

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221461

# 基于重力卫星数据的黄河流域陆地水储量反演研究

朱博文, 尹璟晨, 常建波, 史浩宇

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为探究黄河流域陆地水储量时空分异情况, 基于整合后 2003~2020 年的 GRACE-FO 重力卫星数据对黄河流域陆地水储量进行反演, 同时结合 VIC 水文模型所得土壤水数据, 通过水量平衡方程计算分析了该区域 2003~2014 年间地下水储量。结果表明, 研究时段内, 黄河流域陆地水储量整体呈亏损状态, 其时间上呈显著下降趋势, 空间上由河源向下游递减; 黄河流域地下水储量年内变幅较大, 年际变幅较小; 陆地与地下水储量变化均呈显著的季节性周期, 且地下水储量变化相对于陆地水存在一定滞后性。反演结果显示黄河流域陆地水储量的时空变化与黄河流域地形地貌、气候及人类活动等因素相关程度较高, 其成果可为黄河流域水资源规划与配置提供科学依据。

**关键词:** 黄河流域; GRACE-FO; 陆地水储量; 地下水储量; 时空变化

**中图分类号:** TV211.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)07-0036-04

## 1 概况

黄河流域(96°~119°E, 32°~42°N)为我国第二大流域, 幅员辽阔, 各分区地貌差异较大。流域处于中纬度地带, 受大气环流和季风环流影响, 气候要素的年、季变化大, 不同地区气候特征差异显著。黄河流域径流的主要补给来源为降水, 因此其年内分配不均匀, 年际变化较大。近年来, 黄河流域旱情逐渐加重, 水资源供需矛盾愈加尖锐。陆地水储量(TWS)是水资源管理和利用的重要参考数据。对黄河流域, 地下水是其生活生产的重要水源, 2003~2020 年期间, 黄河供水区地下水取水量占总取水量的 20%~30%<sup>[1]</sup>, 因此有效监测黄河流域陆地水储量, 尤其地下水储量(GWS)是实现流域水资源合理规划与利用的基础。GRACE 卫星以提供地球重力场的时空变化数据为目的, 全球重力场时变主要由大气、海洋和地面的水储量再分配所致, 其时间尺度为月、季节或年, 受地球内部影响产生的变化主要表现在 10 年或更长的时间尺度上。排除此部分重力效应后, GRACE 卫星便可用来观测陆地水储量的变化情况<sup>[2]</sup>。利用 GRACE 数据能以较高精度监测大尺度流域的陆地水储量, 进而以水量平衡原理

为理论基础, 结合多源数据可对水循环的各组分进行计算。BILLAH M M 等<sup>[3]</sup>利用 GRACE 卫星观测南卡罗来纳州流域的陆地水储量变化, 并根据水量平衡原理推算出了流域的蒸散发情况; ZHONG Y 等<sup>[4]</sup>利用水量平衡方程计算并分析了辽河流域西部 2005~2011 年的地下水储量变化情况, 并据此对该地区的地下水短缺状况进行了评价。为此, 本文采用 GRACE-FO (GRACE Follow-On) 卫星数据, 对黄河流域陆地水储量及地下水储量变化进行定量计算, 明确了其时空分布及变化趋势, 以期为黄河流域水资源量合理利用与配置提供科学参考。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 GRACE-FO 数据

GRACE-FO 是 GRACE 卫星的“后继者”。GRACE 卫星于 2002 年 3 月 17 日发射, 2017 年坠毁, 于 2018 年发射的 GRACE-FO 卫星接替其监测工作。与 GRACE 卫星相同, GRACE-FO 仍采用双星结构, 通过测距仪器连续测量两子星之间的距离, 以计算地球表面的质量变化。但相比其前身 GRACE 卫星使用的微波测距, GRACE-FO 使用的激光测距法更加准确, 其空间分辨率也

收稿日期: 2022-07-16, 修回日期: 2022-09-23

基金项目: 山西省基础研究计划(202103021223078, 202203021221050)

作者简介: 朱博文(1992-), 男, 博士、讲师, 研究方向为工程水文学, E-mail: zhubowen@tyut.edu.cn

从之前的  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  提高到了  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

