,为解决全球水危机和应对气候变化带来新的契机。

本文在撰写过程中得到中国地震局第一监测中心陈长云高级工程师、梁洪宝高级工程师、杨柳高级工程师、张庆云博士、李经纬博士和天津城建大学王勇教授和李瑞杰硕士的帮助,审稿专家也提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献:

- 冯伟, Lemoine J M, 钟敏, 等. 2012. 利用重力卫星 GRACE 监测亚马逊流域 2002—2010 年的陆地水变化[J]. 地球物理学报, 55(3): 814—821.
- Feng W, Lemoine J M, Zhong M, et al. 2012. Terrestrial water storage changes in the Amazon basin measured by GRACE during 2002—2010[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(3): 814—821. (in Chinese)
- 郝明, 王庆良, 李煜航. 2017. 利用 GRACE、GPS 和水准数据研究西秦岭地区现今地壳垂直运动特征[J]. 大地测量与地球动力学, 37(10): 991—995.
- Hao M, Wang Q L, Li Y H. 2017. Crustal vertical movement of the West Qinling, derived from GRACE, GPS and leveling data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 37(10): 991—995. (in Chinese)
- 何思源. 2017. GPS 垂直位移反演云南省水储量变化[D]. 成都: 西南交通大学.
- He S Y. 2017. Seasonal variation of terrestrial water storage in Yunnan inferred from GPS observations of vertical land motion[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese)
- 姜卫平. 2017. 卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战[J]. 测绘学报, 46(10): 1379—1388.

- Jiang W P. 2017. Challenges and opportunities of GNSS reference station network[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10):1379–1388. (in Chinese)
- 刘任莉, 李建成, 姜卫平, 等. 2013. 联合 GRACE 与 GPS 比较山西省垂向地表形变[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 38(4):426–430.
- Liu R L, Li J C, Jiang W P, *et al.* 2013. Comparing vertical surface displacements using GRACE and GPS over Shanxi Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 38(4):426–430. (in Chinese)
- 沈迎春. 2021. 利用 GNSS 垂直位移研究区域水储量变化[D]. 北京: 中国科学院大学.
- Shen Y C. 2021. Regional water storage change inverted from GNSS vertical displacement[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- 盛传贞, 甘卫军, 梁诗明, 等. 2014. 滇西地区 GPS 时间序列中陆地水载荷形变干扰的 GRACE 分辨与剔除[J]. *地球物理学报*, 57(1):42–52.
- Sheng C Z, Gan W J, Liang S M, *et al.* 2014. Identification and elimination of non-tectonic crustal deformation caused by land water from GPS time series in the western Yunnan Province based on GRACE observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(1):42–52. (in Chinese)
- 谭争光, 邓志辉, 王雄健, 等. 2022. 基于 GNSS 观测的阳江地区形变特征分析[J]. *华南地震*, 42(1):1–6.
- Tan Z G, Deng Z H, Wang X J, *et al.* 2022. Analysis of deformation characteristics in Yangjiang area based on GNSS observation[J]. *South China Journal of Seismology*, 42(1):1–6. (in Chinese)
- 王林松, 陈超, 邹蓉, 等. 2014. 利用 GPS 与 GRACE 监测陆地水负荷导致的季节性水平形变: 以喜马拉雅山地区为例[J]. *地球物理学报*, 57(6):1792–1804.
- Wang L S, Chen C, Zou R, *et al.* 2014. Using GPS and GRACE to detect seasonal horizontal deformation caused by loading of terrestrial water: A case study in the Himalayas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(6):1792–1804. (in Chinese)
- 杨元德, 鄂栋臣, 晁定波, 等. 2009. GRACE 估算陆地水储量季节和年际变化[J]. *地球物理学报*, 52(12):2987–2992.
- Yang Y D, E D C, Chao D B, *et al.* 2009. Seasonal and inter-annual change in land water storage from GRACE[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(12):2987–2992. (in Chinese)
- 姚朝龙, 刘立龙, 林旭, 等. 2020. 利用 GPS 与环境负荷形变数据研究台风引起的垂向地表位移[J]. *地球物理学报*, 63(8):2870–2881.
- Yao C L, Liu L L, Lin X, *et al.* 2020. Analyzing typhoon-triggered vertical land motion from GPS and environmental load-induced deformation data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(8):2870–2881. (in Chinese)
- 钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 2009. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国陆地水量中长空间尺度的变化趋势[J]. *科学通报*, 54(9):1290–1294.
- Zhong M, Duan J B, Xu H Z, *et al.* 2009. Trend of China land water storage redistribution at medium- and large-spatial scales in recent five years by satellite gravity observations[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(9):1290–1294. (in Chinese)
- Adusumilli S, Borsa A A, Fish M A, *et al.* 2019. A decade of water storage changes across the contiguous United States from GPS and satellite gravity[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(22):13006–13015.
- Albertella A, Sansò F, Sneeuw N. 1999. Band-limited functions on a bounded spherical domain; the Slepian problem on the sphere[J]. *Journal of Geodesy*, 73(9):436–447.
- Amos C B, Audet P, Hammond W C, *et al.* 2014. Uplift and seismicity driven by groundwater depletion in central California[J]. *Nature*, 509(7501):483–486.
- Argus D F, Fu Y, Landerer F W. 2014. Seasonal variation in total water storage in California inferred from GPS observations of vertical land motion[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(6):1971–1980.
- Argus F D, Landerer W F, Wiese N D, *et al.* 2017. 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*, 122(12):10559–10585.
- Argus F D, Martens H R, Borsa A A, *et al.* 2022. Subsurface water flux in California's central valley and its source watershed from space geodesy[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(22):e2022GL099583.
- Bevis M, Alsdorf D, Kendrick E, *et al.* 2005. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(16):L16308.
- Borsa A A, Agnew D C, Cayan D R. 2014. Ongoing drought-induced uplift in the western United States[J]. *Science*, 345(6204):1587–1590.
- Bui L K, Le P V, Dao P D, *et al.* 2021. Recent land deformation detected by Sentinel-1A InSAR data (2016–2020) over Hanoi, Vietnam, and the relationship with groundwater level change[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 58(2):161–179.
- Byron D T, Srinivas B, John C R, *et al.* 2004. GRACE Measurements of mass variability in the earth system[J]. *Science*, 305(5683):503–505.
- Carlson G, Werth S, Shirzaei M. 2022. Joint inversion of GNSS and GRACE for terrestrial water storage change in California[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(3):e2021JB023135.
- Dong D N, Fang P, Bock Y, *et al.* 2002. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS derived site position time series[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(B4):2075.
- Enzminger T L, Small E E, Borsa A A. 2018. Accuracy of snow water equivalent estimated from GPS vertical displacements: A synthetic loading case study for western U. S. mountains[J]. *Water Resources Research*, 54(1):581–599.
- Famiglietti J S, Lo M, Ho S L, *et al.* 2011. Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's central valley[J]. *Geophys-*

