

联合 GNSS、GRACE 与测井资料监测京津 冀地下水储量时空变化

邹蓉^{1*}, 秦旭¹, 杨凡¹, 陈超², 曹家铭³, 汪超¹, 王琪¹

1 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

2 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070

3 重庆市测绘科学技术研究院, 自然资源部智慧城市时空信息与装备工程技术
创新中心, 重庆 401121

摘要: 京津冀地区因地下水长期超采, 已引发一系列地质与生态问题。为精准监测该区域地下水的时空变化, 本文基于 GRACE、GNSS 与实测水井数据, 反演 2011—2020 年京津冀地下水储量变化, 并探讨了南水北调工程与人为用水对地下水的影响。GRACE 反演结果与 760 口实测井水位数据相关性高达 0.86, 反演结果可靠; 京津冀地下水位下降速率为 -13.1 mm/a、-12.9 mm/a 和 -16.4 mm/a, 其中邯郸—邢台一带地下水储量亏损最为严重, 最大亏损速率为 -40 mm/a; GNSS 垂向位移显示, 2018 年后 GNSS 基岩站隆升速率减缓, 土层站沉降速率减缓, 共同印证地下水亏损态势有所缓解。本文系统分析了京津冀地区近 10 年来地下水持续亏损的情况, 揭示了 2018 年后地下水亏损情况好转的主因是农业用水的减少而不是南水北调工程, 为科学评估与合理利用地下水提供有力支撑。

关键词: GNSS、GRACE、京津冀、地下水

中图分类号: P341 **收稿日期:** 2025-10-30

0 引言

目前, 随着人类社会经济的飞速发展与人口数量的快速增长, 加之全球气候变化的影响, 国内外诸多地区与城市正面临着地下水资源短缺的严峻形势 (Tapley et al., 2019; 翟远征等, 2025)。区域地下水的过度开采不仅造成水资源短缺, 甚至还引发一系列地质灾害 (骆祖江等, 2024)。例如, 在 2014—2015 年间, 美国加利福尼亚州地下水储量的亏损速率达到 $-44.8 \pm 7.4 \text{ mm/a}$, 城市出现严重的地面沉降 (Carlson et al., 2022)。在北美洲的墨西哥, 也因长期抽取地下水引发了严重的地面沉降和地下空洞现象 (Castellazzi et al., 2018)。中国的华北平原同样存在上述问题, Liu et al. (2022) 综合利用 GNSS、GRACE 和实测水井数据, 进一步发现降水量是造成地下水储量变化的主要因素。

依据 Farrell 等 (1972) 提出的负荷理论, 可以通过 GNSS (Global Navigation Satellite System) 数据监测地表形变从而获取水文负荷变化量。Argus et al. (2014) 指出美国西部严重的地面沉降现象, 正是由长期干旱导致。Knappe et al. (2019) 进一步通过降尺度技术在北落基山脉地区实现了流域尺度水储量变化的反演, 其结果与实测地下水位数据的相关系数高达 0.88。近年来, 基于 Slepian 函数反演陆地水储量变化的方法应用于中国川渝云地区 (成帅等, 2021) 和中国云南 (陈

基金项目: 国家自然科学基金 (No: 42274009, 42474006); 中国大陆构造环境监测网络项目 (No: CMONOC2025-1-5)

作者简介: 邹蓉 (1980-), 女, 副教授, 研究方向为水文过程与地壳形变的相互作用。

ORCID: 0000-0002-8415-9478. Email: zourong@cug.edu.cn

超等, 2023) 等不同地区。此外, Li et al. (2023)进一步将 Slepian 基函数法与格林函数的反演结果进行对比, 发现在站点稀疏的地区 Slepian 基函数法更可靠。

鉴于单一数据源在地下水监测上的局限性, 本文联合 GRACE、GNSS 和实测地下水井数据以及 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 与水资源统计数据, 构建多源协同分析框架, 聚焦京津冀地区, 系统分析该地区地下水储量时空变化, 并探讨南水北调工程和人为用水等因素对其影响的机制。

1 研究区概况

京津冀是中国北方的核心城市群, 包括北京市、天津市和河北省的 11 个地级市, 位于东经 $113^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 、北纬 $36^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 之间, 总面积约为 22 万平方公里 (图 1), 该地区经济活跃, 同时也是重要的农业生产基地。京津冀属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候, 多年平均降水量约 550 mm, 主要集中在每年的 7 至 9 月, 占全年降雨量的 70%以上 (王雨婷等, 2021)。

京津冀是我国北方典型的资源性缺水区域, 以不足全国 1% 的水资源承载了 2.3% 的土地、8% 的人口和 11% 的经济总量。在巨大的用水压力下, 地下水已成为该区域最主要的供水源, 近年来京津冀地下水的开采量已占当年用水量的 70%以上, 且长期超采导致区域地下水位持续下降, 引发一系列水资源与生态环境问题 (杨会峰等, 2021)。

2 数据与方法

2.1 研究数据

2.1.1 GNSS 数据

本文共选用了 89 个 GNSS 连续站的数据, 采样率为 30 s, 其中包括 15 个由中国大陆构造环境监测网络 CMONOC (Crustal Movement Observation Network of China, 简称“陆态网络”) 建设的 GNSS 基准站, 1 个 IGS (International GNSS Service) 站 (BJFS) 和 73 个中国气象局 (China Meteorological Administration, CMA) 建设的 GNSS 气象探测基准站, 时间跨度为 2011 年 1 月到 2020 年 12 月。

GNSS 数据反演水储量的技术路线主要基于弹性负荷形变理论, 并结合 Slepian 基函数进行区域化反演。

首先, 使用 GAMIT/GLOBK(10.71 版)软件在 ITRF14 参考框架下解算 GNSS 高精度垂向位移时序, 并进行严格的预处理, 依次进行阶跃值扣除、异常值剔除和环境载荷信号去除 (包括海洋潮汐载荷与大气载荷)。对缺失数据, 采用 GMIS 软件 (Liu et al., 2017) 通过 KKF 插值获得完整时序。随后, 利用 A-BIC 准则确定 Slepian 基函数的最佳截断数 J (韩建成等, 2021), 将 GNSS 位移信号转换为水文荷载 Slepian 系数, 并进行等效水高 (EWH) 转换。最后, 施加 100 公里半径的高斯滤波, 采用特征值加权方法 (Han et al., 2017) 计算得到陆地水储量变化 (TWSA)。

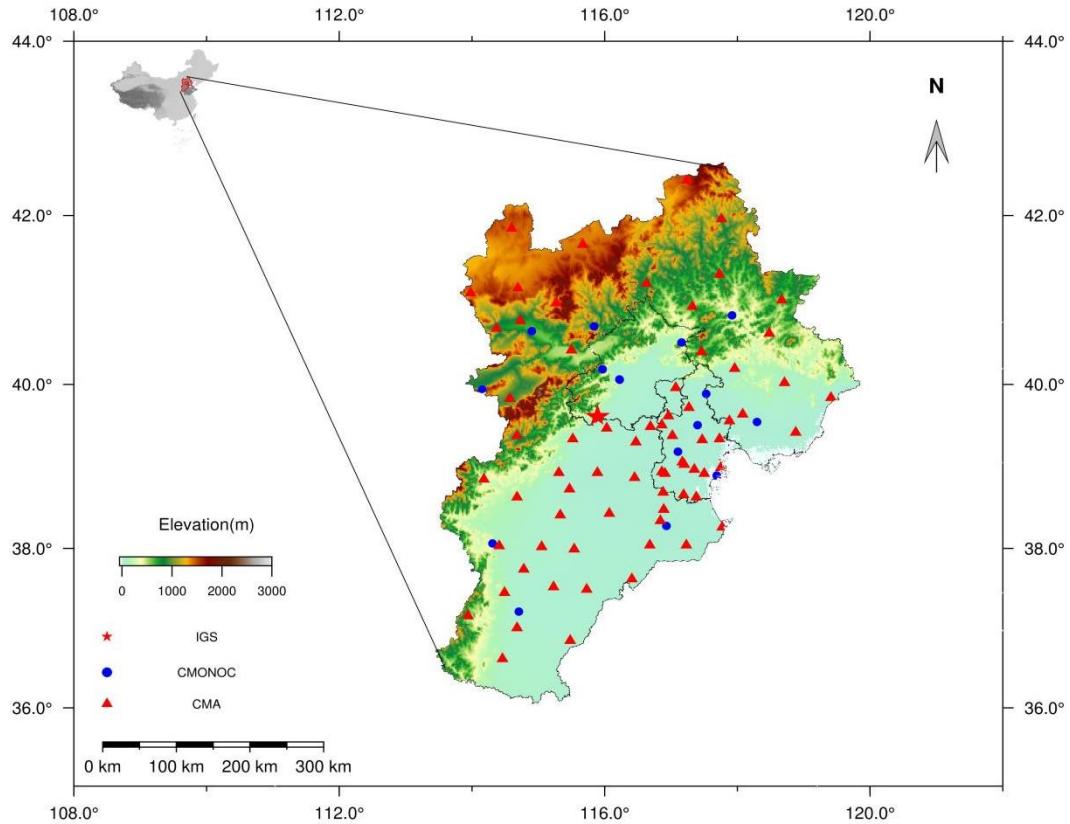


图 1 京津冀地理概况及 GNSS 台站分布

Fig. 1. Geographical Overview of the Beijing–Tianjin–Hebei Region and Distribution of GNSS Stations