采用整合后 2003~2020 年的 GRACE-FO 卫星数据,其时间分辨率为 1 个月,空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。为保证数据的连贯性,对研究期内缺失数据的月份采用线性插值法进行补充。

## 2.2 土壤水数据

采用水文模型为 VIC 模型,将所模拟的三层土壤水总和作为各单元格的土壤水含率,其时间尺度为 2003~2014 年,时间分辨率为月,空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

VIC 模型能较为真实地反映出表层土壤水的动态变化,且能体现出土壤水在土层间的实际运移过程,对土壤水的描述较为精准,已在水文研究中得到广泛应用<sup>[5,6]</sup>。

## 2.3 研究方法

基于水量平衡原理对黄河流域地下水储量进行反演,其表达式为:

$$C_{GWS} = C_{TWS} - C_{SM} - C_{SWS} \quad (1)$$

式中,  $C_{GWS}$  为地下水储量变化;  $C_{TWS}$  为陆地水储量变化;  $C_{SM}$  为地表水储量变化;  $C_{SWS}$  为土壤含水率变化。

陆地水储量的变化主要与土壤含水率、地下水储量变化有较大的关联,而干旱地区地表水变化对其影响较小,故在计算时可忽略  $C_{SM}$  项。通过 GRACE 卫星反演获得流域内陆地水储量变化数据,并利用 VIC 水文模型得到流域内的土壤含水率数据,进而由式(1)可推算出黄河流域地下水储量的变化情况。

# 3 结果与分析

## 3.1 黄河流域陆地水储量时空分布特征及变化趋势

因大部分面积处于季风气候区内,黄河流域的降水量表现出明显的季节差异,春冬干旱少雨,降水主要集中于夏季和秋季,其中,6~9 月的降水约占全年的 70% 且多为暴雨<sup>[7]</sup>,雨季充分的降水补给使旱季较为匮乏的陆地水得到补充。2003~2020 年,黄河流域陆地水储量的各年同月均值均为负值(图 1),其逐月变化表现出明显的季节性规律,春、夏两季的陆地水储量亏损程度较为严重,冬季次之,秋季亏损程度最轻;其峰值出现在秋季(10 月,  $-0.50$  cm),谷值出现在夏季(6 月,  $-4.34$  cm)。综上表明,降水补给是黄河流域陆地水储量的重要补给来源,黄河流域降水量较少且年内分配不均匀,是导致流域干旱缺水的

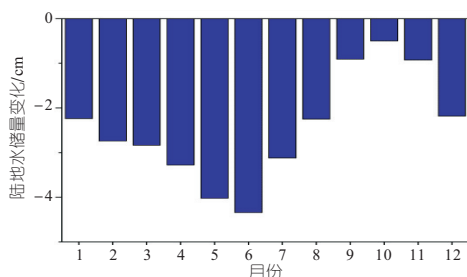


图 1 黄河中、上游流域 2003~2020 年陆地水储量各年同月均值

Fig. 1 Monthly average of TWS in the upper and middle regions of the Yellow River Basin from 2003 to 2020

一个重要原因。

图 2 为黄河中、上游流域 2003~2020 年陆地水储量多年平均值空间分布。由图 2 可知,黄河流域绝大部分区域的陆地水储量为负值,其空间分布连续性较好,但均衡性较差,具有明显的地域差异,整体上由河源处向下游逐渐递减,其峰值为  $1.47$  cm, 出现于上游河源处附近;谷值为  $-19.86$  cm, 位于中下游交界地带。该值为正的区域属于高原山地气候,年降水量较多且雨季时间较长,蒸发量较低,有高山冰川融雪作为陆地水补给来源,加之该区域地形高峻、人口分布较为稀疏,生活生产用水较少,故其陆地水储量较为丰沛。其余区域由于深入内陆,且受山脉屏障的作用,年降水量较少,多为温带季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,降水季节分布不均,加之由西向东人口和城市分布逐渐密集,故该值在本区域呈亏损状态,亏损程度整体自西向东递增。除此之外,甘肃、宁夏二省和内蒙古中西部属于干旱半干旱地区,气候干燥、日照充足,蒸发量在我国居于首位,陆地水储量在此处的减少情况也较为明显。黄河在中下游交界处逐渐进入华北平原,地势趋于平坦,人口和城市分布密集,生活生产耗水量大,加之降水量不够丰沛、蒸发强烈、水土流失严重及地下水过度开采等因素,故其陆地水储量匮乏情况较为严重。