- cal Research Letters, 38(3): L03403.
- Farrell W E. 1972. Deformation of the earth by surface loads[J]. Reviews of Geophysics, 10(3): 761–797.
- Ferreira G V, Montecino H C, Ndehedehe C E, *et al.* 2018. Space – based observations of crustal deflections for drought characterization in Brazil[J]. Science of the Total Environment, 644: 256–273.
- Fok H S, Liu Y. 2019. An Improved GPS – inferred seasonal terrestrial water storage using terrain – corrected vertical crustal displacements constrained by GRACE[J]. Remote Sensing, 11(12): 1433–1449.
- Fu Y, Argus D F, Landerer F W. 2015. GPS as an independent measurement to estimate terrestrial water storage variations in Washington and Oregon[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 120(1): 552–566.
- Guo Y J, Li B Y, Huang Y, *et al.* 2004. Green's function of the deformation of the Earth as a result of atmospheric loading[J]. Geophysical Journal International, 159(1): 53–68.
- Heki K, Arief S. 2022. Crustal response to heavy rains in Southwest Japan 2017 – 2020 [J]. Earth and Planetary Science Letters, 578(3): 117325.
- Heki K. 2001. Seasonal modulation of interseismic strain buildup in north-eastern Japan driven by snow loads[J]. Science, 293(5527): 89–92.
- Heki K. 2004. Dense GPS array as a new sensor of seasonal changes of surface loads[J]. The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics, 150(12): 177–196.
- Hofmann – Wellenhorf B, Moritz H. 2005. Physical Geodesy [M]. New York: Springer Science & Business Media.
- Hsu Y – J, Fu Y, Bürgmann R, *et al.* 2020. Assessing seasonal and interannual water storage variations in Taiwan using geodetic and hydrological data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 550: 116532.
- Jiang Z S, Hsu Y, Yuan L, *et al.* 2021. Monitoring time – varying terrestrial water storage changes using daily GNSS measurements in Yunnan, southwest China[J]. Remote Sensing of Environment, 254: 112249.
- Jin S, Zhang T. 2016. Terrestrial water storage anomalies associated with drought in southwestern USA from GPS observations[J]. Surveys in Geophysics, 37(6): 1139–1156.
- Kusche J, Schrama O J E. 2005. Surface mass redistribution inversion from global GPS deformation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) gravity data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 110(B9): B09409.
- Li X P, Zhong B, Li J C, *et al.* 2023a. 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, 617(16): 129126.
- Li X P, Zhong B, Li J C, *et al.* 2023b. Joint inversion of GNSS and GRACE/GFO data for terrestrial water storage changes in the Yangtze River Basin [J]. Geophysical Journal International, 233(3): 1596–1616.
- Long D, Shen Y, Sun A, *et al.* 2014. Drought and flood monitoring for a large karst plateau in southwest China using extended GRACE data [J]. Remote Sensing of Environment, 155(1): 145–160.
- Milliner C, Materna K, Bürgmann R, *et al.* 2018. Tracking the weight of Hurricane Harvey's stormwater using GPS data [J]. Science Advances, 4(9): 2477–2483.
- Pan Y, Chen R, Yi S, *et al.* 2019. Contemporary mountain – building of the Tianshan and its relevance to geodynamics constrained by integrating GPS and GRACE measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(11): 12171–12188.
- Pintori F, Serpelloni E. 2023. Drought – induced vertical displacements and water loss in the Po river basin (Northern Italy) from GNSS measurements [J]. ESS Open Archive, doi: 10.22541/essoar.168606938. 84604867/v1.
- Rodell M, Famiglietti J S. 2002. The potential for satellite – based monitoring of groundwater storage changes using GRACE: the High Plains aquifer, Central US [J]. Journal of Hydrology, 263(1–4): 245–256.
- Scanlon B R, Zhang Z, Rateb A, *et al.* 2019. Tracking seasonal fluctuations in land water storage using global models and GRACE Satellites [J]. Geophysical Research Letters, 46(10): 5254–5264.
- Sha T. 2021. Three – dimensional surface deformation characteristics based on time series InSAR and GPS technologies in Beijing, China [J]. Remote Sensing, 13(19): 3964–3989.
- Silverii F, D'Agostino N, Marianne M, *et al.* 2016. Transient deformation of karst aquifers due to seasonal and multiyear groundwater variations observed by GPS in southern Apennines (Italy) [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 121(11): 8315–8337.
- Su G L, Zhan W. 2022. Abnormal depletion of terrestrial water storage and crustal uplift owing to the 2019 drought in Yunnan, China [J]. Geophysical Journal International, 231(1): 108–117.
- Swenson S, Yeh J F, Wahr J, *et al.* 2006. A comparison of terrestrial water storage variations from GRACE with in situ measurements from Illinois [J]. Geophysical Research Letters, 33(16): 627–642.
- Tikhonov A N, Arseninn V. 1977. Solution of Ill – Posed problems [J]. SI-AM Review, 21(2): 266–267.
- Tikhonov A N, Goncharsky A V, Stepanov V V, *et al.* 1995. Numerical methods for the solution of ill – posed problems [M]. Berlin: Springer Netherlands.
- Van Dam T, Wahr J. 1998. Modeling environment loading effects: a review [J]. Physics and Chemistry of the Earth. 23(9–10): 1077–1087.
- Wahr J, Khan S A, Dam T V, *et al.* 2013. The use of GPS horizontal for loading studies, with applications to northern California and southeast Greenland [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 118(4): 1795–1806.
- Wang L, Chen C, Du J, *et al.* 2017. Detecting seasonal and long – term vertical displacement in the North China Plain using GRACE and GPS [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 21(6): 2905–2922.
- Wang S Y, Jin L, Jianli C, *et al.* 2022. On the improvement of mass load

