

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.005

基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域 陆地水储量及影响因素分析

任立良^{1,2}, 王宇^{1,2}, 江善虎^{1,2}, 卫林勇², 王孟浩², 张怡雅²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:基于 GRACE 和 GRACE-FO 卫星陆地水储量遥感数据,采用长短期记忆(LSTM)神经网络模型,结合水量平衡方程和全球陆地数据同化系统(GLDAS)重建 GRACE 与 GRACE-FO 间的陆地水储量变化量,分析黄河流域 2002 年 4 月至 2020 年 3 月陆地水储量变化特征,探究影响陆地水储量变化的环境因子。结果表明:LSTM 模型可以有效填补 GRACE 与 GRACE-FO 间的陆地水储量变化量;黄河流域陆地水储量呈明显下降趋势,上、中、下游下降趋势依次增大,陆地水储量与地下水储量的变化特征高度相关;黄河流域上、中、下游年陆地水储量变化量与年降水量和年干燥度指数呈极显著相关关系,表明黄河流域陆地水储量变化受到降水和蒸散发的影响。

关键词:陆地水储量;GRACE;长短期记忆神经网络模型;GLDAS;水量平衡方程;黄河流域

中图分类号: TV21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)04-0026-07

GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Basin//REN Liliang^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, JIANG Shanhu^{1,2}, WEI Linyong², WANG Menghao², ZHANG Yiya² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on GRACE and GRACE-FO satellite remote sensing data, the terrestrial water storage change between GRACE and GRACE-FO was reconstructed using the long short-term memory (LSTM) neural network model, combined with the water balance equation and global land data assimilation system (GLDAS). Then, the change characteristics of terrestrial water storage of the Yellow River Basin from April, 2002 to March, 2020 were analyzed, and its environmental factors were explored. The results show that the LSTM model can obtain the missing data of terrestrial water storage change between GRACE and GRACE-FO effectively, and the terrestrial water storage of the Yellow River Basin shows an obvious decreasing trend, with the decreasing trend getting more significant along the upper, middle, and lower reaches. The change characteristics of terrestrial water storage and groundwater storage are highly correlated, and there are also significant correlations between the annual terrestrial water storage change, annual precipitation, and annual dryness index in the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River Basin, indicating that the terrestrial water storage change in the Yellow River Basin is affected by precipitation and evapotranspiration.

Key words: terrestrial water storage; gravity recovery and climate experiment (GRACE); long short-term memory (LSTM) neural network model; global land data assimilation system (GLDAS); water balance equation; the Yellow River Basin

黄河流域是我国重要的生态屏障区和经济发展区^[1]。黄河流域上游水资源利用效率和经济水平较低;中游水土流失严重,生态系统脆弱,水资源污

染严重;下游用水需求大,水资源浪费严重^[2-4]。受气候变化和人类活动双重影响,流域水循环过程发生了显著变化,水资源保障形势愈发严峻,研究变化

基金项目:国家自然科学基金(51979069, U2243203);中央高校基本科研业务费专项(B200204029)

作者简介:任立良(1963—),男,教授,博士,主要从事水循环基础理论和气候变化与陆面变化的水文响应研究。E-mail: RLL@hhu.edu.cn

通信作者:江善虎(1983—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: hik0216@163.com

环境下黄河流域水资源演变特征对黄河流域生态保护和高质量发展具有重大意义^[5-6]。陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)变化综合反映区域地表水、地下水以及河流湖泊水的变化,是衡量地区水资源变化的重要指标。由美国国家航空航天局和德国航空航天中心联合开发的 GRACE (gravity recovery and climate experiment) 卫星计划是监测大尺度 TWS 变化的有效方法。自 2002 年 3 月 GRACE 卫星发射以来,GRACE 卫星数据被广泛应用于研究陆地冰川消融、海平面与环流变化、干旱监测和 TWS 监测等^[7-10]。张璐等^[11]基于 GRACE 卫星遥感数据,发现黄河流域 2003—2015 年多年平均 TWS 西多东少,呈下降趋势,其上游主要受降水和蒸散发的影响,中、下游受人类活动影响较大;李晓英等^[12]发现黄河流域 2003—2016 年 TWS 变化呈下降趋势,同一时段径流对 TWS 变化的影响最直接,考虑时滞性,降水主要受森林、农田扩大,植被的叶面积指数和蒸散发增大的影响;Li 等^[13]发现 2003—2016 年黄河流域中、下游南部 TWS 下降幅度最大。GRACE 卫星遥感数据截止到 2017 年 6 月,后续由 GRACE Follow-On (GRACE-FO) 卫星接替,GRACE-FO 卫星遥感数据从 2018 年 5 月更新,两个卫星遥感数据之间存在约 1 a 的数据缺失,不利于研究 TWS 长时间序列变化特征。针对这一问题,不同学者采用不同方法填补这一数据缺失,Sun 等^[14-15]采用深度神经网络、BP 神经网络和径向基函数神经网络来填补 GRACE 与 GRACE-FO 间的数据缺失。