2.1.2 GRACE 和 GLDAS 数据

GRACE 重力卫星采用低低-卫卫跟踪模式，对地球重力场变化进行高精度监测，其数据主要包括球谐数据与 MASCON 数据，两种数据均源自 GRACE Level-1B 解算。MASCON 数据采用质量块划分法，结合水文模型先验约束直接反演局部质量变化，具备更高的空间分辨率（Wang et al., 2022）；而球谐数据可灵活地调整组合滤波方法与参数，在捕捉季节性水文信号上更具优势。

针对球谐数据，本文依次进行了低阶项替换、泄漏改正、04—09 年背景场去除、GIA 改正与组合滤波处理等预处理（Sun et al., 2016），有效压制南北条带噪声，得到初步的陆地水储量变化结果。随后，采用了 1.28 的单尺度因子恢复法进行信号补偿（陈超等, 2023），并用奇异谱分析插值法（SSA, Singular Spectrum Analysis）填补空缺数据。

相较于球谐系数产品，CSR 机构的 MASCON 数据产品是基于 Tikhonov 正则化方法计算，单位为厘米的全球等效水高数据，已考虑信号泄漏的影响（邹贤才等, 2016），因此无需再进行尺度因子恢复，为便于对比，对 MASCON 反演时序结果也进行 SSA 插值。

GLDAS 全球陆地数据同化系统，由三种陆面同化模型和一个水文模型组成。本文所使用的 GLDAS_Noah 陆面同化模型，时间分辨率为每月，空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，提供气温、蒸散发、降雨、土壤温度等数据，但未考虑地表径流、地下水及人为因素（Hu et al., 2025）。本文同样选取 2011 年 1 月至 2020 年 12 月的数据均值作为基准值，提取了雪水当量（Snow Water Equivalent, SW E）、树冠水（Canopy Water Storage, CWS）以及四层（0-2 m）土壤含水量（S

oil Moisture Storage, SMS) 的总和, 然后同样扣除 2004—2009 年的背景场得到研究区的地表水储量变化, 最后对其做与 GRACE 球谐数据相同的组合滤波处理。

2.1.3 实测地下水井数据

本文采用《中国地质环境监测地下水位年鉴》所收录的月均地下水井水位和月平均埋深数据来计算实测地下水储量变化。值得注意的是, 国家地下水监测工程于 2018 年才完工并正式投入使用, 使得 2018 年前后京津冀区域内监测井分布密度出现较大差异, 如图 2 所示, 图 (a) 展示了 2011—2018 年实测水井地理分布情况, 图 (b) 展示了 2018—2020 年实测水井地理分布情况。

本文共收集 2011—2017 年期间京津冀区域内水井 168 口, 其中浅层水位监测井 68 口, 承压水监测井 100 口; 2018—2020 年期间京津冀区域内水井 692 口, 其中浅层水位监测井 371 口, 承压水监测井 321 口, 水位单位为米。

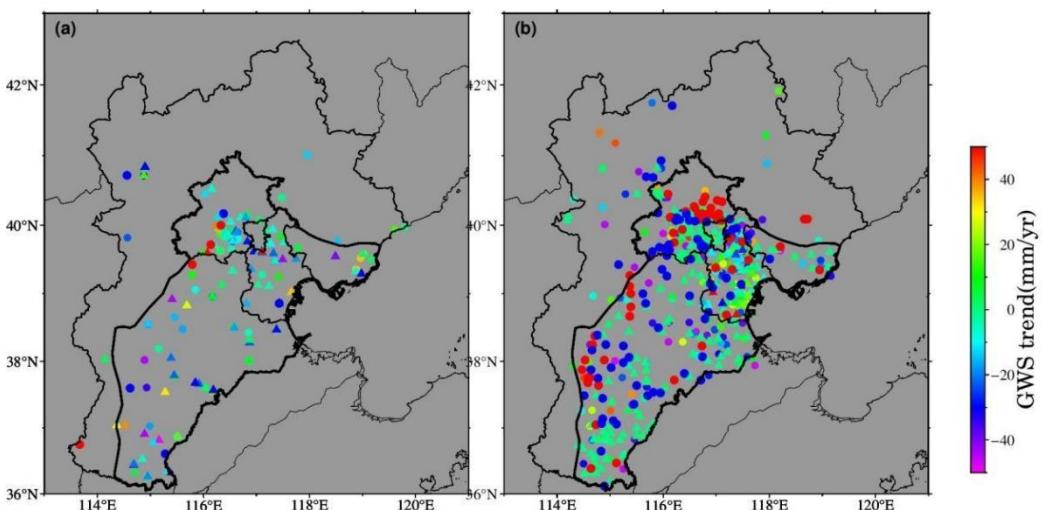


图 2 2018 年前后实测水井地下水储量变化趋势

Fig. 2. The trend of the GWSA in wells before and after 2018

本文将潜水水位数据乘以相应区域给水度, 将承压水水位数据乘以相应区域贮水系数得到等效水高形式的水储量变化。参考《华北平原地下水可持续利用调查成果集》, 京津冀地区的地下水给水度在 0.02~0.3 之间, 选取平均给水度为 0.04。承压贮水系数在 0.001-0.0015 之间, 数量级较小因此可忽略不计。

2.1.4 水资源数据

本文使用的降雨数据来源于国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn>), 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的中国逐月降水数据集。同时收集了京津冀 2014—2020 年的南水北调的年入境调水量, 以及 2011—2020 年京津冀的生活、农业、工业用水以及地下水资源开采量。上述数据均来自于省级水利厅公布的《水资源公报》。

2.2 研究方法

2.2.1 Slepian 基函数反演模型

在整个单位球面范围内, 球面上的质量负荷和垂向位移变化, 都可以用球谐函数展开的形式表达, 基于初步参考地球模型 (PREM) 中的荷载 LOVE 数可以构建质量负荷与垂直位移之间的转换关系。而 Slepian 基函数与球谐函数类似, 不仅在球面上的局部范围内也满足正交性, 还可将局部区域内的地球物理信号转化为空间谱并获得最优谱平滑解。将区域信号 $\sigma(\theta, \lambda, t)$ 和 $u(\theta, \lambda, t)$ 引入, 可用 Slepian 基函数表示为:

$$\begin{cases} \sigma(\theta, \lambda, t) = a \sum_{\beta=1}^{(L+1)^2} s_{\beta}^{EWH}(t) g_{\beta}(\theta, \lambda) \\ u(\theta, \lambda, t) = a \sum_{\alpha=1}^{(L+1)^2} s_{\alpha}^{VCD}(t) g_{\alpha}(\theta, \lambda) \end{cases} \quad (1)$$

$g_{\beta}(\theta, \lambda)$ 和 $g_{\alpha}(\theta, \lambda)$ 表示第 β 和第 α 项 Slepian 基函数, S_{β}^{EWH} 和 S_{α}^{VCD} 分别为水储量和垂向位移变化所对应的 Slepian 基函数系数, 式 (1) 构建了球谐函数和 Slepian 基函数的转换关系。再采用能量集中度 γ_{β} 加权方法抑制高阶 Slepian 系数的贡献, 可以使水储量反演结果更精准:

$$EWH(\theta, \lambda, t) = a \sum_{\beta=1}^J \gamma_{\beta} s_{\beta}^{EWH}(t) g_{\beta}(\theta, \lambda) \quad (2)$$

式 (2) 中, J 为截断保留的 Slepian 基函数项数, 简称截断数, a 为地球半径, γ_{β} 表示能量集中度, 水文质量负荷以等效水高的形式表达。

2.2.2 GRACE 球谐系数转换地表质量负荷

地表水文质量重分布会引起大地水准面的形变, 将地球重力场按照大地水准面的形式描述, 则大地水准面的变化用球谐系数展开形式可用式 (3) 表示 (Swenson et al., 2008) :

$$\Delta N(\theta, \lambda) = a \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l (\Delta \tilde{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta \tilde{S}_{lm} \sin m\lambda) \tilde{P}_{lm}(\cos \theta) \quad (3)$$

