



引文格式:曹杰,肖云,龙笛,等.联合重力卫星和水井资料监测华北平原地下水储量变化[J].武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5):805-818.DOI:10.13203/j.whugis20230116

Citation: CAO Jie, XIAO Yun, LONG Di, et al. Combined Gravity Satellite and Water Well Information to Monitor Groundwater Storage Changes in the North China Plain[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(5):805-818. DOI: 10.13203/j.whugis20230116

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^{1,2} 肖云^{2,3} 龙笛⁴ 崔英杰⁴ 刘淼⁵ 张锦柏^{1,2}

王宇康^{1,2} 洪晓东^{1,2} 陈垚宁^{1,2}

1 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054

2 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安, 710054

3 西安测绘研究所, 陕西 西安, 710054

4 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京, 100084

5 河北省水资源研究与水利技术试验推广中心, 河北 石家庄, 050061

摘要:华北平原作为人口最多的平原地区,其地下水资源开采十分严重,常态对该地区地下水储量(ground water storage, GWS)变化的精确监测具有重要的生态意义。利用重力卫星数据反演了华北平原的GWS变化,并与水文模型、降水资料、南水北调调水量和地下水井资料进行对比分析,提出融合浅层GWS变化和深层地下水变化方法,得到总地下水的贡献。研究表明,重力卫星与全球陆地数据同化系统模型估计的水储量变化均表现出明显的季节性特征;重力卫星反演的GWS变化与浅层地下水井资料估计结果一致性较好;考虑深层地下水的贡献,融合浅层和深层地下水井资料估计结果和重力卫星反演结果吻合更好,相较于仅使用浅层地下水估计结果吻合度更高,并表明浅层地下水为GWS变化的主要变化量;2003—2017年,华北平原地下水处于长期亏损趋势(-1.3 ± 0.6 cm/a);2018—2020年,重力卫星反演结果与同时段内顾及深层地下水井资料的总GWS亏损速率几乎一致;2021年,重力卫星和地下水井资料与前期观测结果形成鲜明的U型反转,GWS均呈增长趋势;降雨和南水北调对华北平原的水储量变化具有直接影响,对缓解GWS亏损和地下水恢复方面做出重大贡献。所提出的方法为精确观测华北平原GWS变化提供新的途径,对重力卫星监测结果提供可靠验证。

关键词:重力卫星;深层地下水;华北平原;地下水储量

中图分类号:P223

文献标识码:A

收稿日期:2023-11-06

DOI:10.13203/j.whugis20230116

文章编号:1671-8860(2024)05-0805-14

Combined Gravity Satellite and Water Well Information to Monitor Groundwater Storage Changes in the North China Plain

CAO Jie^{1,2} XIAO Yun^{2,3} LONG Di⁴ CUI Yingjie⁴ LIU Miao⁵ ZHANG Jinbai^{1,2}

WANG Yukang^{1,2} HONG Xiaodong^{1,2} CHEN Kaining^{1,2}

1 School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China

3 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

4 State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

5 Center of Water Resources Research and Water Techniques Testing and Dissemination of Hebei Province, Shijiazhuang 050061, China

Abstract: Objectives: As an important grain-producing area and the most populous plain area in China, the groundwater resources in the North China Plain are seriously exploited for agricultural irrigation and domestic water use, and it is of great ecological significance and socio-economic value to accurately monitor

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3900604);长安大学研究生科研创新实践项目(300103723046)。

第一作者:曹杰,硕士生,主要从事卫星重力的水文学应用等方面研究。caojie@chd.edu.cn

通讯作者:肖云,博士,正高级工程师。powaterssg@qq.com

the changes of groundwater storage in the region and continuously recharge and restore the groundwater. **Methods:** The gravity satellite data were used to invert the groundwater storage changes in the North China Plain, and compared and analyzed with the hydrological model, precipitation information, South-North water transfer project and groundwater well information, and proposed a method to integrate shallow groundwater storage changes and deep groundwater changes to obtain the contribution of total groundwater. **Results:** The results show that: (1) Both gravity satellite and global land data assimilation system model estimated water storage changes in the North China Plain exhibit obvious seasonal characteristics. (2) The correlation coefficients between the gravity satellite inversions and the shallow groundwater well estimations are consistent in terms of interannual variability, multi-year trend variability and seasonal variability, with correlation coefficient greater than 0.8. (3) Considering the contribution of deep groundwater, the estimated results of integrating shallow and deep groundwater well information and the gravity satellite inversions are in better agreement than those using only shallow groundwater, and indicate that shallow groundwater is the main variation of groundwater storage change. (4) From 2003 to 2017, groundwater in the North China Plain is in a long-term deficit state, with a gravity satellite estimated groundwater deficit rate of -1.3 ± 0.6 cm/a. From 2018 to 2020, the gravity satellite estimated groundwater deficit rate is -1.9 ± 0.7 cm/a, which is almost consistent with the total groundwater deficit rate of -1.8 ± 0.8 cm/a during the same period taking into account the deep groundwater; the groundwater trend in 2021 is increasing, and the growth rate of gravity satellite inversion is 12.7 ± 1.8 cm/a, which is more consistent with the total groundwater well estimation in the same period. The correlation coefficient is 0.98, and the weighted fused total groundwater storage change is more consistent than that estimated by using only shallow groundwater. (5) Precipitation and North-South water transfer project have a direct impact on water storage changes in the North China Plain, making a significant contribution to the mitigation of groundwater storage deficits and groundwater restoration. **Conclusions:** The research method in this paper provides a new way to accurately observe groundwater storage changes in the North China Plain, and provides reliable verification of gravity satellite monitoring results.

Key words: gravity satellite; deep groundwater; North China Plain; groundwater storage

20世纪50年代以来,由于工农业发展、气候灾害变化、人口增加以及城市建设等因素,华北平原地区的地下水资源开采与日俱增,近几十年间,作为粮食产业基地之一的华北平原,对小麦和玉米等粮食作物的农业灌溉约占总水资源的70%,长期大量开采地下水已引起不同程度的地下水位下降、地下水水质恶化、山体滑坡、地面沉降等环境地质问题^[1]。因此,有效监测华北平原地下水动态变化并进行相关研究分析,对该区域地下水的合理开采以及生态环境的可持续发展具有重要的指导意义和社会经济价值^[2]。

近年来,伴随重力卫星的成功发射与持续发展,目前其已成为全球及大区域水储量变化监测的有效手段。国内外学者对重力卫星进行密切关注并深入研究,在监测陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)和地下水储量(ground water storage, GWS)变化等方面开展了长期大量的研究工作^[3]。Wahr等^[4]使用重力恢复及气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)卫星首次发布的

时变重力场数据对全球多个流域进行TWS监测,研究表明GRACE反演结果的精度与研究区域面积具有显著相关性。冯伟等^[5]利用GRACE卫星数据、3种水文模型和降雨资料反演了2002—2010年亚马逊流域的TWS变化,并表明降雨是影响该流域陆地水变化的重要因素。李琼等^[6]采用GRACE数据有效探测到中国西南地区的TWS变化,研究结果表明TWS下降与该区域的干旱事件、降雨和地表温度等因素紧密相关。Famiglietti等^[7]、Scanlon等^[8]和Chen等^[9]基于GRACE反演结果对美国加州中央山谷区域地下水变化进行了研究,其监测结果与加州近些年的干旱情况及当地政府的政策管控等因素得到了合理验证。

随着遥感技术的快速发展,多源数据的不断丰富,国内外许多学者开始进一步关注不同监测手段相结合的研究方法,从而实现更高精度和分辨率的水储量动态观测。Castellazzi等^[10]首次实现了GRACE与InSAR数据融合算法研究,使用GRACE数据采取不同种滤波方法,观测墨西哥

中部区域的地下水变化,同时通过 InSAR 数据提供的地下水质量损失的空间先验信息,确定最适合研究区的反演方法和数据。Massoud 等^[11]通过 GRACE 和哨兵数据,分别监测了黎巴嫩贝卡平原的地下水和地面沉降变化,结合水文模型、当地水库数据等深入分析各水文变量贡献,并表明地下水过度开采是造成地面沉降的主要原因。