本文采用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)神经网络模型,重建 GRACE 和 GRACE-FO 间的 TWS 变化量,研究黄河流域 2002 年 4 月至 2020 年 3 月长时间序列 TWS,分析气候因子与 TWS 变化的相关性,为黄河流域水资源管理和利用提供科学依据,并为其他流域的 TWS 研究提供参考。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域位于 95°E ~ 119°E、32°N ~ 41°N 之间,流域面积约 79.5 万 km²,地势自西向东逐级下降(图 1(a)),流域横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原以及华北平原,流经青海、四川等 9 个省级行政区(下称省区)。黄河流域 2003—2016 年平均 TWS 西部高、东部低,空间差异显著(图 1(b)),图中 TWSA(terrestrial water storage anomaly)为 TWS 的距平值,即为遥感 TWS 数据减去 2004—2009 年的月平均值)。2003—2019 年流域降水量分布不均,从

东南向西北递减,降水集中在夏秋季节(图 1(c));流域蒸发能力很强,东南部蒸散发量大于西北部(图 1(d)),最大蒸散发出现在 7—8 月,此时对 TWS 影响最大^[16]。

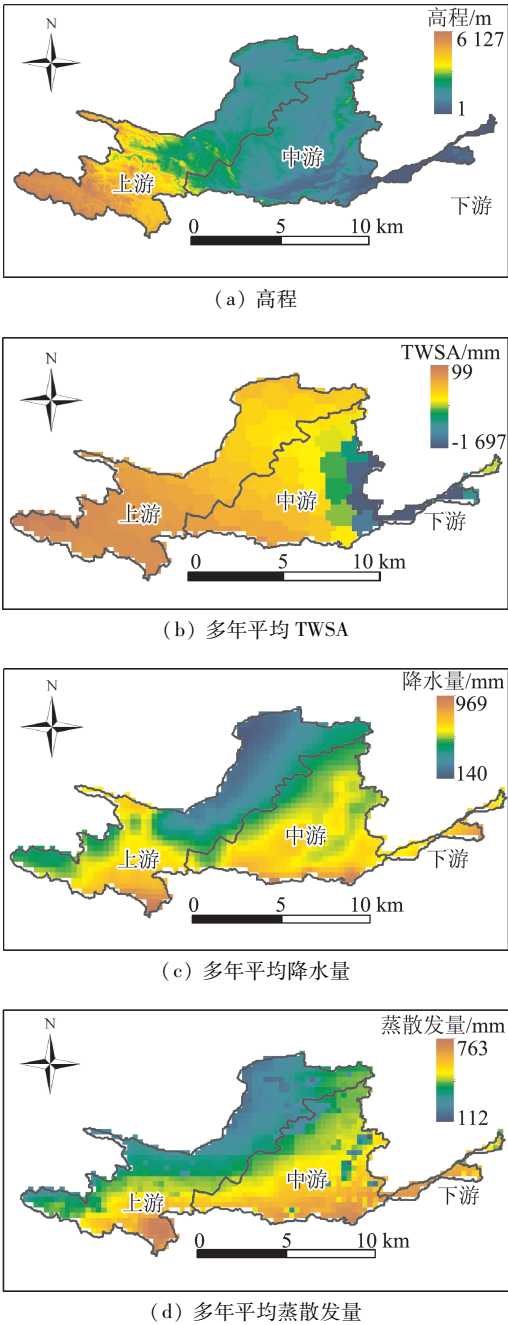


图1 黄河流域高程、TWSA、降水量、蒸散发量空间分布
Fig.1 Spatial distributions of elevation, TWSA, precipitation, and evapotranspiration in the Yellow River Basin