式 (3) 中 ΔN 为大地水准面变化, $\Delta \tilde{C}_{lm}$ 、 $\Delta \tilde{S}_{lm}$ 表示地表质量密度的球谐系数的变化, a 为地球平均半径; θ 和 λ 分别表示地心余纬和地心经度; l 、 m 表示为球谐系数的阶数和次数, $\tilde{P}_{lm}(\cos \theta)$ 为完全归一化勒让德函数。

因地球是一个粘弹性球体, 假设薄层密度变化为 $\Delta \sigma$, 引入负荷勒夫数进行改正, k_l 表示第 l 阶的负荷勒夫数, 假设薄层足够薄, 再对薄层密度变化 $\Delta \sigma$ 做球谐系数展开, 同时再引入 $\Delta \sigma / \rho_w$, 表示等效水高变化, 因此可用等效水高 Δewh (Wahr et al., 1998) 来表示研究区地表质量负荷变化:

$$\Delta ewh(\theta, \lambda) = \frac{a \rho_{ave}}{3 \rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} \tilde{P}_{lm}(\cos \theta) (\Delta C_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{lm} \sin(m\lambda)) \quad (4)$$

3 结果分析与讨论

3.1 陆地水储量时空变化

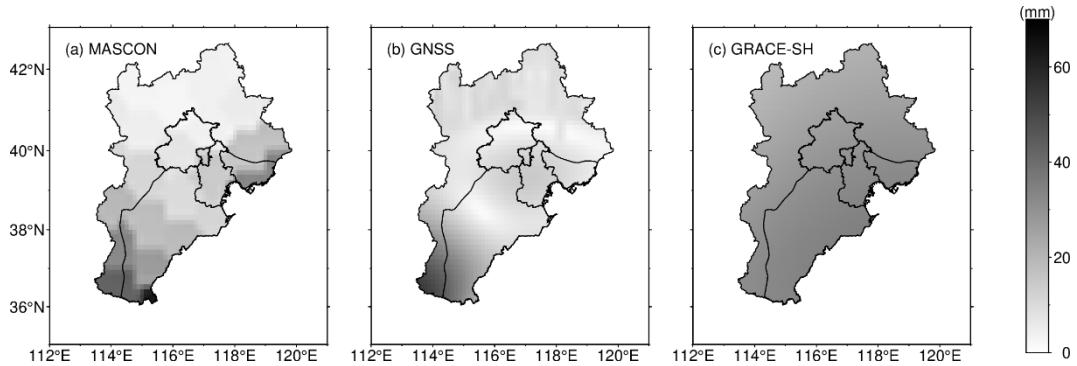


图 3 京津冀地区陆地水储量变化周年振幅对比

Fig. 3. Annual amplitude comparison of TWSA in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

为获取京津冀地区陆地水时空变化，首先对 MASCON、GNSS 和 GRACE-SH 三种数据进行周年振幅计算。从图 3 可知，三种数据反演的陆地水储量变化（TWSA，Terrestrial Water Storage Anomaly）周年振幅在空间分布上整体一致，呈现出南高北低的格局，且 MASCON 和 GNSS 数据在空间细节上更丰富。从振幅大小上看，MASCON 反演的周年振幅结果最大(65mm)，GNSS 次之(60mm)，而 GRACE-SH 较低 (42 mm)。

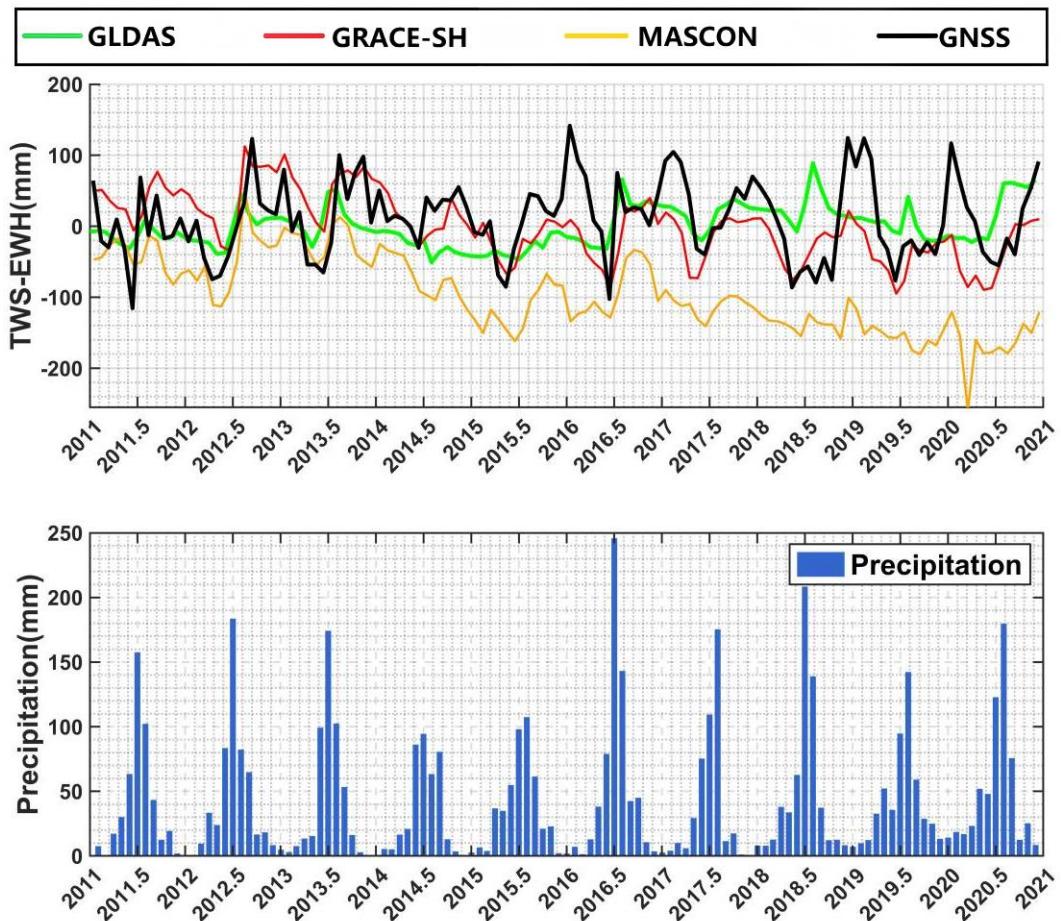


图 4 京津冀陆地水储量与降雨量时序对比

Fig. 4. Temporal comparison of TWSA and Rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

为进一步分析京津冀陆地水储量的动态演变特征，本文基于 GNSS、GLDAS、GRACE-SH 以及 MASCON 四种数据源，构建了京津冀区域陆地水储量异常的时

间序列，并结合区域降雨数据开展综合分析。如图 4 所示，京津冀地区降水呈现显著的季节性特征，降雨高度集中于每年的夏季，随后逐渐减少，而春冬两季降水较少；GNSS 反演的 TWSA 时序在 2015 年后表现出较强的周期性，与 GRACE 反演结果总体一致，但在相位上存在 1 个月左右的延迟，推测可能与 GNSS 台站的孔隙弹性响应有关（Guo et al., 2025）。此外，GLDAS 对降水的响应最为迅速，两者峰值均在每年夏季出现，但 GNSS 和 GRACE 反演的 TWSA 峰值表现出一定的滞后性；例如 2018 年的 7 月，GLDAS 与降雨数据达到峰值，而 GNSS 与 GRACE 的峰值均出现在约 4 个月之后。这一滞后现象可能与京津冀地区夏季气温高、蒸发强烈，且农业灌溉用水需求高有关（齐永青等，2022）。

3.2 地下水储量时空变化

3.2.1 京津冀地下水的年际变化

本文基于水量平衡公式（Yin et al., 2020），分别使用 GNSS-Slepian、GRACE-SH 与 MASCON 对 GLDAS 数据提取的地表水分量进行差值计算，以获取京津冀地区的地下水储量动态变化，同时利用地下实测水井数据对反演结果进行验证。