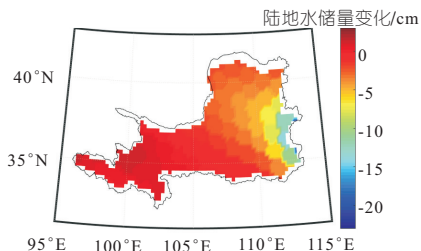


图 2 黄河中、上游流域 2003~2020 年陆地水储量多年平均值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the annual average of TWS in the upper and middle regions of the Yellow River Basin from 2003 to 2020

为进一步探讨黄河流域陆地水储量在不同季

节的空间分布特征,将其各年同季陆地水储量进行区域可视化(图 3)。由图 3 可知,受季风影响,该区域的降水呈现出明显的季节性差异,春冬两季干旱少雨、降水主要集中在夏季和秋季,而黄河流域的水资源主要由降水形成,故春季整个流域陆地水储量均为负值。夏季黄河处于汛期,降水量明显增加,占全年的 40%~66%,陆地水储量得到了一定补充,进而有所上升,但由于气温较高、蒸发量大,且处于用水高峰期,夏季陆地水储量的涨幅还未达到全年最高水平。由于该地区秋季仍处于雨季,雨水较为丰沛,且相对于夏季蒸发量下降,故陆地水储量达到一年中最大增幅。此时流域内陆地水储量盈余和亏损的面积比较接近。进入冬季后,黄河流域陆地水储量逐渐减少,恢复到亏损超过盈余区域面积的状态。除春季出现负值外,上游兰州以上的高原地区陆地水储量基本保持盈余的状态。受祁连山地形及青海湖的影响,该区域大通河沿岸成为年降水量大于 450 mm 的多雨区。此外,该地区降水量的年内、年际分配比较均匀,是整个黄河流域降水量年际变化最小的区域。再加之全流域最小的蒸发水平、众多的湖泊和河谷及终年的冰川融雪等影响,该区便成为流域内陆地水储量最为丰沛且变化情况最为稳定的区域。

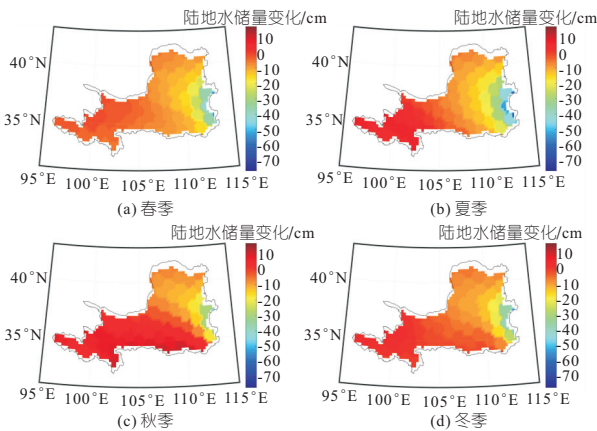


图 3 黄河中、上游流域 2003~2020 年各年同季节陆地水储量均值空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of seasonal average of TWS in the upper and middle regions of the Yellow River Basin from 2003 to 2020

黄河中、上游流域 2003~2020 年陆地水储量时间序列见图 4。由图 4 可知,在 0.05 的显著性水平下,该序列呈现出显著的下陷趋势<sup>[8, 9]</sup>,其线性拟合曲线的斜率为 -0.41。2008 年以后的大部分时间段内,流域内陆地水储量均为负值;2016 年后水储量有了一定程度的回升,这一现象的产生可能是南水北调工程的实施所致。