1.2 数据来源

1.2.1 GRACE 数据

GRACE 数据主要由美国德克萨斯大学空间研究中心、美国太空总署喷气动力实验室和德国波茨坦地球科学中心 3 家科研机构对其进行解算和发布^[17]。本文选取了 2002 年 4 月至 2020 年 3 月

GRACE/GRACE-FO CSR RL06 Mascon V2 产品 TWSA,时间分辨率为 1 月,空间分辨率为 0.25°。GRACE 缺失数据是由于①GRACE 卫星传感器等问题导致某些月份数据缺失;②GRACE 和 GRACE-FO 间存在数据缺失,时间跨度为 2017 年 7 月至 2018 年 5 月。本文采用六点样条插值法填补 GRACE 卫星缺失月份数据,并利用 LSTM 填补 GRACE 和 GRACE-FO 间连续 11 月 TWS 变化量数据缺失,用于分析 2002 年 4 月至 2020 年 3 月黄河流域 TWS 的变化特征。

1.2.2 GLDAS 数据

全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)由美国航空航天局戈达德空间飞行中心和美国海洋与大气局国家环境预报中心共同开发完成。GLDAS 包括 Noah、VIC(variable infiltration capacity)、CLM(community land model)、Mosaic 等 4 个模型,通过汲取遥感卫星观测数据和地面观测数据,输出全球地表状态通量及变量数据^[18]。本文采用最高空间分辨率为 0.25°的 Noah 陆地表面模型,时间尺度为 2002 年 4 月至 2020 年 3 月,与 GRACE/GRACE-FO CSR RL06 Mascon 产品数据相匹配,并选取了 Noah 陆地表面模型中的雪水当量、土壤水分(土壤深度分别为 0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm、100~200 cm)和冠层水数据,累加得到 GLDAS 的 TWSA。

1.2.3 降水量和气温数据

本文采用中国气象局发布的 2002 年 4 月至 2020 年 3 月黄河流域降水量和气温数据,分别来自中国地面降水月值(China gauge-based monthly precipitation analysis product, CPAP)0.5°×0.5°格点数据集 V2.0 和中国地面气温月值 0.5°×0.5°格点数据集 V2.0,时间分辨率为 1 月,降尺度为 0.25°。

1.2.4 蒸散发和径流数据

本文蒸散发和径流数据来源于 Noah 模型 2002 年 4 月至 2020 年 3 月的模拟结果,空间分辨率为 0.25°,蒸散发数据时间分辨率为 1 s,径流数据时间分辨率为 3 h,经累加计算将时间分辨率转换为 1 月。

2 研究方法

2.1 LSTM 神经网络模型

LSTM 模型通过改进隐藏层内部结构获得长期记忆样本数据中的历史重要信息,解决了传统循环神经网络随训练时间加长或网络层数增多引起的梯度爆炸或消失问题。LSTM 单元中引入了输入门

(控制当前时刻神经单元的输入)、遗忘门(以一定的概率控制上一时刻以及单元历史信息的存储)和输出门(控制当前时刻记忆单元的信息输出),能较为准确地预测时间序列。Wei 等^[19]采用 LSTM 模型,结合 GLDAS 地表水、累积降水、气温数据重建了柴达木盆地 GRACE 和 GRACE-FO 间的缺失数据,研究了柴达木盆地 TWS 的时空变化特征及其原因。目前大多学者利用人工神经网络重建的输入层均采用降水、气温、蒸散发和 GLDAS 地表水等数据,直接模拟 GRACE 和 GRACE-FO 间的缺失数据。本文将 GRACE 和 GRACE-FO 卫星数据反演与 GLDAS 和水量平衡方程计算的 TWS 变化量作为输入变量,采用 LSTM 模型重建黄河流域 GRACE 和 GRACE-FO 间的 TWS 变化量,反推 GRACE 和 GRACE-FO 间的缺失数据。

2.2 TWS 变化量计算方法

基于 GRACE 和 GRACE-FO 卫星数据反演和 LSTM 模型重建的逐月 TWSA 序列,计算逐月 TWS 变化量时间序列^[20]:

$$C_{S_t} = \frac{S_{T,t+1} - S_{T,t-1}}{2} \quad (1)$$

式中: C_{S_t} 为流域 t 月的 TWS 变化量; $S_{T,t+1}$ 、 $S_{T,t-1}$ 分别为 $t+1$ 月和 $t-1$ 月的 TWSA。