华北平原包括北京市、天津市、河北省全部平原以及黄河以北的河南省和山东省。面积广阔,地势平坦,平均海拔 100 m 以下。该地区以温带季风气候为主,四季变化鲜明,夏季降雨量偏多,春、冬季降雨偏少,且春季蒸发量大,导致该季节干旱情况较为严重。南水北调工程作为优化中国南北地区水资源配置的战略性的水利工程,为解决我国北方地区严重缺水和缓解水资源短缺对各城市经济社会发展带来的制约等问题做出重大贡献。该工程以长江流域为主要水源,分别从东、中、西三条线路向华北平原输水,其中,南水北调东线和中线工程分别于 2013 年底和 2014 年底正式通水,西线工程目前仍处于规划论证阶段,如图 1 所示。

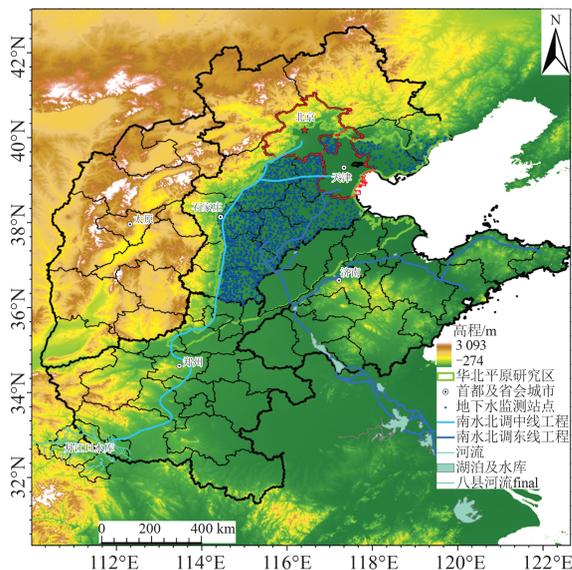


图 1 华北平原地区位置及南水北调工程线路示意图

Fig. 1 Location of North China Plain Area and South-North Water Transfer Project Route Map

目前国内外学者针对华北平原地区陆地水和 GWS 变化方面的研究也已陆续开展相关工作。钟敏等^[12]利用 GRACE 时变重力场数据观测到 2002—2007 年华北京津冀地区的 TWS 以大约 -2.4 cm/a 速率亏损,并根据河北省水利部门公布的地下水超采量数据,推断 TWS 下降趋势可能与地下水超采有关。Tang 等^[13]使用 2003—2011 年的 GRACE 卫

星数据估算出华北平原 GWS 以 $-0.84 \sim -1.4 \text{ cm/a}$ 的速率下降,并发现该地区质量亏损主要受水库调节、引水和煤炭输送等人为活动的影响。Huang 等^[14]基于 GRACE 数据分别探测到 2003—2013 年华北平原地区的山前平原与中东部平原地下水质量亏损变化,表明 GRACE 重力卫星可以探测到区域地下水变化的差异性。李圳等^[15]采用 GRACE 卫星重力数据反演了华北平原 2003—2014 年的 TWS 变化,并充分考虑季节变化对水储量变化的影响,结果表明,华北平原水储量变化主要受降雨和地下水开采这两大关键因素的影响。魏伟等^[16]基于 3 家不同机构的 GRACE 重力卫星数据估算了 2003—2014 年华北地区 TWS 变化,并采用两种不同的反演方法及 Mascon 模型,其反演结果均表明研究时段内华北地区水储量处于长期亏损状态。Liu 等^[17]利用 GRACE/GRACE Follow-On (GRACE-FO) 数据监测了 2003—2020 年华北平原 GWS 变化,同时利用 GNSS 测站资料观测垂直位移质量变化速率,并研究分析了南水北调中线工程和降雨对地下水变化的影响。

以上研究工作主要关注华北平原水储量的长期趋势变化以及浅层 GWS 变化对总 GWS 变化的影响,目前关于华北平原深层 GWS 变化的研究,及其与重力卫星观测结果的对比分析和南水北调对华北地区 GWS 变化的影响研究则相对较少。为此,本文在上述学者的研究基础上,给出了 2018-06—2021-12 华北平原深层地下水的平均非弹性压密释水系数约为 1.25×10^{-2} ,引入深层地下水后使得地下水井资料估计结果更加准确,采用融合浅层和深层地下水变化的方法,估计得到的总 GWS 变化与重力卫星反演结果从长期趋势和季节性变化上吻合度更高,为精确观测华北平原 GWS 变化提供新的途径,对重力卫星监测结果提供可靠验证。

1 重力卫星反演地下水方法及数据分析

1.1 重力卫星数据与后处理

Ferreira 等^[18]和姚朝龙等^[19]基于广义三角帽方法分别评估了在全球范围内和中国大陆地区各机构模型的不确定性,评估结果均显示 CSR (Center for Space Research) 球谐模型的不确定性最小。故本文采用美国德克萨斯大学空间研究中心 CSR 提供的 2003-01—2017-06 的 GRACE Level2 Release 06 月重力场模型和 2018-06—

2021-12的GRACE-FO Level2 Release 06月重力场模型数据^[20],除2017—2018年共11个月的缺失数据不做处理,其余部分的缺失月份数据采用三次样条插值法填补,时间跨度共217个月,时间分辨率为月值,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。该数据为已扣除固体潮、海潮、固体极潮、非潮汐海洋、非潮汐大气和重力扰动等影响的60阶正则化球谐系数^[21]。在GRACE数据处理时,定义地球质心与地固坐标系和惯性坐标系的原点重合,故一阶项为0,但因为地球质量的重新分布导致地球质心发生变化,即地球质心与坐标系原点不重合,此时1阶项不为0,所以利用优化解算的精度较高的一阶项C10、C11替换原始数据中的一阶项^[22]。由于卫星的轨道几何构型对地球重力场球谐位系数低阶项敏感度较低,导致观测数据的C20项精度较差,因此采用卫星激光测距解算的C20替换卫星原始观测的C20项^[23]。扣除多年平均重力场;并基于ICE-6GD的冰川均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)模型对地球重力场质量变化趋势进行GIA改正^[24];采用300 km的高斯滤波对球谐系数高阶项进行平滑处理,以降低高阶球谐系数产生的噪声影响^[25];利用P4M6去相关滤波去除因球谐系数间存在相关性而引起的“南北条带”现象^[26]。在重力卫星数据处理过程中,研究区域的真实信号会发生一定程度的信号泄漏现象,为减少“泄漏”误差对结果造成的影响以获取真实的质量变化时间序列,华北平原的陆地水变化信号可以认为在空间上是均一分布的^[27],本文采用单一尺度因子法来恢复研究区域内TWS变化的真实信号,利用集合平均后的水文模型估计得到的尺度因子为1.20^[28]。

由GRACE时变重力场提供的球谐位系数可计算地球表面任意一点的质量变化,其密度变化表示为^[25]:

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \frac{a\rho_{\text{ave}}}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_l} \times (\Delta\tilde{C}_{lm}\cos(m\phi) + \Delta\tilde{S}_{lm}\sin(m\phi)) \quad (1)$$

式中, θ 和 ϕ 分别为地心余纬和东经; $a \approx 6371$ km为地球平均半径; $\rho_{\text{ave}} \approx 5517$ kg/m³为地球平均密度; l 和 m 为阶和次; \tilde{P}_{lm} 为完全规格化的勒让德函数; $\Delta\tilde{C}_{lm}$ 和 $\Delta\tilde{S}_{lm}$ 分别为完全规格化的球谐系数变化量; k_l 为 l 阶勒夫数。

时变重力场模型反演TWS变化以等效水高形式表示为:

$$\Delta h(\theta, \phi) = \frac{\Delta\sigma}{\rho_w} = \frac{a\rho_{\text{ave}}}{3\rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_l} \times (\Delta\tilde{C}_{lm}\cos(m\phi) + \Delta\tilde{S}_{lm}\sin(m\phi)) \quad (2)$$

式中, Δh 为等效水高变化; $\rho_w = 1000$ kg/m³为水的密度。

1.2 水文模型数据

全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)是由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德航天中心与美国海洋和大气局国家环境预报中心共同建立的全球水文模型,该系统驱动NOAH、VIC、CLM和MOSAIC 4种陆面过程模型^[29]。本文采用2003-01—2021-12共228个月的GLDAS-2.1 NOAH、VIC和CLSM陆面模型月解数据的集合平均值,为了与重力卫星数据保持一致的分辨率,陆面模型的空间分辨率均为 $1^\circ \times 1^\circ$,同时2017-07—2018-05的数据不做分析。对水文模型输出的格网数据做球谐展开至60阶,并扣除平均重力场,采用300 km高斯滤波和尺度因子法对格网数据进行处理,以输出土壤含水量,植被冠层水和雪水当量数据来估计研究区土壤水和地表水储量(surface water storage, SWS)变化^[30]。其中,NOAH模型输出0~200 cm共4层土壤水分,VIC模型输出表层0~30 cm、第二层和第三层土壤水分,CLSM模型输出根区土壤水分。