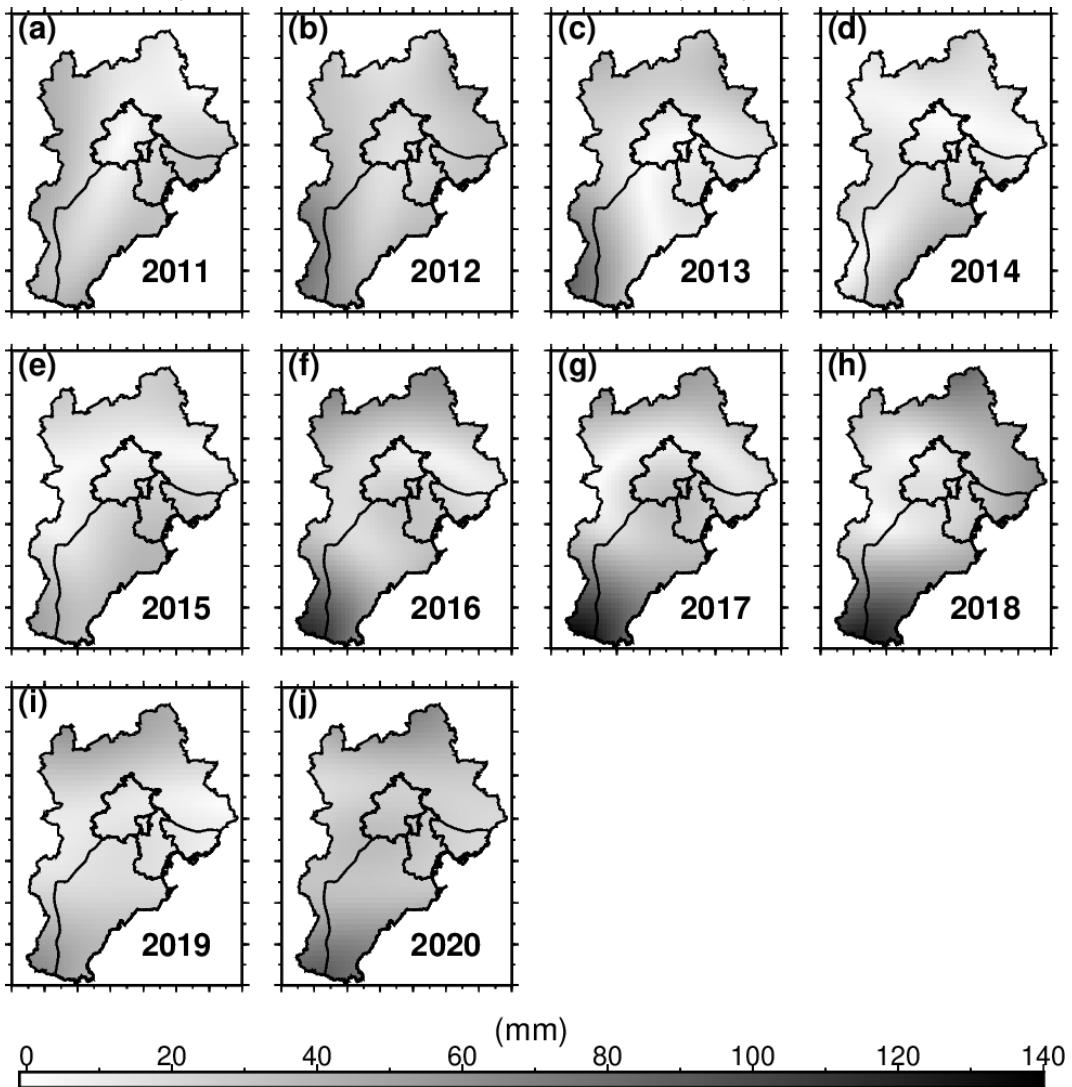


图 5 GNSS 反演地下水储量变化十年振幅变化

Fig. 5. GNSS inversion of the ten-year amplitude variation of GWSA

2011—2020 年京津冀地区基于 GNSS 数据反演的地下水储量变化（GWSA，Groundwater Storage Anomaly）空间振幅如图 5 所示。结果显示，GWSA 空间振

幅最大值均出现在河北省南部，其中 2016—2018 年地下水储量变化最为剧烈，周年振幅最大值均超过 120 mm；而 2014 年 GWSA 周年振幅值最小，仅为 20 mm。同时，本文计算得出 2016—2018 年河北省南部地下水亏损速率最大值分别为 -42 mm/a、-47 mm/a、-43 mm/a。值得注意的是，京津冀区域 GWSA 空间振幅变化加剧这一现象始于 2015 年，推测与 2014 年底开通的南水北调工程有关。

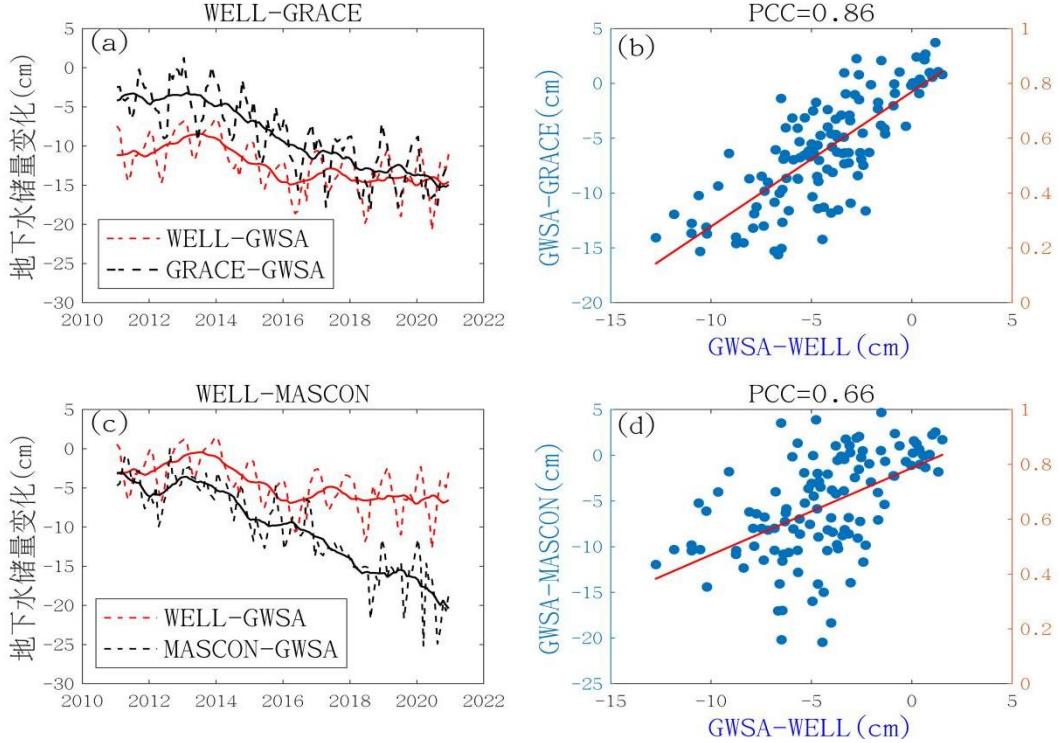


图 6 MASCON、GRACE-SH 与实测井地下水储量变化相关性分析

Fig. 6. Correlation analysis of GWSA in MASCON, GRACE-SH and Wells

如图 6 所示，本文基于 GRACE 和实测井数据，计算了在 2011—2020 年京津冀区域的地下水储量变化时序，并进行了相关性分析。图（a）、（c）中的黑色与红色散点分别代表 GRACE-SH、MASCON 与测井所得的逐月地下水数据，对应的实线为拟合的趋势项。结果显示，三种数据均呈现出先上升再下降后逐渐平稳的变化趋势。图（b）、（d）分别为 GRACE-SH、MASCON 与实测井的相关性分析，GRACE-SH 和实测值之间的相关性达 0.86，高于 MASCON 的 0.66，相较而言 GRACE-SH 的反演的 GWSA 时序更为可靠，后续将采用该结果进行地下水变化速率分析。