基于 GLDAS 蒸散发及径流数据,结合 CPAP 月降水数据,利用水量平衡方程计算黄河流域 TWS 变化量:

$$C_{S_t} = P_t - E_t - R_t \quad (2)$$

式中 P_t 、 E_t 、 R_t 分别为 t 月流域平均降水量、蒸散发量和径流深。理论上,式(1)(2)得出的 TWS 变化量是相等的,因此,采用由水量平衡方法得到的 TWS 变化量来评估 LSTM 模型计算得到的 TWS 变化量是可行的。

2.3 地下水储量计算方法

流域 TWS 包括地表水储量、土壤水储量和地下水储量。为进一步分析流域 TWS 变化量的子成分,需对黄河流域地下水储量进行计算,计算公式^[21]为

$$S_G = S_T - S_{SM} - S_{SW} - S_{Cl} \quad (3)$$

式中: S_G 为流域地下水储量; S_T 为流域 TWS; S_{SM} 为流域土壤水储量; S_{SW} 为流域雪水当量; S_{Cl} 为流域冠层水储量。

2.4 Spearman 秩相关系数法

Spearman 秩相关系数法常用于分析两个变量之间关系的密切程度,计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为试验值 x_i 和 y_i 的均值; r 为 Spearman 秩相关系数, $|r| \leq 1$, $|r|$ 越逼近于 1, 表示 x 与 y 线性相关程度越高。

3 结果与讨论

3.1 GRACE 和 GRACE-FO 间 TWS 变化量重建效果验证

利用 GRACE (2002 年 5 月至 2017 年 5 月) 和 GRACE-FO (2018 年 7 月至 2020 年 2 月) 卫星数据反演的连续 201 月 TWS 变化量时间序列测试 LSTM 模型对 TWS 变化量的模拟效果, 随机抽取 190 月数据作为训练样本, 剩余 11 月数据作为验证样本, 结果如图 2 所示。训练期的 Spearman 秩相关系数为 0.93, 纳什效率系数为 0.87, 标准化均方根误差为 0.06 (图 2(a)); 验证期的 Spearman 秩相关系数为 0.95, 纳什效率系数为 0.83, 标准化均方根误差为 0.12 (图 2(b)), 表明 LSTM 模型对 TWS 变化量模拟性能良好, 可用于重建 GRACE 和 GRACE-FO 间 TWS 变化量。

GRACE 和 GRACE-FO 卫星数据反演和 LSTM 模型重建的黄河流域 2002 年 5 月至 2020 年 2 月区域平均 TWS 变化量在月尺度上的变化过程如图 3(a) 所示, 与 GLDAS 和水量平衡方程计算结果相比可以发现三者的变化趋势非常相似, 峰值所处的时间段相近。如图 3(b) 所示, 卫星反演和模型重建的 TWS 变化量与水量平衡方程计算结果的 Spearman 秩相关系数在 GRACE 时期为 0.64、数据缺失时段为 0.75、GRACE-FO 时期为 0.73、研究期为 0.65; 如图 3(c) 所示, 卫星反演和模型重建的 TWS 变化量与 GLDAS 计算结果的 Spearman 秩相关系数在 GRACE 时期为 0.73、数据缺失时段为 0.86、GRACE-FO 时期为 0.73、研究期为 0.72。Spearman 秩相关系数均通过了 $p < 0.01$ 的显著性检验, 比较结果验证了 LSTM 模型重建 GRACE 和 GRACE-FO 间 TWS 变化量的可靠性。