1.3 地下水井实测数据

本文采用河北省地下水位监测成果,主要为利用地下水监测站点监测的浅层地下水位、深层地下水位和地下水埋深等数据成果。共收集2018—2021年期间华北平原区域内站点2177个,其中浅层水监测站1019个,深层水监测站1153个,观测间隔为4 h,水位单位为m。为便于计算和结果验证,研究时段取2018-06—2021-12,水位数据做月平均值处理。

为了将地下水水位数据转化为与重力卫星监测等效的GWS变化,需要将水位数据乘以相应的区域给水度得到水储量变化的等效水柱高。其中,给水度是指潜水层的地下水位每降低一个单位,单位面积含水层在重力作用下所释放出的水的体积。这种基于水位数据和给水度估计区域GWS变化的方法被广泛应用^[31-32]。但有相关研究表明,给水度与不同水文地质岩性及层次结构相关,参考《水文地质手册》及前人论文,根据岩性的不同,给水度经验值介于0.02~0.3之间。由于不同学者对区域给水度认识不一,且含水层

给水度会随地下水水位发生变化,华北平原浅层地下水给水度可能被较高评估^[33-35]。本文参考相关文献,得到华北平原浅层地下水平均给水度约为 0.04。

1.4 降水数据

热带降雨测量任务(tropical rainfall measuring mission, TRMM)卫星由 NASA 和日本宇航研发机构联合研制,用于定量测量热带、亚热带降水的气象卫星^[36-37]。本文使用 2003-01—2019-12 的 TRMM 3B43 月度数据集,提供覆盖区域为 50°N~50°S 范围内的降雨量估计,该降水数据单位为 mm/h。并融合其他数据源 GPM 3GPROF 产品数据进行辅助分析,选取 2020-01—2021-12 数据集,与 TRMM 降水数据尺度统一^[38]。对降水数据根据每月时长计算华北平原月总降雨量,单位转化为 mm/月。

1.5 获取 GWS 变化

根据水量平衡方程,TWS 变化主要受土壤水储量、SWS 和 GWS 变化的共同影响,其中 SWS 可看作雪水当量、植被冠层水、河流、湖泊和水库蓄水量的质量变化总和^[39-41]。由于华北平原地区的河流、湖泊和水库蓄水量变化对长期陆地水变化的影响相对较小,因此,本文忽略这些量对地表水变化的贡献,GWS 变化(ΔGWS)计算公式如下:

$$\Delta GWS = \Delta TWS - (\Delta SMS + \Delta SWE + \Delta CWS) \quad (3)$$

式中, ΔTWS 通过重力卫星反演得到; ΔSMS 、 ΔSWE 和 ΔCWS 从 GLDAS 陆面水文模型中获取,而 ΔGWS 从重力卫星监测的陆地水变化中扣除水文模型提取的地表水和土壤水变化估计得到,各水储量分量变化的单位为 cm。

2 华北地下水反演试验

2.1 重力卫星反演结果与水文模型比较分析

利用已得到的 2003-01—2021-12 的月时变重力场数据,分别采用 300 km 高斯滤波与 P4M6 去相关滤波对华北平原地区 TWS 变化进行反演,同时利用水文模型估计的研究区土壤水与 SWS 变化,与重力卫星反演结果进行对比,用于验证地下水变化对华北平原研究时段内的影响,对比结果如图 2 所示。

利用 GRACE Level2 数据与 GLDAS 水文模型估算的水储量变化均存在明显的季节性变化特征。2003—2004 年,GRACE 反演的 TWS 变

化大于 GLDAS 估计的水储量变化,2005—2013 年两者整体变化趋势较为一致,但从 2014 年开始,GLDAS 模型估计的水储量变化等效水高,明显大于 GRACE 反演结果,且越到后期,振幅差异越大,可能是由于 GLDAS 模型未包含地下水变化的贡献量,自 2014 年以后地下水变化对华北平原地区水储量贡献影响较大。

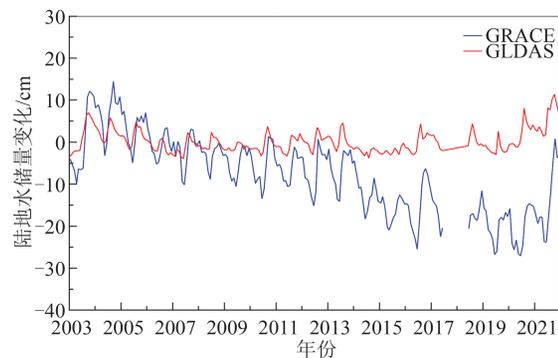


图 2 2003—2021 年基于重力卫星反演得到的华北平原 TWS 变化以及 GLDAS 估计的土壤水与 SWS 变化
Fig. 2 Changes in TWS in the North China Plain Based on Gravity Satellite Inversion and Changes in Soil Water and SWS Estimated by GLDAS from 2003 to 2021

2.2 重力卫星反演与浅层地下水估计结果比较分析

对于浅层 GWS 变化的估计结果,可以利用水位数据乘以对应给水度经验值获取,考虑到不同学者对区域给水度认识不一,且含水层给水度会随地下水水位发生变化,本文给出了华北平原地区不同平均给水度值估计的浅层 GWS 变化(表 1),包括周年和半周年的振幅和周期项以及不同时段内的趋势变化,并对比分析了重力卫星反演结果与平均给水度为 0.04 时浅层地下水井资料的估计结果(图 3)。图 3 中,虚线表示原始时间序列,实线表示进行十三点滑动平均扣除季节信号后的时间序列, r 表示基于重力卫星与浅层地下水井资料得到的 GWS 变化时间序列数值结果的皮尔逊相关系数。表 1 及本文后续内容中,将华北平原平均给水度值用 k 表示。

由图 3 可知,基于重力卫星反演的华北平原 GWS 变化与 $k=0.04$ 时浅层地下水井资料估计的地下水变化时间序列,均表现出较为一致的年际变化、多年趋势变化和季节性变化特征。从年际变化看,在 2003—2017 年内重力卫星反演得到的 GWS 变化总体上持续下降;2018-06—2021-12,基于重力卫星反演的 GWS 变化与浅层地下水井资料估计结果具有较高的一致性,该研究时段内年际变化呈现先缓慢回升后明显下降、最后快速上升的过程。

表1 重力卫星与华北平原地区不同 k 下浅层地下水并实测资料估计的GWS变化振幅、周期项和线性趋势对比
Tab. 1 Comparison of Amplitude, Period Term and Linear Trend of GWS Variation Estimated by Gravity Satellites and Shallow Groundwater Wells with Different Average Feedwater Degrees (k) in the North China Plain

统计项	周年		半年		线性趋势/(cm·a ⁻¹)			
	振幅/cm	相位/(°)	振幅/cm	相位/(°)	2003-01—2017-06	2018-06—2019-05	2019-06—2020-12	2021-01—2021-12
GRACE								
GRACE-FO	4.71	330	1.17	259	-1.3±0.6	1.5±0.9	-2.9±0.5	12.7±1.8
Shallow Well ($k=0.03$)	2.51		0.63		—	3.2±0.7	-1.1±0.2	7.0±1.1
Shallow Well ($k=0.04$)	3.35	347	0.84	100	—	4.2±0.9	-1.4±0.3	9.3±1.5
Shallow Well ($k=0.05$)	4.19		1.04		—	5.3±1.1	-1.8±0.3	11.7±1.9
Shallow Well ($k=0.06$)	5.03		1.25		—	6.4±1.4	-2.2±0.4	14.0±2.2