- inversion with GNSS horizontal deformation; A synthetic study in central China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(10):e2021JB023696.
- White A M, Gardner W P, Borsa A A, *et al.* 2022. A review of GNSS/GPS in hydrogeodesy: Hydrologic loading applications and their implications for water resource research[J]. *Water Resources Research*, 58(7):e2022WR032078.
- Young Z, Corné K, Blewitt G. 2021. GPS Constraints on drought – induced groundwater loss around Great Salt Lake, Utah, with implications for seismicity modulation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(10):e2021JB022020.
- Zhan W, Heki K, Arief S, *et al.* 2021. Topographic amplification of crustal subsidence by the rainwater load of the 2019 typhoon Hagibis in Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(6):e2021JB021845.
- Zhan W, Li F, Hao W F, *et al.* 2017. Regional characteristics and influencing factors of seasonal vertical crustal motions in Yunnan, China [J]. *Geophysical Journal International*, 210(3):1295 – 1304.
- Zhu H, Chen K, Hu S, *et al.* 2023. 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*, 59(4):1 – 28.

## Progress in Terrestrial Water Storage Research Based on GNSS Observation

DUAN Tianqi<sup>1</sup>, ZHAN Wei<sup>2</sup>, SU Guangli<sup>2</sup>, LIU Xiao<sup>2</sup>

(1. *School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China*)

(2. *The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*)

### Abstract

The method of inversion of terrestrial water storage using GNSS observation based on mass – loading theory is introduced, and the progress, application and development trend of using GNSS to study terrestrial water storage, as well as the joint research of GNSS with GRACE and hydrological models are described. With the continuous improvement in the accuracy of GNSS observation and the rapid development of observational network, remarkable advances have been made in the study of terrestrial water storage by GNSS observation, and GNSS has become an important means of terrestrial water storage monitoring, and the use of GNSS to study terrestrial water storage in Chinese mainland has great potential and prospect. But it still needs to be further researched in the aspects of fine identification of time series signals, optimization of inversion algorithms, and fusion of multi – source data.

**Keywords:** GNSS; terrestrial water storage; mass – loading theory; inversion