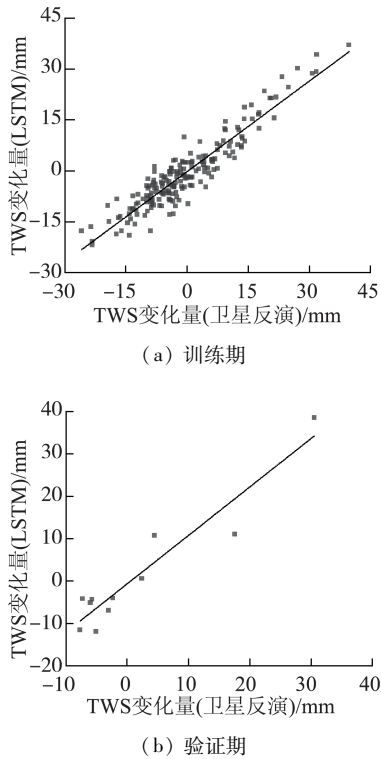


图 2 LSTM 模型性能测试

Fig. 2 Performance test of LSTM neural network model

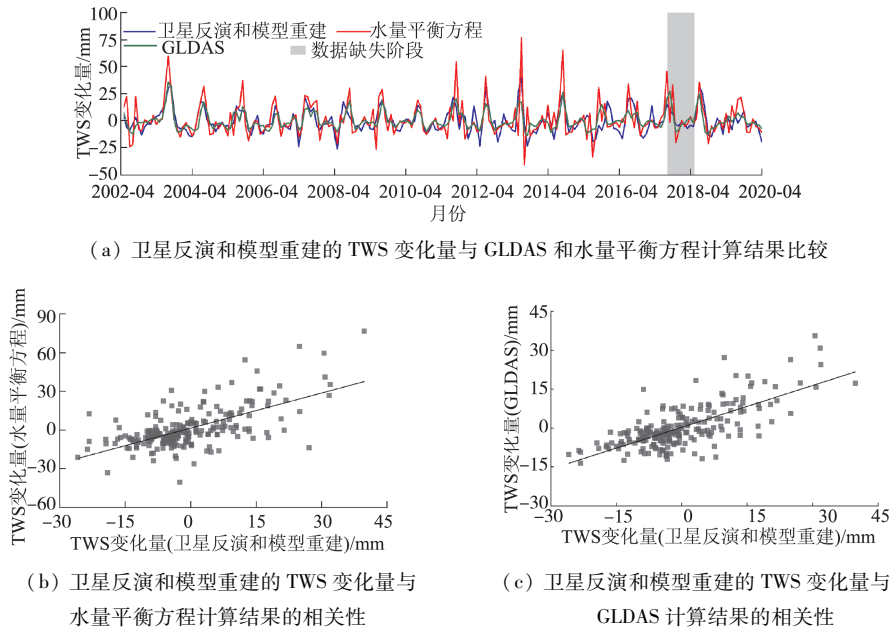


图 3 TWS 变化量在月尺度上的变化趋势和相关性分析

Fig. 3 Trends and correlation analysis of change of TWS on monthly scale

水量平衡方程计算 TWS 变化量时只考虑了气候因素的影响,而 GRACE 卫星遥感数据受人类活动的影响,两者之间有一定的差异,且 GRACE 卫星遥感数据对于 TWS 亏损更加敏感。而 GRACE 卫星遥感数据和 GLDAS 得到的 TWS 变化量包含的水文变量不一致,GRACE 卫星遥感数据包含了地下水和湖泊水等,两者之间也存在一定差异性。

3.2 TWS 趋势分析

利用 TWSA 对 TWS 进行趋势分析,图 4 为黄河流域 2002 年 4 月至 2020 年 3 月的 TWSA 在月尺度上变化趋势。从图 4 可以看出,全流域 TWSA 呈下降趋势,下降速率为 -0.40 mm/月 ;上游 TWSA 呈平缓下降趋势,下降速率为 -0.16 mm/月 ;中游 TWSA 呈缓慢下降趋势,下降速率为 -0.67 mm/月 ;下游 TWSA 呈急剧下降趋势,下降速率为 -1.83 mm/月 ,表明黄河流域 TWS 空间差异显著。由于黄河流域降水、气温、蒸散发等气候因子具有季节性变化特征,TWS 也表现出明显的季节性变化特征,旱季 TWS 一般处于亏损状态,湿季 TWS 一般处于盈余状态。

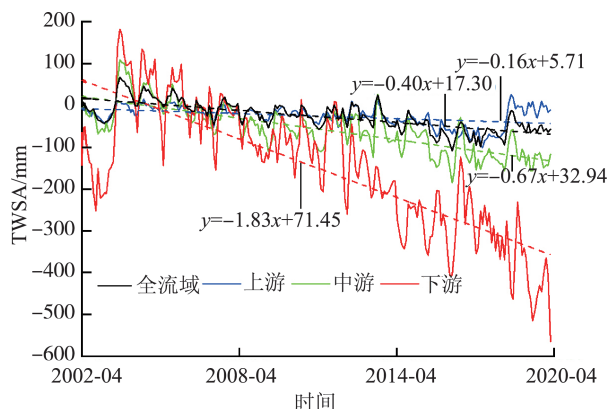


图 4 TWSA 在月尺度上的变化趋势

Fig. 4 Trends of TWSA on monthly scale

如图 5 所示,黄河流域 2003—2019 年多年月均 TWSA、降水量、蒸散发量和气温均呈现明显的季节性变化,黄河流域降雨集中在夏秋季节,多年最小月均 TWSA 和最大月均 TWSA 分别出现在 6 月和 10 月。6 月之前雨季还未来临,气温高,蒸散发量大,TWSA 最低;7—8 月降雨集中,TWSA 逐渐增大,蒸散发量达到了最大值;TWSA 峰值出现在 10 月,滞后降水量的峰值约 2 月。