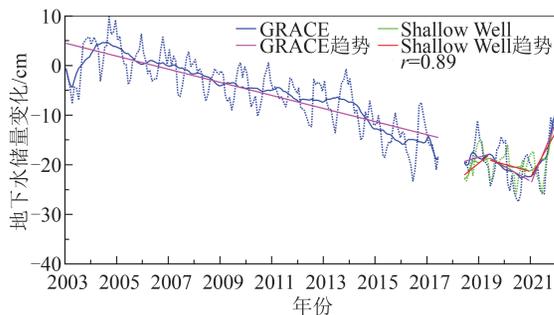


图3 2003—2021年基于重力卫星得到的华北平原GWS变化时间序列及分段趋势,以及2018-06—2021-12华北平原浅层地下水变化时间序列

Fig. 3 Time Series and Segmentation Trends of GWS Changes in the North China Plain Obtained Based on Gravity Satellites from 2003 to 2021, and Time Series of Shallow Groundwater Changes in the North China Plain from June 2018 to December 2021

从长期趋势变化看,自2003年以来,虽然部分年份华北平原GWS有所回升,但整体上仍存在明显的长期亏损趋势。2003-01—2017-06,由重力卫星观测得到的华北平原地下水亏损速率为 -1.3 ± 0.6 cm/a;2018-06—2019-05,基于重力卫星和浅层地下水井资料得到的GWS均处于上升趋势(GRACE-FO: 1.5 ± 0.9 cm/a;浅层地下水井: 4.2 ± 0.9 cm/a);2019-06—2020-12,重力卫星反演得到华北平原地下水以 -2.9 ± 0.5 cm/a的速率亏损,通过浅层地下水井实测数据估计的浅层GWS亏损速率为 -1.4 ± 0.3 cm/a;2021年重力卫星估计的地下水增长速率分别为 12.7 ± 1.8 cm/a,相同时段内浅层地下水位增长速率为 9.3 ± 1.5 cm/a(表1)。通过后面3个研究时段对比发现,浅层地下水井实测资料与基于重力卫星反演的GWS变化速率较为一致。

从季节性变化看,从2018年以后,GRACE-

FO反演的GWS变化结果呈现出较好的季节性变化特征,其与浅层地下水井资料的估计结果十分吻合,这与龙笛等^[42]给出的球谐系数产品相比Mascon产品呈现更显著的季节性变化结论相一致。

综上所述,基于重力卫星反演的华北平原GWS变化与浅层地下水井资料估计结果具有较好的一致性,且能够很好地反映年际变化、多年趋势变化和季节性变化。同时,计算出重力卫星与浅层地下水井资料得到的GWS变化时间序列的皮尔逊相关系数为0.89,两者的观测结果具有较强的相关性。重力卫星反演结果与地下水井资料观测结果之间存在部分差异,其原因主要是未考虑深层地下水对总GWS变化的贡献。

2.3 引入深层地下水井资料结果分析

在华北平原中东部地区(特别是沧州市、衡水市等)由于深层地下水的过度开采已发生大面积的地面沉降现象^[43-44]。本文利用已有浅层地下水水位数据和给水度先验值估算出华北平原浅层地下水变化的等效水高,然而,若将重力卫星反演的GWS变化与地下水井资料估计结果进行等效对比,还需考虑深层地下水对总地下水的贡献。而深层GWS的变化则又分为承压含水层的弹性释水和弱透水层的非弹性压密释水两部分。其中,弹性释水系数是指承压含水层的地下水头下降一个单位时,单位面积含水层在压力作用下所释放出的水的体积,通常只有给水度的1/1000或1/10000(较给水度小2~3个量级),因此弹性深层GWS变化可忽略不计^[45]。对于非弹性的压密释水,由于弱透水层的水头变化通常滞后于周围含水层,所以非弹性深层GWS变化相对于水头变化也存在明显的滞后,可利用“前期固结水头变化 \times 非弹性压密释水系数”对这部分水储量

变化进行计算^[46-47]。非弹性压密释水系数通常比弹性释水系数大 1~2 个量级,但前期固结水头往往无法直接测量,且会随着地下水的开采而发生变化^[47]。因此,利用浅层和深层地下水井资料,可由“浅层地下水位变化×平均给水度+深层地下水位变化×弹性释水系数+深层地下水位变化×平均非弹性压密释水系数”近似估计华北平原总 GWS 变化。本文利用重力卫星监测的 GWS 变化结果,结合浅层地下水井资料计算的浅层 GWS 变化与深层地下水位数据,基于最小二乘拟合估计得到 2018-06—2021-12 华北平原深层地下水的平均非弹性压密释水系数约为 1.25×10^{-2} 。

通过地下水井实测资料分别计算出浅层地下水位变化与深层地下水位变化,结合上文给出的华北平原浅层地下水平均给水度、弹性释水系数和平均非弹性压密释水系数,估计得到 2018—2021 年华北平原地区总 GWS 变化。

如图 4(a)所示,2018-06—2021-12,基于重力卫星反演的华北平原 GWS 变化与采用不同种地下水井资料估计的 GWS 变化,均表现出较为一致的季节性变化和年际变化特征。研究时段内,华北平原的 GWS 存在明显的周期变化,在每年的 6 月—8 月处于谷值,12 月至次年 2 月处于水储量峰值。其中,GRACE-FO 观测的 GWS 与仅使用浅层地下水井资料得到的浅层 GWS 变化一致性较高,但仍存在一定差异;重力卫星观测结果与仅使用深层地下水井资料得到的深层 GWS 变化存在较大差异;而将浅层和深层地下水变化结合后的总 GWS 变化与重力卫星观测结果吻合度较高,说明浅层地下水为 GWS 变化的主要变化量,该结论与《海河流域水资源公报》评价结果相符合。

如图 4(b)所示,扣除季节性信号后得到的非季节性 GWS 变化,在 2018—2020 年,GRACE-FO 的观测结果与各水井实测结果整体处于平稳下降趋势,且和融合后的总水储量非季节性变化基本一致。2021 年,GRACE-FO 观测的 GWS 与水井实测的地下水位表现出快速回升,与前期观测结果形成鲜明的 U 型反转。同时由重力卫星与浅层、深层和总地下水井资料得到的 GWS 变化时序结果的皮尔逊相关系数分别为 0.89、0.78 和 0.98,说明基于浅层和深层地下水井实测资料融合后的总 GWS 变化与重力卫星观测的 GWS 变化具有极强的相关性,主要表现在周期和年际

振幅变化的一致性较好。

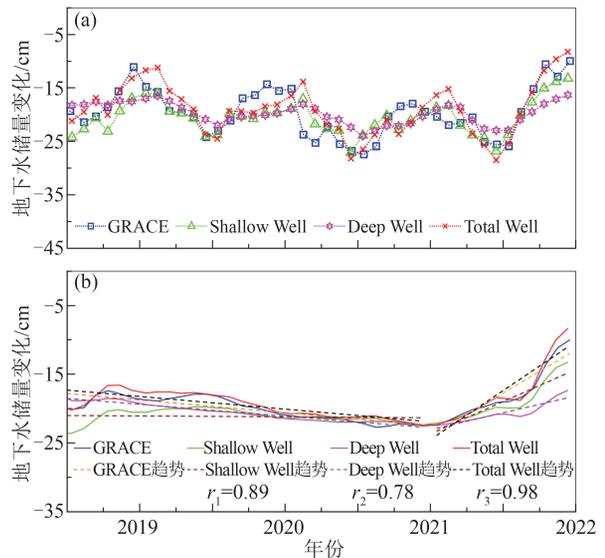


图 4 2018-06—2021-12,基于重力卫星和地下水井资料估计的华北平原 GWS 变化原始时间序列(a),以及对原始时序进行十三点滑动平均扣除季节信号后的时间序列及分段趋势变化(b)

Fig. 4 Original Time Series of GWS Change in the North China Plain Estimated Based on Gravity Satellite and Groundwater Well Information (a), and Time Series and Segmented Trend Change After Deducting Seasonal Signals by Thirteen-Point Sliding Average of the Original Time Series (b) from June 2018 to December 2021

本文对重力卫星反演的结果进行分段拟合,估计华北平原 GWS 多年趋势变化,同时与水井资料得到的各地下水趋势变化结果进行对比(表 2)。2018—2020 年,由 GRACE-FO 估计的地下水亏损速率为 -1.9 ± 0.7 cm/a,这与同时段内利用浅层和深层地下水井资料融合后估计的结果 -1.8 ± 0.8 cm/a 十分吻合;2021 年,重力卫星观测的 GWS 发生明显增长,增长速率为 12.7 ± 1.8 cm/a,基于浅层、深层和总地下水井资料观测的 GWS 在相同时间内也处于上升状态,上升速率分别为 9.3 ± 1.5 cm/a、 4.9 ± 0.8 cm/a 和 14.3 ± 2.3 cm/a。通过 GWS 多年趋势变化可以发现,GRACE-FO 卫星与融合后的总地下水井资料观测结果在不同时段内多年趋势变化基本一致。