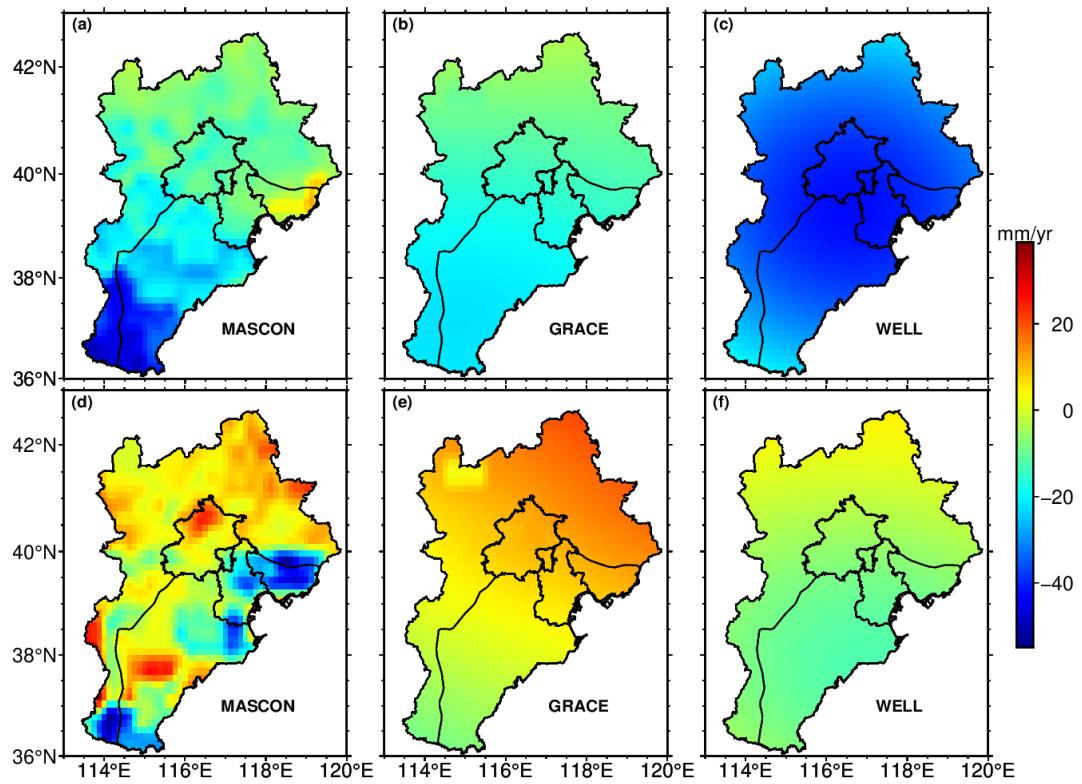


图 7 2011—2018 年与 2019—2020 年地下水储量变化空间趋势

Fig. 7. Spatial trend of GWSA from 2011 to 2018 and from 2019 to 2020

考虑到测井数量在 2018 年后剧增,本文以 2018 年为时间节点,划分 2011—2018 年与 2018-2020 年两个时间段,分别反演京津冀地区的 GWSA 变化趋势。结果显示,在 2011—2018 年间,地下水储量均呈明显的下降趋势,且河北省南部为地下水储量亏损中心,测井资料显示最大下降速率为-30 mm/a, MASCON 和 GRACE-SH 所得最大下降速率为-45 mm/a 和-30 mm/a。在 2018—2020 年间,京津冀北部山区和北京大部分地区的地下水储量亏损得到一定缓解, MASCON 和 GRACE-SH 反演的地下水最大上升速率为 25 mm/a 与 20 mm/a, 而测井资料显示最大上升速率较低,仅为 5 mm/a。

3.2.2 京津冀地下水的长期变化特征

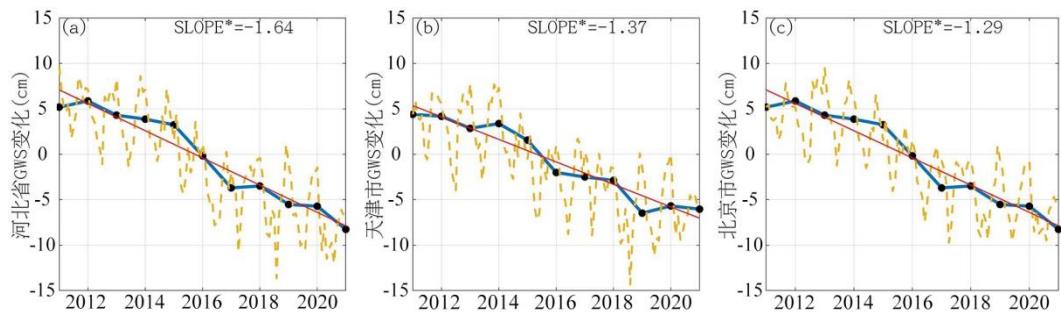


图 8 京津冀地下水储量变化时序对比

Fig. 8. Temporal comparison of GWSA in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

本文将京津冀地区按省级行政区划分为北京、天津、河北三个子区域, 分别进行 GRACE-GWSA 的时序分析。如图 8 所示,各地月均地下水储量变化(黄色虚线)、年均地下水储量变化(黑点)以及线性拟合结果(红线)均显示,2011—2020 年三地地下水储量整体呈下降趋势。最小二乘线性拟合的结果决定系数 R^2

均高于 90%，表明拟合结果可靠。河北省地下水储量下降速率最快，为-16.4 mm/a，其次是北京和天津，下降速率分别为-12.9 mm/a、-13.1 mm/a。根据下降速率分别计算得到京津冀三地地下水亏损体积分别为 $2.12 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $1.57 \times 10^9 \text{ m}^3$ 与 $3.09 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。2015—2017 年间，三地均出现地下水加速亏损，而在 2018 年 6 月后，北京市地下水储量亏损速率相较于河北、天津有明显减缓，推测与北京市在 2017 年实施的地下水回灌工程有关（霍丽涛等，2020）。

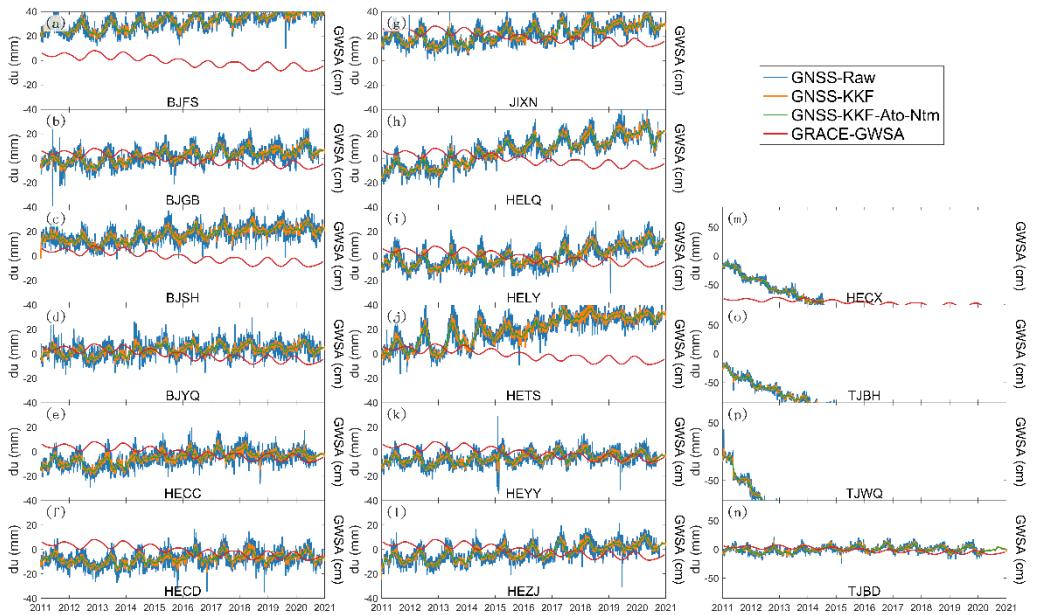


图 9 不同站址条件 GNSS 站位移时序与 GRACE 地下水储量变化时序对比

Fig. 9. Temporal comparison of displacement of GNSS stations under different site conditions and GWSA from GRACE

地下水储量发生变化，也会引起水文负荷的改变，从而导致 GNSS 站点的垂向位移发生波动，本文选取了天津市深层地下水漏斗附近的 4 个陆态网络 GNSS 土层站和 12 个远离含水层的基岩站来进行分析。

图 9 展示了各站垂向位移时序与 GRACE-SH 反演的地下水储量时序，图 9 (a) - (l) 为 12 个基岩站，图 9 (m) - (n) 为 4 个土层站，其中，黑色实线为 GNSS 原始位移时序，蓝色与红色实线分别为经 KKF (Kalman-Kriging-Filter) 滤波和插值后的结果，绿色实线则为 GRACE 数据计算出的地下水储量变化时序。图 (9) 表明，基岩站的垂向位移与 GWSA 呈现明显负相关，而土层站的垂向位移与 GWSA 则呈正相关，除 TJBD 站外，其余三个土层站位移速率与 GWSA 也存在较好的一致性。