在 2003~2020 年,黄河流域春、夏、秋、冬四

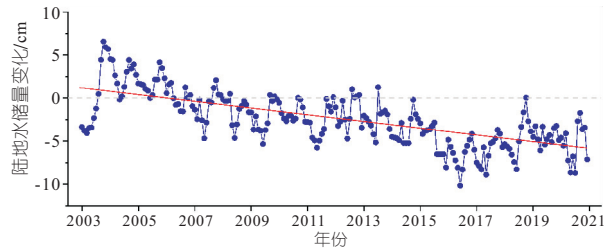


图 4 黄河中、上游流域 2003~2020 年陆地水储量时间序列  
Fig. 4 Time series of TWS in the upper and middle regions of the Yellow River Basin from 2003 to 2020

季的陆地水储量变化总体上均呈现下降趋势,且在 2016 年后有所上升。经线性拟合可得,黄河流域各个季节的陆地水储量减少速率分别为 -1.23、-1.20、-1.49、-1.65 cm/a,其中冬季的降幅最大,为 -1.65 cm/a。

2003~2020 年间,黄河流域各个季节的陆地水储量虽整体呈下降趋势(图 5),但下降的速率具有明显差异,整体呈从上游向下递增的趋势,其中,东部黄河中下游分界线附近的下降速率最快,黄河自该处由地势较高、地处半干旱区的黄土高原和内蒙古高原逐渐过渡至下游地势低平、地处半湿润区的华北平原。随着气候环境变得更为适宜居住,故从中游向下游地区的人口分布更加密集、工农业更加发达,陆地水储量减少的趋势亦愈加明显。

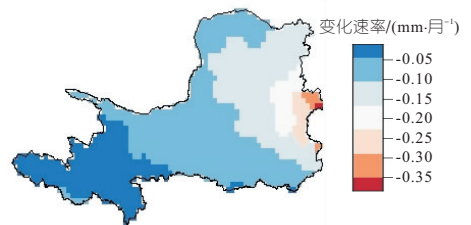


图 5 黄河中、上游流域 2003~2020 年陆地水储量变化速率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of TWS changing rates in the upper and middle regions of the Yellow River Basin from 2003 to 2020

### 3.2 黄河流域地下水储量反演

2003~2014 年间,黄河流域各年同月地下水储量均值盈亏状态有所不同(图 6)。由图 6 可知,夏、秋两季盈余,春季略有亏损,冬季亏损程度最为严重。冬季流域内地下水动态较为稳定,故地下水位变化较小,在 12 月达到最低值(-8.93 cm);进入春灌时期后,引水灌溉的补给使得黄河流域的地下水储量有了一定上升,在 4~5 月由负值变为正值,6 月份进入雨季,降水量处于一年中较高的水平,地下水储量也随之有了大幅度提高,并持续保持充沛的状态;到了秋灌时期,该值在 9 月达到了最大(10.79 cm);10 月黄河流域进入旱季,缺乏补给来源的地下水开始随消耗逐渐减少。

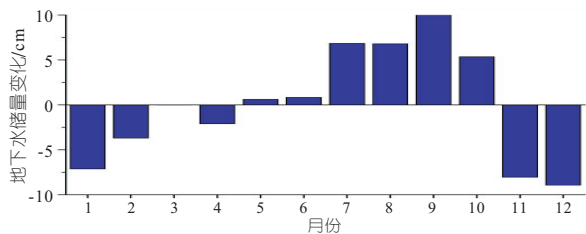


图 6 黄河中、上游流域 2003~2014 年地下水储量各年同月均值

Fig. 6 Monthly average of GWS in the upper and middle regions of the Yellow River Basin from 2003 to 2014

综上表明,黄河流域内地下水储量的变化与降水及人类活动的联系十分密切。

黄河流域地下水储量与陆地水储量的变化情况见图 7,分析二者在时间上的相关性。由图 7 可知,2003~2014 年,二者均体现出显著的季节周期性,但地下水储量的变化较陆地水储量存在一定的滞后效应,这是由于地下水通过大气降水、地表水渗漏等方式得到补给的过程需耗费一定的时间。在年内尺度上,地下水储量的极值之间相差较大,但从年际尺度上看则处于相对稳定的态势,这与地下水的自然波动、降水的周期性及人类生产生活的周期性有关。经线性拟合,可得在 0.05 的显著性水平下,黄河流域地下水储量的时间序列并未显示出显著的下降趋势,其拟合曲线的斜率为-0.10。