引入深层地下水井资料得到的总 GWS 变化,从时间序列年际变化、长期趋势变化、季节性变化和皮尔逊相关系数等方面相较于文献[31]仅使用浅层地下水估计的 GWS 变化,与重力卫星监测的 GWS 变化吻合度更高。

图 5 进一步给出了 2018—2021 年期间,基于重力卫星与总地下水井实测资料观测的华北平

原GWS年际变化趋势空间分布。其中,为了保证与重力卫星相同的数据处理策略,对总地下水井资料观测结果进行球谐展开至60阶,并采用了300 km的高斯平滑滤波处理。图5中每行表示采用不同数据及方法计算相同时间范围内的长期变化趋势结果。

表2 重力卫星和地下水井资料估计的不同时段华北平原GWS变化趋势/($\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$)

Tab. 2 Trends in GWS in the North China Plain Estimated by Gravity Satellite and Groundwater Well Information for Different Time Periods/($\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$)

时间段	GRACE-FO	浅层地下水井	深层地下水井	总地下水井
2018—2020年	-1.9 ± 0.7	-0.1 ± 0.8	-1.7 ± 0.2	-1.8 ± 0.8
2021年	12.7 ± 1.8	9.3 ± 1.5	4.9 ± 0.8	14.3 ± 2.3

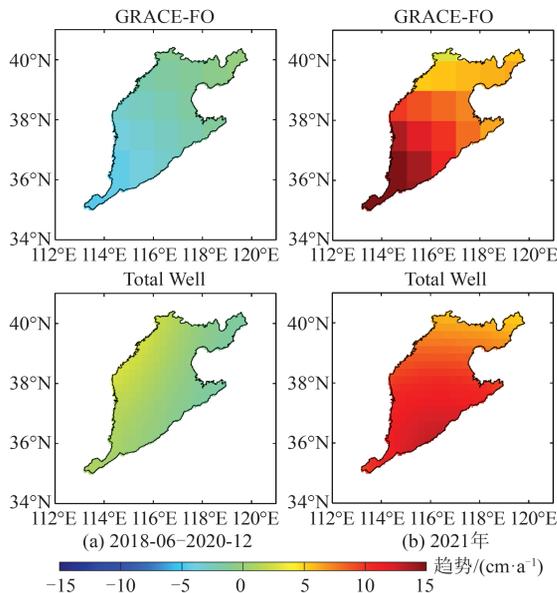


图5 2018—2021年期间,基于重力卫星与总地下水井实测资料观测的华北平原GWS年际变化趋势空间分布

Fig. 5 Spatial Distribution of GWS Change Rate in the North China Plain Based on Gravity Satellite and Total Groundwater Well Information from 2018 to 2021

由图5(a)可知,2018-06—2020-12,通过重力卫星与总地下水井资料得到的华北平原GWS亏损速率的空间分布较为一致。其中重力卫星监测的地下水亏损信号几乎覆盖整个研究区,亏损信号主要集中在华北平原西南部,即河北省南部城市和河南省部分地区,最大亏损速率为 -4.7 cm/a 。将重力卫星反演结果与水井资料估计结果对比发现,两者在华北平原地区东北部的亏损信号分布基本一致,但由水井资料得到的GWS变化趋势在华北平原西

部出现少量盈余信号,这一分布特征与重力卫星反演结果分布有所不同。由图5(b)可知,2021年华北平原GWS盈余较为明显,且两种计算结果均表现出该研究区南部强烈的盈余信号,GWS变化速率向正北方向逐渐递减。重力卫星与水井资料得到的地下水盈余信号的空间分布基本相同,但重力卫星计算结果以河南省为盈余中心,最大增长速率超过 15 cm/a ,而水井资料以山东省为盈余中心(特别是聊城市),最大增长速率为 13 cm/a 。重力卫星与地下水井实测资料观测结果存在差异的原因,一方面在于虽然GRACE-FO卫星相比GRACE重力卫星各方面得到很大的提升,但仍无法提供较高空间分辨率的GWS变化信息,另一方面可能在于数据分辨率的不一致性及数据处理方法的不同。

2.4 降雨影响分析

降雨作为影响华北平原GWS变化的关键因素之一^[48],进一步分析降雨与地下水变化之间的关系十分必要。图6为2003—2021年重力卫星数据得到的未扣除季节项的GWS变化原始时间序列和同期每月降雨量,以及2018-06—2021-12华北平原总GWS变化原始时间序列。此外,为了深入分析降雨对地下水变化的影响,计算得到华北平原年降雨量距平值,如图7所示。

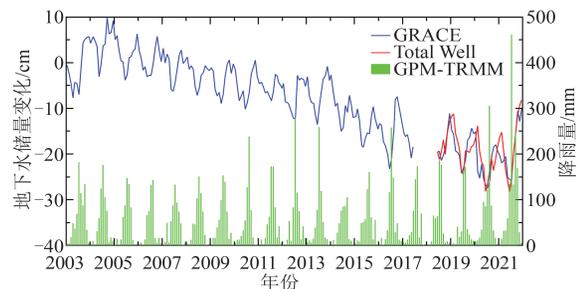


图6 2003—2021年基于重力卫星得到的华北平原GWS变化原始时间序列和同期每月降雨量,以及2018-06—2021-12基于地下水井实测资料得到的总GWS变化原始时间序列

Fig. 6 Original Time Series of GWS Changes Based on Gravity Satellites and Monthly Rainfall Data from 2003 to 2021, and Total GWS Changes Based on Actual Groundwater Well Measurements from Jun. 2018 to Dec. 2021 in the North China Plain

由图6可知,华北平原降雨汛期通常集中在每年的6月—8月,重力卫星观测结果相较降雨数据存在几个月的滞后性^[15],主要是因为降雨对地下水补给时需要一定的入渗过程。将得到的华北平原GWS变化时间序列与降雨量数据对比分析,原始时间序列具有明显的季节波动信号,且

其季节波动与降雨量存在相关性,当降雨量增多时,GWS上升,反之亦然,该现象在2014年和2021年表现最为明显。

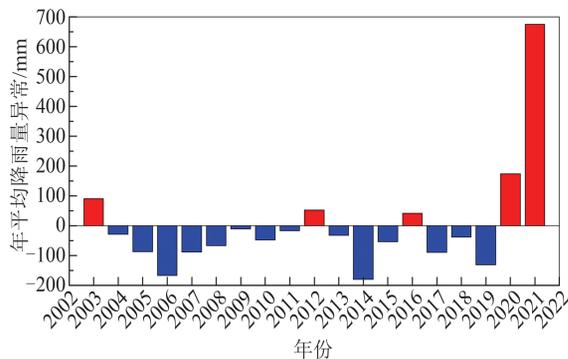


图7 2003—2021年华北平原年平均降雨量异常

Fig. 7 Annual Average Rainfall Anomalies from 2003 to 2021 in the North China Plain

结合图2和图6可以发现,在降雨量明显偏少的2014—2019年,由重力卫星监测的TWS变化显著下降,但GLDAS模型估计的水储量基本趋于稳定或略有上升,由此推断对于降雨量较少的年份,降水会优先补给土壤水和潜层地表水,从而进一步验证了§2.1所述的GLDAS水文模型未顾及地下水的影响这一结论。

结合图3和图7可以发现,对原始时间序列进行十三点滑动平均处理,扣除季节项后得到华北平原地区的非季节性地下水年际变化,这与降雨的年际变化规律较为吻合。2003—2004年GWS有所回升,同时期的平均年降水量相应增加或基本保持不变,吻合度较好。2005—2019年降雨量较多,年平均降雨量明显减少,该时段的GWS也在持续下降,尤其在2014年华北平原降雨量显著低于年平均降雨量 -179.8 mm,由重力卫星观测的地下水下降较为迅速。2020—2021年降雨量相对多年平均显著增加,特别是在2021年,该地区降雨量远高出年平均降雨量 674.4 mm,重力卫星和地下水井资料观测得到的GWS均表现出显著上升。