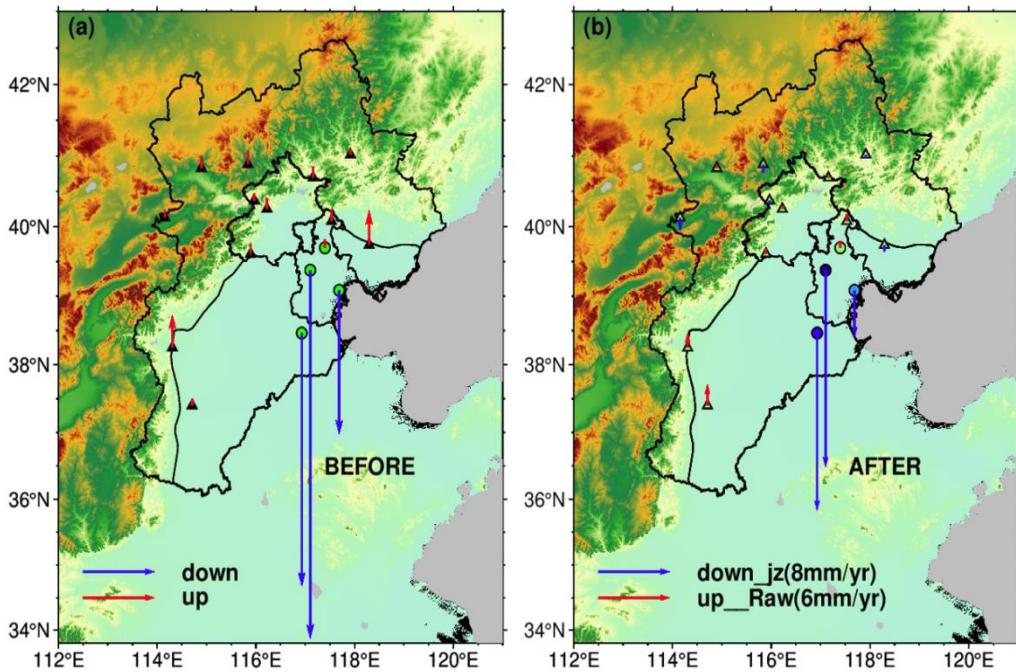


图 10 2011—2018 年与 2019—2020 年 GNSS 垂向位移速度场

Fig. 10. GNSS vertical displacement velocity field from 2011 to 2018 and from 2019 to 2020

2018 年前, GRACE 显示京津冀地区的地下水储量快速枯竭, 同期的 GNSS 垂向速度场显示(图 10), 陆态网络基岩站出现缓慢隆升, 符合地下水亏损引发的负荷弹性响应(Deng et al., 2025)。相比之下, 4 个土层站因深层承压水枯竭导致含水层压实, 引发显著的沉降趋势(朱琳等, 2024), 其中, TJBH、TJWQ、HECX 校正后的垂向形变速率分别为 -17.4 ± 0.09 mm/a、 -44.65 ± 0.11 mm/a、 -30.73 ± 0.10 mm/a。

2018 年后, 大部分陆态网络基准站的隆升速率减缓, 北京和北部山区的部分站点位移速率开始“由正变负”; 同时, 天津地下水漏斗附近的 3 个土层站沉降速率开始大幅减缓, TJBH、TJWQ、HECX 的垂向位移速率分别降至 -5.95 ± 0.39 mm/a、 -25.33 ± 0.6 mm/a 和 -22.84 ± 0.25 mm/a, 说明经过三年的调水补充, 京津冀地下水亏损情况有所缓解, 但调水主要补充于浅层地表水(严聆嘉等, 2023)。京津冀地下水恢复具有不均匀性, TJBD 站的垂向位移速率保持稳定, 2018 年前位移速率为 0.72 ± 0.08 mm/a, 2018 年后位移速率为 0.67 ± 0.03 mm/a。而邢台的 HELY 站在 2018 年之后隆升速率由 0.75 ± 0.04 mm/a 加速至 2.74 ± 0.07 mm/a; 水资源公报显示邢台地下水漏斗面积从 2018 年的 86km² 增长到 2020 年的 727km², 表明当地地下水未得到较好的调水补充, 亏损反而在加剧。

3.3 人为用水对京津冀地区地下水的影响

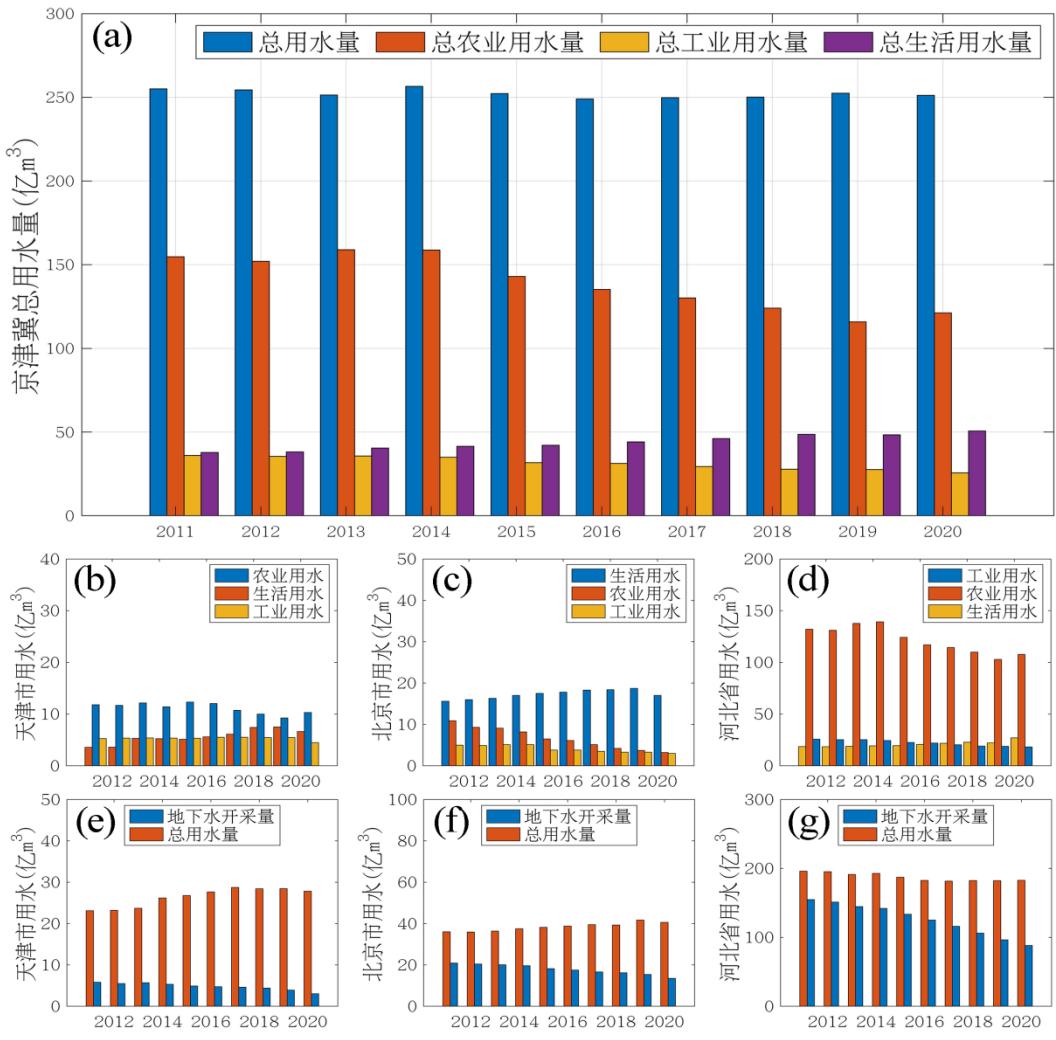


图 11 京津冀人为用水量分析

Fig. 11. Anthropogenic water consumption in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

图 11 表明，南水北调工程开通后，京津冀用水结构发生显著变化：北京和天津的总用水量略有增加，河北总用水量基本稳定，但三省地下水开采量均逐年下降，其供水占比从初期的 58%、25% 和 78.9% 下降至 33%、11% 和 48%。京津冀农业用水占比也逐年下调，从 34.6%、57%、74.8% 分别下调至 12.6%、44.3% 和 68%。工业与生活用水对京津冀地下水储量变化的影响有限，与韩云环等人（2024）的研究结果一致。因此，本文认为农业灌溉用水减少对京津冀地下水亏损情况的缓解有所帮助。

3.4 南水北调对京津冀地区地下水的影响

为了量化分析南水北调对京津冀地下水的影响，本文采用 M-K (Mann-Kendall) 突变检验法对 GRACE-SH 反演的 GWSA 时间序列进行检测，结果显示突变点位于 2015 年 5 月，与南水北调中线工程开通时间接近。据此，本文将研究时段划分为 2011 年到 2015 年 5 月和 2015 年 6 月到 2020 年两个子时段，而后分别拟合各时段中陆地水储量变化 TWSA、地表水储量变化 SWSA (Surface Water Storage Anomaly)、地下水储量变化 GWSA 以及南水北调 SNWD (South-to-North Water Diversion) 水量变化速率（表 1）。