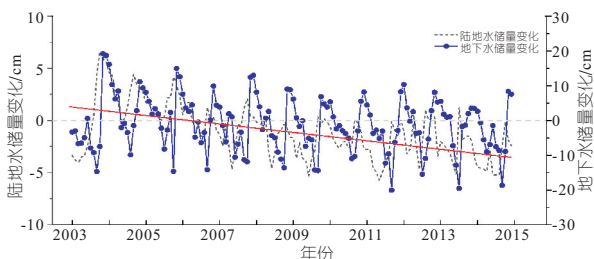


图 7 黄河中、上游流域 2003~2014 年陆地及地下水储量时间序列

Fig. 7 Time series of TWS and GWS in the upper and middle regions of the Yellow River Basin from 2003 to 2014

2003~2014 年间,黄河流域内各季节的地下水储量总体上均呈现下降趋势。经线性拟合,可

知春、夏、秋、冬四季的水储量减少速率分别为-1.22、-1.20、-1.49、-1.65 cm/a,其中冬季的降幅最大,该数值与陆地水储量的下降速率具有一致性。

## 4 结论

a. 通过处理与分析 GRACE-FO 重力卫星数据,明确了黄河流域陆地水储量以及地下水储量过去十余年的时空分布和变化趋势,反演结果与实际情况相吻合,印证了利用 GRACE-FO 卫星数据监测大流域陆地水储量变化的可行性。

b. 随着 GRACE 卫星技术及相关方法的日趋完善,这一手段将在水资源动态监测方面发挥更大的效用,助力实现区域水资源的合理规划与配置。

### 参考文献:

- [1] 水利部黄河水利委员会. 黄河水资源公报[R]. 郑州:水利部黄河水利委员会,2003-2020.
- [2] JIANG D, WANG J, HUANG Y, et al. The review of GRACE data applications in terrestrial hydrology monitoring[J]. Advances in meteorology, 2014.
- [3] BILLAH M M, GOODALL J L, NARAYAN U, et al. A methodology for evaluating evapotranspiration estimates at the watershed-scale using GRACE [J]. Journal of hydrology, 2015, 523:574-586.
- [4] ZHONG Y, ZHONG M, FENG W, et al. Groundwater depletion in the West Liaohe River Basin, China and its implications revealed by GRACE and in Situ measurements[J]. Remote sensing, 2018, 10(4):493.
- [5] 杜婷婷, 郭梦京, 张晋梅, 等. VIC 模型在西江流域的水文模拟及其应用[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5):121-127.
- [6] 张续军. VIC 模型在中国湿润地区的应用研究[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [7] 马广慧. 黄河流域水资源开发利用对水文循环及生态环境的影响研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [8] 李晓英, 吴淑君, 蔡晨凯, 等. 黄河流域陆地水储量时空变化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(11):1833-1838.
- [9] 贾永锋, 赵萌, 尚长健, 等. 黄河流域地下水环境现状、问题与建议[J]. 环境保护, 2021, 49(13):20-23.

## Inversion of Terrestrial Water Storage in the Yellow River Basin Based on GRACE Satellite Data

ZHU Bo-wen, YIN Jing-chen, CHANG Jian-bo, SHI Hao-yu

(College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** To investigate the spatial and temporal variation of terrestrial water storage in the Yellow River Basin, the inversion of terrestrial water storage in the Yellow River Basin was performed based on the Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On (GRACE-FO) gravity satellite data from 2003 to 2020. Besides, the Variable Infiltration Capacity (VIC) hydrological model was used to simulate the soil water changes. The groundwater storage changes between 2003 and 2014 were calculated through the water balance equation. The results show that the overall terrestrial water storage in the Yellow River Basin is in deficit during the study period, with a significant decreasing trend temporally. Spatially, the water storage is reducing from the river source to the downstream. The inversion results show that the spatial and temporal variation of terrestrial water storage in the Yellow River basin is highly correlated with the topography, climate and human activities. The results can provide a scientific basis for water resources planning and allocation in the Yellow River Basin.

**Key words:** Yellow River Basin; GRACE-FO; terrestrial water storage; groundwater storage; spatial-temporal variation