图8显示了2021年降雨量变化趋势的空间分布。降雨量变化在华北平原表现出南升北降的分布特征,降雨呈增长趋势的地区主要分布在河南、山东以及河北省的邯郸和邢台等地,增长速率超过 45 mm/a,降雨呈减少趋势的地区主要分布在北京、天津以及河北省的西北部,减少速率超过 45 mm/a,该空间特征分布与图5(b)GWS变化速率的分布具有较高一致性。

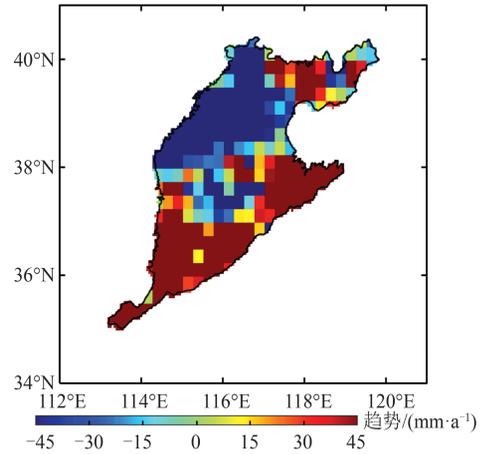


图8 2021年降雨量变化趋势的空间分布

Fig. 8 Spatial Distribution of the Anomalous Rate of Rainfall Change in 2021

2.5 南水北调影响分析

南水北调中线一期工程于2014-12-12正式通水运行,并规划每年从汉江中上游的丹江口水库调水 95 亿 m^3 流入华北平原。南水北调东线一期工程于2013-11-15建成通水,主要向山东省及江苏省的各城市输水,在研究时段内相较于中线一期工程,东线工程对河北省及天津市供水量较小,故本文主要分析南水北调中线一期工程对华北平原地区水储量变化的影响。

本文收集了各省市和华北平原区域总面积以及2014—2021年期间各地区南水北调的每年入境调水量(表3)。其中各省市的面积之和约为 $538\ 676.45$ km^2 ,而华北平原地区的区域总面积约为 $132\ 000$ km^2 ^[49],占各省市面积总和的 24.5% (图1),利用华北平原与全省(市)总面积的比例估算出华北平原受水区的南水北调入境调水量。各地区南水北调的每年入境调水量来自北京市和天津市水务局以及河北、河南和山东省水利厅公布的相应省份水资源公报。考虑到2014年华北平原入境调水量较少,因此对GRACE和GLDAS水文模型反演的水储量变化进行南水北调分析时,以2015年为时间节点分段拟合求趋势变化。

图9为2003—2021年基于重力卫星和GLDAS水文模型得到的华北平原水储量变化时间序列。2003年降雨较多,由GRACE和GLDAS得到的各水储量变化均表现出明显上升;2004—2007年降雨量明显偏少,华北平原地下水开采量较往年规模有所加大,各水储量变化下降迅速;2008—2013年,基于GRACE观测的TWS和GWS变化缓慢下降,而GLDAS模型估算的SWS变化趋于稳定甚至略有抬升,主要受降雨因素影响较大;

表3 各区域总面积以及2014—2021年南水北调的入境调水量

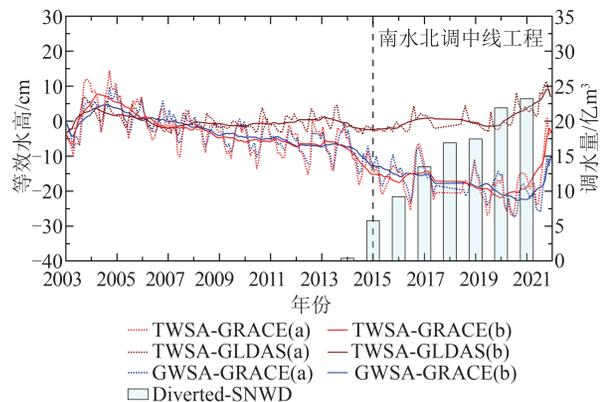
Tab. 3 Total Regional Area of Each Region and Inbound Water Transfer from South to North from 2014 to 2021

地区	面积/km ²	南水北调的入境调水量/10 ⁸ m ³							
		2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
北京	16 410	0.84	8.81	10.63	10.77	11.92	9.85	8.82	12.51
天津	11 966.45	0.06	3.79	8.88	10.06	11.04	11.63	12.88	11.46
河北	188 800	0.001 2	1.09	3.57	8.09	23.89	23.64	37.09	38.25
河南	165 700	0.50	9.13	13.30	18.60	16.10	19.80	26.42	27.14
山东	155 800	0.20	0.76	1.23	7.40	5.95	6.36	4.25	5.30
合计	538 676.45	1.601 2	23.58	37.61	54.92	68.90	71.28	89.46	94.66
华北平原	132 000	0.39	5.78	9.21	13.46	16.88	17.46	21.92	23.19

2014年华北平原旱情较为严峻,虽然有从丹江口水库引调水,但输水量较少,各水储量变化均发生显著下降。从2015年开始,南水北调中线工程向华北平原的调水量逐年递增;2015—2019年,GRACE-FO反演的TWS和GWS变化仍呈现下降趋势,GLDAS估计的SWS变化有所回升,该结果为降雨和南水北调的共同影响,考虑到在该时段内降雨量偏少,南水北调中线工程对地表水的补充发挥一定作用;2020—2021年,各水储量变化均呈现显著上升趋势,降雨量对水储量变化的贡献较大,该现象在§2.4已进行详细分析。

为了进一步分析南水北调对华北平原水储量的影响,通过对比2015年前后各水储量和南水北调入境调水量的变化速率,从而量化南水北调对水储量变化的贡献,如表4所示。结果表明,2004—2014年,基于GRACE观测的TWS变化速率为 -1.47 ± 0.61 cm/a, GLDAS模型估计的SWS变化速率为 -0.21 ± 0.41 cm/a, GRACE监测的GWS趋势变化为 -1.26 ± 0.31 cm/a,该时段内TWS的亏损主要是由于地下水过度超采导致。2015—2019年,TWS和SWS变化速率分别为 -1.08 ± 0.66 cm/a和 0.19 ± 0.57 cm/a,与调水前相比有所回升,GWS变化趋势基本不变,考虑

到该时段内降雨量较少,南水北调对水储量变化的贡献较大。2015—2021年,各水储量趋势变化较2015年以前均有明显增长,主要受降雨量和南水北调的共同影响。



注:图例中(a)表示原始时间序列;(b)表示十三点滑动平均后的非季节性时间序列。

图9 2003—2021年基于重力卫星和GLDAS水文模型得到的华北平原水储量变化时间序列,以及2014—2021年华北平原地区的南水北调中线工程每年入境调水量
Fig. 9 Time Series of Water Storage Changes in the North China Plain Obtained Based on Gravity Satellite and GLDAS Hydrological Models from 2003 to 2021, and Annual Inbound Water Transfer from the South-North Water Transfer Central Project from 2014 to 2021

表4 2004—2021年华北平原水储量变化速率与南水北调入境调水量速率对比/(cm·a⁻¹)

Tab. 4 Comparison of the Rate of Change of Water Storage in the North China Plain with the Rate of Inbound Water Transfer from South to North from 2004 to 2021/(cm·a⁻¹)

数据源	2004—2014年 (Trend1)	2015—2019年 (Trend2)	2015—2021年 (Trend3)	Trend2—Trend1	Trend3—Trend1
ΔTWS(GRACE)	-1.47 ± 0.61	-1.08 ± 0.66	0.03 ± 1.70	0.39 ± 0.89	1.50 ± 1.81
ΔSWS(GLDAS)	-0.21 ± 0.41	0.19 ± 0.57	0.97 ± 0.85	0.40 ± 0.70	1.18 ± 0.94
ΔGWS(GRACE)	-1.26 ± 0.31	-1.27 ± 0.33	-0.94 ± 1.05	-0.01 ± 0.45	0.32 ± 1.09
南水北调	0	0.24	0.22	0.24	0.22