表 1 南水北调前后京津冀地区水储量变化速率 (mm/a)

Table 1. The rate of change in water storage in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

before and after SNDW

组分	2011-2020	2011-2015.5	2015.5-2020	Tr3-Tr2
	(Tr1)	(Tr2)	(Tr3)	
TWSA	-11±0.47	-5.4±0.49	-4.1±0.23	0.9±0.26
SWSA	3.7±0.65	-18±0.27	6.7±0.19	8.5±0.08
GWSA	-13.7±0.33	-4.6±0.51	-10.8±0.67	-6.2±0.16
SNWD	4.8	0	4.1	4.1

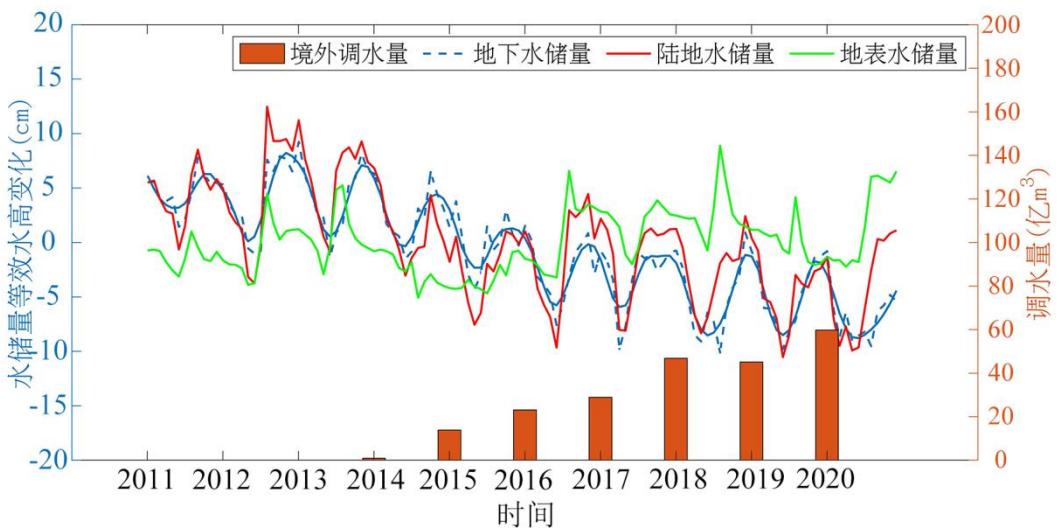


图 12 GRACE-SH 反演的各组分水储量和南水北调总量

Fig. 12. The GWSA、SWSA、TWSA inverted by GRACE-SH
and Water volume of SNWD

在 2011 年到 2015 年 5 月，基于 GRACE-SH 观测的 TWSA 与 GWSA 变化速率接近，分别为 $-5.4 \pm 0.49 \text{ mm/a}$ 和 $-4.6 \pm 0.51 \text{ mm/a}$ 。而在 2015—2020 年，TWSA 与 GWSA 呈现明显的差异，TWSA 亏损速率减缓到 $-4.1 \pm 0.23 \text{ mm/a}$ ，而 GWSA 亏损速率却加速到 $-10.8 \pm 0.67 \text{ mm/a}$ 。为进一步量化南水北调工程的贡献，将两个子时段速率分别作差，作差后的 TWSA 和 SWSA 变化速率均为正值，表明水储量下降的情况有所减缓；而 GWSA 变化速率为负，表明南水北调后亏损速率反而加快。

由此可知，南水北调工程有效地补充了京津冀地区的陆地水和地表水储量。但调水主要被用于各大城市供水、河湖生态补水和大中型水库蓄水，所以对浅层地下水的恢复也较为明显，然而，深层承压水补给周期长，其储量短期内无法得到有效的恢复 (Kuang et al., 2024)，因此，形成了地表水的快速回升与地下水持续亏损并存的复杂态势，这与 Cao et al. (2024) 得到的结论一致。

4 结论

本文联合 GNSS、GRACE 与实测地下水井数据，结合 GLDAS 及水资源统计数据，揭示了 2011—2020 年京津冀地下水储量的时空变化及驱动机制，主要结论如下：

(1) 京津冀地下水储量持续亏损。整体下降速率为 $-13.7 \pm 0.33 \text{ mm/a}$ ，空间上河北 (-16.4 mm/a) 高于天津 (-12.9 mm/a) 和北京 (-13.1 mm/a)。GRACE-SH 反演结果与 760 口实测井水位数据的相关性达 0.86，且一致显示 2018 年后

京津冀北部区域地下水储量亏损得到缓解，证实了多源数据反演分析的可靠性。

(2) GNSS 垂向位移数据反映了地下水储量的长期变化及转折特征。京津冀北部基岩站隆升速率下降，天津土层站（TJBH、TJWQ、HECX）沉降速率减缓，共同印证历经三年的调水补充，京津冀地下水储量亏损得到阶段性缓解。

(3) 南水北调工程与人为用水调整对地下水的影响存在明显差异。调水量主要补充地表水与浅层地下水，深层地下水系统仍处于加剧亏损状态。2015—2020 年间地下水亏损速率 ($-10.8 \pm 0.67 \text{ mm/a}$) 高于 2010—2015 年 ($-4.6 \pm 0.51 \text{ mm/a}$)。

由于诸多条件限制，本研究仍存在一些局限性：2018 年前实测地下水井数量有限（共 168 口），可能影响早期反演精度；河北南部 GNSS 站点密度稀疏，限制了对强变化区域的精细捕捉。后续可联合 InSAR 数据进行协同监测，以增强关键区域地表形变监测能力，提升反演结果时空分辨率。

References

- Argus, D. F., Y. Fu., F. W. Landerer., et al., 2014. Seasonal Variation in Total Water Storage in California Inferred from GPS Observations of Vertical Land Motion. *Geophysical Research Letters*, **41**(6): 1971–1980. <https://doi.org/10.1002/2014GL059570>
- Cao, J., Xiao, Y., Long, D., et al., 2024. Combined Gravity Satellite and Water Well Information to Monitor Groundwater Storage Changes in the North China Plain. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **49**(5): 805–818. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230116>
- Carlson, G., Werth, S., Shirzaei, M., et al., 2022. Joint Inversion of GNSS and GRACE for Terrestrial Water Storage Change in California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **127**(3): e2021JB023135. <https://doi.org/10.1029/2021JB023135>
- Castellazzi, P., Longuevergne, L., Martel, R., et al., 2018. Quantitative Mapping of Groundwater Depletion at the Water Management Scale Using a Combined GRACE/InSAR Approach. *Remote Sensing of Environment*, **205**: 408–418. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.025>
- Chen, C., Zou, R., Cao, J. M., et al., 2023. Comparative Analysis of Green's Function and Slepian's Basis Function for GNSS Inversion of Terrestrial Water Storage. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, **52**(12): 2066. <https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2023.20220624> (in Chinese with English abstract).
- Cheng, S., Yuan, L. G., Jiang, Z., S., et al., 2021. Investigating terrestrial water storage change in Sichuan, Yunnan and Chongqing using Slepian basis functions. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, **64**(4): 1167–1180. <https://doi.org/10.6038/cjg2021O0194> (in Chinese with English abstract).
- Deng, L. S., Chen, Q. S., Liao, F. F., et al., 2025. Response of GNSS Vertical Displacements to Hydrological Loading: Deformation Patterns and Terrestrial Water Storage Variations over China's Mainland. *Hydrological Sciences Journal*, **1**–17. <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2548298>
- Farrell, W., et al., 1972. Deformation of the Earth by Surface Loads. *Reviews of Geophysics*, **10**(3): 761–797. <https://doi.org/10.1029/RG010i003p00761>
- Guo, Q., Huang, Y., Grana, D., et al., 2025. Coupled Inversion of Elastic-Seismic Data for Petrophysical and Pore-Geometry Properties. *Geophysics*, **90**(5): 1–74. <https://doi.org/10.1190/geo2024-0782.1>