顾及华北平原地区2020—2021年降雨量偏多,将2015—2019年和2015—2021年两个时间

段的水储量变化速率分别与2004—2014年期间的速率作差,对比南水北调前后水储量变化趋势

与调水量的差值(表4最后两列)。第一时段TWS和SWS变化速率在南水北调前后的差值分别为 0.39 ± 0.89 cm/a和 0.40 ± 0.70 cm/a,与南水北调入境调水量速率较为吻合,南水北调对陆地水和SWS的贡献约为60%,TWS和SWS变化速率略大于南水北调调水速率的原因主要在于气候变化和农业灌溉用水限制的影响^[50]。该结果表明南水北调的调水量主要被用于华北平原各城市供水、河湖生态补水和大中型水库蓄水,当地对地下水的开采明显减少,2015—2019年华北平原陆地水和地表水得到有效恢复,GWS变化的亏损趋势不再显著^[51]。此外,第二时段TWS、SWS和GWS趋势变化在南水北调前后的差值均有明显上升,由于降雨优先入渗补给土壤水和地表水,因此SWS和TWS变化上升速率更为明显,气候因素对水储量变化的贡献最大,南水北调在一定程度上对地下水位的回升有所贡献^[50]。综上所述,南水北调工程对缓解华北平原地区水资源危机,恢复水储量变化和改善生态环境发挥了重要作用^[52]。

3 结 语

本文使用重力卫星数据基于球谐系数法监测得到华北平原GWS变化,并进行时空特征变化分析,通过与水文模型、地下水井资料、降水数据以及南水北调入境调水量进行对比分析,得到如下结论:

1)利用重力卫星反演得到的华北平原TWS变化与GLDAS水文模型估算结果,在时间序列上均表现出明显的季节性变化特征,并表明水文模型与重力卫星观测结果存在差异的主要原因在于GLDAS模型未考虑地下水的影响。

2)给出了华北平原不同平均给水度值估计的浅层GWS变化,并对比分析了基于重力卫星观测的华北平原GWS变化与给水度为0.04时浅层地下水井资料估计结果。两种观测结果从年际变化、多年趋势变化和季节性变化特征上具有较高的一致性,两者相关系数为0.89,具有较强的相关性,但仍存在部分差异,其原因主要是未考虑深层地下水对总GWS变化的贡献。

3)本文给出了2018-06—2021-12华北平原深层地下水的平均非弹性压密释水系数约为 1.25×10^{-2} 。该时段重力卫星监测的华北平原GWS变化与基于浅层和深层水井实测资料融合后得到的总GWS变化,从时间序列变化和空间特征分布

上均表现出很好的一致性,两者观测结果的相关系数为0.98,相较于仅使用浅层地下水估计的储量变化吻合度更高。采用地下水井实测资料进一步验证了重力卫星监测华北平原GWS变化的可靠性,同时说明考虑深层地下水的贡献为有效估计GWS变化提供了更好的结果。

4)华北平原GWS变化具有明显的季节波动信号,且其季节波动与降雨量异常息息相关,两者的年际变化规律和趋势空间分布较为吻合。由降雨数据进一步验证了GLDAS水文模型未顾及地下水变化的影响这一结论。降雨对地下水具有直接的正相关影响,在降雨量异常显著的2014年和2021年表现尤为明显。

5)南水北调工程对华北平原水储量变化具有直接影响,特别是在降雨量偏少的2015—2019年期间,南水北调输水贡献十分显著。调水量主要被用于华北平原各城市供水、河湖生态补水和大中型水库蓄水,有效恢复了华北平原的陆地水和地表水,在缓解地下水长期亏损和改善水资源短缺危机中发挥了重要作用。

虽然本文基于浅层和深层地下水井实测资料有效估计了华北平原的GWS变化,但其在空间分布上仍存在一定差异,可能的原因是一方面重力卫星自身无法提供较高空间分辨率的地下水变化信息;另一方面,使用的地下水井实测数据虽然考虑到深层地下水的贡献,但站点分布并不均匀,主要分布在华北平原地区的河北省。随着重力卫星技术的快速发展以及多源数据的不断丰富,有望提供更高空间分辨率的地下水变化分析,进一步推动重力卫星在水文领域的应用。

参 考 文 献

- [1] Shi J S, Wang Z, Zhang Z J, et al. Assessment of Deep Groundwater Over-exploitation in the North China Plain[J]. *Geoscience Frontiers*, 2011, 2(4): 593-598.
- [2] Wang Jielong, Yang Ling, Chen Yi, et al. Prediction of Watershed Groundwater Storage Based on Seasonal Adjustment and NAR Neural Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1796-1804. (王杰龙, 杨玲, 陈义, 等. 结合季节调整和NAR神经网络的流域地下水储量预测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(10): 1796-1804.)
- [3] Ran Jiangjun, Yan Zhengwen, Wu Yunlong, et al. Research Status and Future Perspectives in Next Generation Gravity Mission[J]. *Geomatics and In-*

- formation Science of Wuhan University*, 2023, 48(6): 841-857. (冉将军, 闫政文, 吴云龙, 等. 下一代重力卫星任务研究概述与未来展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 841-857.)
- [4] Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, et al. Time-Varying Gravity from GRACE: First Results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(11).
- [5] Feng Wei, Jeanmichel Lemoine, Zhong Min, et al. Terrestrial Water Storage Changes in the Amazon Basin Measured by GRACE During 2002-2010[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 814-821. (冯伟, Jean-Michel LEMOINE, 钟敏, 等. 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, 2012, 55(3): 814-821.)
- [6] Li Qiong, Luo Zhicai, Zhong Bo, et al. Terrestrial Water Storage Changes of the 2010 Southwest China Drought Detected by GRACE Temporal Gravity Field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(6): 1843-1849. (李琼, 罗志才, 钟波, 等. 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): 1843-1849.)
- [7] Famiglietti J S, Lo M, Ho S L, et al. Satellites Measure Recent Rates of Groundwater Depletion in California's Central Valley [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(3): 2010GL046442.
- [8] Scanlon B R, Longuevergne L, Long D. Groundwater Storage Changes in the California Central Valley, USA[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(4): W04520.
- [9] Chen J L, Famiglietti J S, Scanlon B R, et al. Groundwater Storage Changes: Present Status from GRACE Observations [J]. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37(2): 397-417.
- [10] Castellazzi P, Longuevergne L, Martel R, et al. Quantitative Mapping of Groundwater Depletion at the Water Management Scale Using a Combined GRACE/InSAR Approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 205: 408-418.
- [11] Massoud E C, Liu Z, Shaban A M, et al. Groundwater Depletion Signals in the Beqaa Plain, Lebanon: Evidence from GRACE and Sentinel-1 Data [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 915.
- [12] Zhong Min, Duan Jianbin, Xu Houze, et al. Using Satellite Gravity Observation to Study the Variation Trend of Land Water Volume in China in the Middle and Long Spatial Scales in Recent Five Years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(9): 1290-1294. (钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 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, 2009, 54(9): 1290-1294.)
- [13] Tang Q H, Zhang X J, Tang Y. Anthropogenic Impacts on Mass Change in North China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(15): 3924-3928.
- [14] Huang Z Y, Pan Y, Gong H L, et al. Subregional-Scale Groundwater Depletion Detected by GRACE for both Shallow and Deep Aquifers in North China Plain [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(6): 1791-1799.
- [15] Li Zhen, Zhang Chuanyin, Ke Baogui, et al. North China Plain Water Storage Variation Analysis Based on GRACE and Seasonal Influence Considering [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 940-949. (李圳, 章传银, 柯宝贵, 等. 顾及 GRACE 季节影响的华北平原水储量变化反演 [J]. 测绘学报, 2018, 47(7): 940-949.)
- [16] Wei Wei, Su Yong, Zheng Wenlei, et al. Monitoring the Variation of Terrestrial Water Storage in North China by Three-dimensional Acceleration Point-Mass Modeling Approach [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 551-560. (魏伟, 苏勇, 郑文磊, 等. 利用三维加速度点质量模型法解算华北地区陆地水储量变化 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(4): 551-560.)
- [17] Liu R L, Zhong B, Li X P, et al. Analysis of Groundwater Changes (2003-2020) in the North China Plain Using Geodetic Measurements [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 41: 101085.
- [18] Ferreira V G, Montecino H D C, Yakubu C I, et al. Uncertainties of the Gravity Recovery and Climate Experiment Time-variable Gravity-field Solutions Based on Three-cornered Hat Method [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10: 015015.
- [19] Yao Chaolong, Li Qiong, Luo Zhicai, et al. Uncertainties in GRACE-derived Terrestrial Water Storage Changes over China's Mainland Based on a Generalized Three-cornered Hat Method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(3): 883-897. (姚朝龙, 李琼, 罗志才, 等. 利用广义三角帽方法评估 GRACE 反演中国大陆地区水储量变化的不确定性 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(3): 883-897.)
- [20] Zhong Yulong, Zhong Min, Feng Wei, et al. Evaluation of the Evapotranspiration in the West Liaohe River Basin Based on GRACE Satellite and in Situ Measurements [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(2): 173-178. (钟玉