- Han, J. C., Chen, S., Lu, H. Y., et al., 2021. Time-variable gravity field determination using Slepian functions and terrestrial measurements: A case study in North China with data from 2011 to 2013. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(5): 1542-1557. <https://doi.org/10.6038/cjg2021O0240> (in Chinese with English abstract).
- Han, S. C., Razeghi, S. M., et al., 2017. GPS Recovery of Daily Hydrologic and Atmospheric Mass Variation: a Methodology and Results from the Australian Continent. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11): 9328–9343. <https://doi.org/10.1002/2017JB014603>
- Han, Y. H., Ma, Z. G., Li, M. X., 2024. Change Characteristics and Influencing Factors of Terrestrial Water Storage in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in the Past 20 Years. *Climatic and Environmental Research*, 29 (5): 519–533. <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23076> (in Chinese with English abstract).
- Hu, F. M., Liang, B. J., Yang, G., et al., 2025. Evaluation of Groundwater Storage Variability and Relationship with Hydrometeorological Factors in the Huang-Huai-Hai Plain, China, Using GRACE and GLDAS Data (2002–2023). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 60: 102540. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102540>
- Huo, L. T., Wang, B. X., Pan, Z. H., et al., 2020. Environmental Impact by Surface-Water Recharge of Groundwater in Beijing Miuhaisun Replenishment Area - Correspondence Analysis. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 56(2): 195-203. <https://doi.org/10.12202/j.0476-0301.2020058> (in Chinese with English abstract).
- Knappe, E., Bendick, R., Martens, H., et al., 2019. Downscaling Vertical GPS Observations to Derive Watershed - Scale Hydrologic Loading in the Northern Rockies. *Water Resources Research*, 55(1): 391–401. <https://doi.org/10.1029/2018WR023289>
- Kuang, X. X., Liu, J. G., Scanlon, B. R., et al., 2024. The Changing Nature of Groundwater in the Global Water Cycle. *Science*, 383(6686): eadf0630. <https://doi.org/10.1126/science.adf0630>
- Li, X. P., Zhong, B., Li, J. C., et al., 2023. Inversion of GNSS vertical displacements for terrestrial water storage changes using Slepian basis functions. *Earth and Space Science*, 10(2): e2022EA002608. <https://doi.org/10.1029/2022EA002608>
- Liu, N., Dai, W. J., Santerre, R., et al., 2018. A MATLAB-based Kriged Kalman Filter Software for Interpolating Missing Data in GNSS Coordinate Time Series. *GPS Solut.*, 22(2): 5. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0689-3>
- Liu, R. L., Zhong, B., Li, X. P., et al., 2022. Analysis of groundwater changes (2003–2020) in the North China Plain using geodetic measurements. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41: 101085. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101085>
- Luo, Z. J., Wang, X., Dai, J., et al., 2024. Influence of Land Subsidence on Movable Groundwater Resources. *Earth Science*, 49(1): 238-252. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.143> (in Chinese with English abstract).
- Qi, Y. Q., Luo, J. M., Gao, Y., et al., 2022. Crop Production and Agricultural Water Consumption in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: History and Water-Adapting Routes. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 30(5): 713–722. <https://doi.org/10.12357/cjea.20210726> (in Chinese with English abstract).
- Sherpa, S. F., Werth, S., et al., 2025. Investigating the Influence of Climate Seasonality on Glacier Mass Changes in High Mountain Asia via GRACE Observations. *IEEE Journal of*

Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 18: 20545-20562. [http://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3595165](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3595165)

- Sun, Y., Riva, R., Ditmar, P., et al., 2016 Optimizing Estimates of Annual Variations and Trends in Geocenter Motion and J2 from a Combination of GRACE Data and Geophysical Models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(11): 8352-8370. <https://doi.org/10.1002/2016JB013073>
- Swenson, S., Chambers, D., Wahr, J., et al., 2008. Estimating Geocenter Variations from a Combination of GRACE and Ocean Model Output. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8). <https://doi.org/10.1029/2007JB005338>
- Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., et al., 2019. Contributions of GRACE to Understanding Climate Change. *Nature climate change*, 9(5): 358–369. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>
- Wang, F., Lai, H. X., Li, Y. B., et al., 2022. Identifying the Status of Groundwater Drought from a GRACE Mascon Model Perspective across China during 2003–2018. *Agricultural Water Management*, 260: 107251. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107251>
- Wang, Y. T., Li, J. X., Xue, X. B., et al., 2021. Similarities and Differences of Main Controlling Factors of Natural High Iodine Groundwater between North China Plain and Datong Basin. *Earth Science*, 46(1): 308-320. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.261> (in Chinese with English abstract).
- Wahr, J., Molenaar, M., Bryan, F., et al., 1998. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12): 30205-30229. <https://doi.org/10.1029/98JB02844>
- Yan, L. J., Lu, C. Y., Sun, Q. Y., et al., 2025. Influence of the Middle Route of the South-To-North Water Diversion Project on Water Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Advances in Water Science*. (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. F., Cao, W. G., Zhi, C. S., et al., 2021. Evolution of Groundwater Level in the North China Plain in the Past 40 Years and Suggestions on Its Overexploitation Treatment. *Geology in China*, 48(4): 1142-1155. <https://doi.org/10.12029/gc20210411> (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. T., Cai, Y., Chen, L., et al, 2022. SBAS-InSAR Monitoring and Analysis of Surface Deformation in Xingtai City from 2019 to 2021. *Geomatics Science and Technology*, 10: 230 – 238. <https://doi.org/10.12677/gst.2022.104024>
- Yin, W. J., Hu, L. T., Zheng, W., et al., 2020. Assessing Underground Water Exchange between Regions Using GRACE Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(17): e2020JD032570. <https://doi.org/10.1029/2020JD032570>
- Zhai, Y. Z., Cui, Y. H., Zhu, G. H., et al., 2025. The Mystery of Sustainable Development Mode for Groundwater. *Earth Science*, 50(6): 2457-2460. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.037> (in Chinese).
- Zhu, L., Gong, H. L., Li, X. J., et al., 2024. Research Progress and Prospect of Land Subsidence. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 51(4): 167-177. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212043> (in Chinese with English abstract).
- Zou, X. C., Jin, T. Y., Zhu, G. B., et al., 2016. Research on the MASCON Method for the Determination of Local Surface Mass Flux with Satellite-Satellite Tracking Technique. *C*

hinese Journal of Geophysics, 59(12): 4623-4632. <https://doi.org/10.6038/cjg20161223> (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈超, 邹蓉, 曹家铭, 等, 2023. 陆地水 GNSS 反演的格林函数和 Slepian 基函数比较分析. 测绘学报, 52(12): 2066.
- 成帅, 袁林果, 姜中山, 等, 2021. 应用 GPS 数据和 Slepian 基函数反演川云渝地区陆地水储量变化. 地球物理学报, 64(4): 1167 – 1180.
- 韩建成, 陈石, 卢红艳, 等, 2021. 基于 Slepian 方法和地面重力观测确定时变重力场模型: 以 2011—2013 年华北地区数据为例. 地球物理学报, 64(5): 1542-1557.
- 韩云环, 马柱国, 李明星, 等, 2024. 近 20 年京津冀陆地水储量变化特征及其影响因子分析. 气候与环境研究, 29(5): 519 – 533.
- 霍丽涛, 王博欣, 潘增辉, 等, 2020. 基于对应分析法的北京密怀顺地区地表水回补地下水环境影响评价. 北京师范大学学报 (自然科学版), 56(2): 195 – 203.
- 骆祖江, 王鑫, 代敬, 等, 2024. 地面沉降对地下水可采资源的影响. 地球科学, 49(1): 238 – 252.
- 齐永青, 罗建美, 高雅, 等, 2022. 京津冀地区农业生产与水资源利用: 历史与适水转型. 中国生态农业学报, 30(5): 713 – 722.
- 王雨婷, 李俊霞, 薛肖斌, 等, 2021. 华北平原与大同盆地原生高碘地下水赋存主控因素的异同. 地球科学, 46(1): 308 – 320.
- 严聆嘉, 陆垂裕, 孙青言, 等, 2025. 南水北调中线工程对京津冀水量平衡的影响. 水科学进展. 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 等, 2021. 近 40 年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议. 中国地质, 48(4): 1142–1155.
- 朱琳, 宫辉力, 李小娟, 等, 2024. 区域地面沉降研究进展与展望. 水文地质工程地质, 51(4): 167 – 177.
- 邹贤才, 金涛勇, 朱广彬, 等, 2016. 卫星跟踪卫星技术反演局部地表物质迁移的 MASCON 方法研究. 地球物理学报, 59(12): 4623 – 4632.
- 翟远征, 崔一涵, 朱冠华, 等, 2025. 地下水可持续发展模式之谜. 地球科学, 50(6): 2457 – 2460.

作者贡献度说明:

邹蓉: 负责研究选题设计、实验方案制定、论文初稿的撰写修改、审核论文全文、最终定稿并负责与期刊沟通;

秦旭: 提供核心观点, 对论文初稿进行修改及润色;

杨凡: 数据收集与分析, 协助完成实验数据的验证;

陈超: 参与实验方案制定, 参与论文讨论部分的撰写。

曹家铭: 数据收集与分析, 协助完成数据实验的验证;

汪超: 协助整理文献综述以及参考文献。