- 龙, 钟敏, 冯伟, 等. 联合 GRACE 重力卫星与实测资料估计西辽河流域蒸散发量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(2): 173-178.)
- [21] Li Wanqiu, Guo Qiuying, Zhang Chuanyin, et al. Study on Terrestrial Water Storage and Crustal Vertical Variation in Xinjiang Region Using Independent Component Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220573. (李婉秋, 郭秋英, 章传银, 等. 利用独立成分分析法研究新疆地区 TWS 及其地壳垂向变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, DOI:10.13203/j.whugis20220573.)
- [22] Sun Y, Riva R, Ditmar P. Optimizing Estimates of Annual Variations and Trends in Geocenter Motion and J_2 from a Combination of GRACE Data and Geophysical Models [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(11): 8352-8370.
- [23] Loomis B D, Rachlin K E, Luthcke S B. Improved Earth Oblateness Rate Reveals Increased Ice Sheet Losses and Mass-Driven Sea Level Rise [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(12): 6910-6917.
- [24] Argus D F, Peltier W R, Drummond R, et al. The Antarctica Component of Postglacial Rebound Model ICE-6G_C (VM5a) Based on GPS Positioning, Exposure Age Dating of Ice Thicknesses, and Relative Sea Level Histories [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 198(1): 537-563.
- [25] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30205-30229.
- [26] Chambers D P. Evaluation of New GRACE Time-Varying Gravity Data over the Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(17).
- [27] Chen J L, Wilson C R, Famiglietti J S, et al. Spatial Sensitivity of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Time-Varying Gravity Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B8).
- [28] Li Wanqiu, Wang Wei, Zhang Chuanyin, et al. Monitoring Groundwater Storage Variations in the Guanzhong Area Using GRACE Satellite Gravity Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(6): 2237-2245. (李婉秋, 王伟, 章传银, 等. 利用 GRACE 卫星重力数据监测关中地区地下水储量变化 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(6): 2237-2245.)
- [29] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The Global Land Data Assimilation System [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394.
- [30] Cao Y P, Nan Z T, Cheng G D. GRACE Gravity Satellite Observations of Terrestrial Water Storage Changes for Drought Characterization in the Arid Land of Northwestern China [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 1021-1047.
- [31] Feng Wei, Wang Changqing, Mu Dapeng, et al. Groundwater storage variations in the North China Plain from GRACE with spatial constraints [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(5): 1630-1642. (冯伟, 王长青, 穆大鹏, 等. 基于 GRACE 的空间约束方法监测华北平原 GWS 变化 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1630-1642.)
- [32] Wang Zemin, He Jie, Yang Yuande. Evaluation of Mass Balance in the Antarctic Ice Sheet from New GRACE Data [J]. *Journal of Geomatics*, 2017, 42(1): 1-5. (王泽民, 何杰, 杨元德. 利用 GRACE 数据反演南极地区冰盖质量变化 [J]. 测绘地理信息, 2017, 42(1): 1-5.)
- [33] Qian Yong. Research on Evolvement of Shallow Groundwater System Impacted by Exploiting in North China Plain [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2007. (钱永. 开采条件下华北平原浅层地下水系统演变研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2007.)
- [34] Pei Yuansheng, Li Xudong, Zhao Yong, et al. Research on Vertical Recharge and Specific Yield of the Unconfined Aquifer in a Typical Deep Groundwater Areas of North China Plain [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(1): 176-193. (裴源生, 李旭东, 赵勇, 等. 华北典型地下水大深埋区潜水层垂向补给特征及其给水度 [J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 176-193.)
- [35] Liu Rong, Zhao Yong, He Xin, et al. Evaluation of Cumulative Recoverable Overexploitation of Groundwater in Haihe Plain [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(11): 1336-1349. (刘蓉, 赵勇, 何鑫, 等. 海河平原区地下水累计可恢复超采量评价 [J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1336-1349.)
- [36] Chen Qiufa. World Spacecraft Encyclopedia [M]. Beijing: International Cooperation Center of China Aerospace, 2012. (陈求发. 世界航天器大全 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.)
- [37] Sharafati A, Asadollah S B H S, Neshat A. A New Artificial Intelligence Strategy for Predicting the Groundwater Level over the Rafsanjan Aquifer in Iran [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125468.

- [38] Gemitzi A, Koutsias N, Lakshmi V. A Spatial Downscaling Methodology for GRACE Total Water Storage Anomalies Using GPM IMERG Precipitation Estimates[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5149.
- [39] Voss K A, Famiglietti J S, Lo M, et al. Groundwater Depletion in the Middle East from GRACE with Implications for Transboundary Water Management in the Tigris-Euphrates-Western Iran Region [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(2): 904-914.
- [40] Long D, Chen X, Scanlon B R, et al. Have GRACE Satellites Overestimated Groundwater Depletion in the Northwest India Aquifer? [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24398.
- [41] Zhang J X, Liu K, Wang M. Seasonal and Interannual Variations in China's Groundwater Based on GRACE Data and Multisource Hydrological Models [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 845.
- [42] Long Di, Yang Wenting, Sun Zhangli, et al. GRACE Satellite-Based Estimation of Groundwater Storage Changes and Water Balance Analysis for the Haihe River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(3): 255-267. (龙笛, 杨文婷, 孙章丽, 等. 海河平原地下水储量变化的重力卫星反演和流域水量平衡[J]. 水利学报, 2023, 54(3): 255-267.)
- [43] Liu C M, Yu J J, Kendy E. Groundwater Exploitation and Its Impact on the Environment in the North China Plain [J]. *Water International*, 2001, 26(2): 265-272.
- [44] Fei Yuhong, Miao Jinxiang, Zhang Zhaoji, et al. Analysis on Evolution of Groundwater Depression Cones and Its Leading Factors in North China Plain [J]. *Resources Science*, 2009, 31(3): 394-399. (费宇红, 苗晋祥, 张兆吉, 等. 华北平原地下水降落漏斗演变及主导因素分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 394-399.)
- [45] Cao G L, Zheng C M, Scanlon B R, et al. Use of Flow Modeling to Assess Sustainability of Groundwater Resources in the North China Plain [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 159-175.
- [46] Hoffmann J, Galloway D L, Zebker H A. Inverse Modeling of Interbed Storage Parameters Using Land Subsidence Observations, Antelope Valley, California [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(2): 1031.
- [47] Bai Lin, Li Zhenhong, Song Sha, et al. Estimation of the Land Deformation and Aquifer Parameters in the Handan Plain Using Multi-temporal InSAR Technology [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(9): 3351-3362. (白林, 李振洪, 宋莎, 等. 利用时序 InSAR 技术反演邯郸平原区地表形变与含水层参数[J]. 地球物理学报, 2022, 65(9): 3351-3362.)
- [48] Zhao Q, Zhang B, Yao Y B, et al. Geodetic and Hydrological Measurements Reveal the Recent Acceleration of Groundwater Depletion in North China Plain [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 1065-1072.
- [49] Yang W T, Long D, Scanlon B R, et al. Human Intervention will Stabilize Groundwater Storage Across the North China Plain [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(2): e2021WR030884.
- [50] Long D, Yang W T, Scanlon B R, et al. South-to-North Water Diversion Stabilizing Beijing's Groundwater Levels [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3665.
- [51] Zhang C, Duan Q Y, Yeh P J F, et al. The Effectiveness of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project on Water Delivery and Groundwater Recovery in North China Plain [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): SY55D-371.
- [52] Li Jia, Tang He, Rao Weilong, et al. Influence of South-to-North Water Transfer Project on the Changes of Terrestrial Water Storage in North China Plain [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 37(6): 775-783. (李嘉, 唐河, 饶维龙, 等. 南水北调工程对华北平原水储量变化的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(6): 775-783.)