3.3 TWS 各成分分析

图 6 为黄河流域 TWS 各成分时间变化趋势图。从图 6 可以看出,土壤水储量以 0.12 mm/月 的速率平缓增长;雪水当量和冠层水储量以 0.0018 mm/月 的速率呈不明显增长的趋势;而地下水储量以 -0.52 mm/月 的速率急剧下降,与 TWSA 变化速率 -0.40 mm/月 相近。

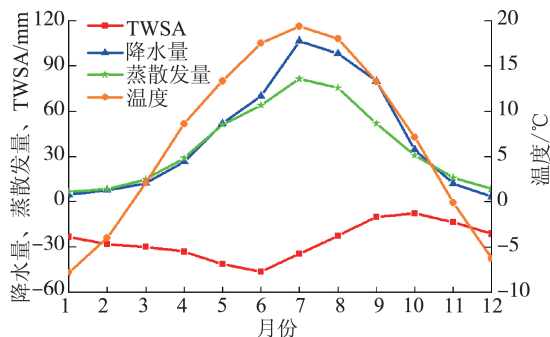


图 5 2003—2019 年各变量多年月均值

Fig. 5 Multi-year monthly means of variables from 2003 to 2019

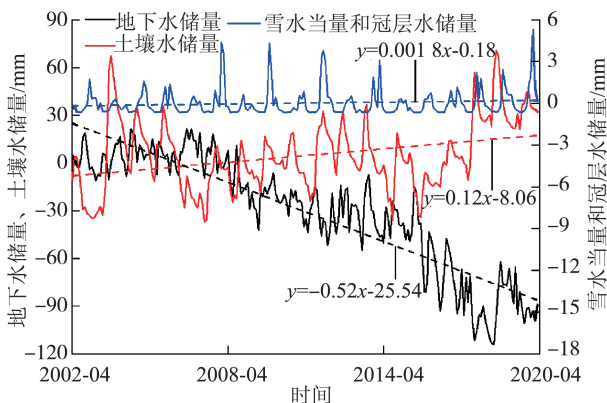


图 6 TWS 成分在月尺度上的变化趋势

Fig. 6 Trends of TWS compositions on monthly scale

对黄河流域年 TWSA 和年地下水储量的相关性分析发现 TWSA 以 -5.34 mm/a 的速率下降,地下水储量以 -6.48 mm/a 的速率快速下降,两者变化趋势相似。涂梦昭等^[22]研究发现,黄土高原 2005—2014 年地下水储量整体上以 $(-6.5 \pm 0.7) \text{ mm/a}$ 的速率急剧下降,与本文结果相近。年 TWSA 和年地下水储量的 Spearman 秩相关系数为 0.90 ($p < 0.01$),两者呈极显著相关性,表明黄河流域 TWS 的急剧下降与地下水储量急剧下降有关。

3.4 TWS 影响因素分析

TWS 受气候因素和人类活动影响,本文基于 2002 年 4 月至 2020 年 3 月数据,重点分析气候因素对 TWS 的影响。图 7 为黄河流域 TWS 变化量与降水量和干燥度指数在年尺度上的变化关系。从图 7 可以看出,年降水量上游和中游呈上升趋势,下游呈下降趋势;年干燥度指数上游呈下降趋势,中游和下游呈上升趋势。黄河流域上、中、下游年 TWS 变化量与年降水量和年干燥度指数分别呈极显著的正相关关系和负相关关系,上、中、下游年 TWS 变化量与年降水量的 Spearman 秩相关系数分别为 0.79、0.89 和 0.71;上、中、下游年 TWS 变化量与年干燥度指数的 Spearman 秩相关系数分别为 -0.74 、 -0.93 和 -0.77 ,表明降水和蒸散发是

黄河流域 TWS 变化量的重要影响因素。除气候因素以外,人类活动(水库调度、工农业用水等)对黄河流域 TWS 有较大影响^[16]。

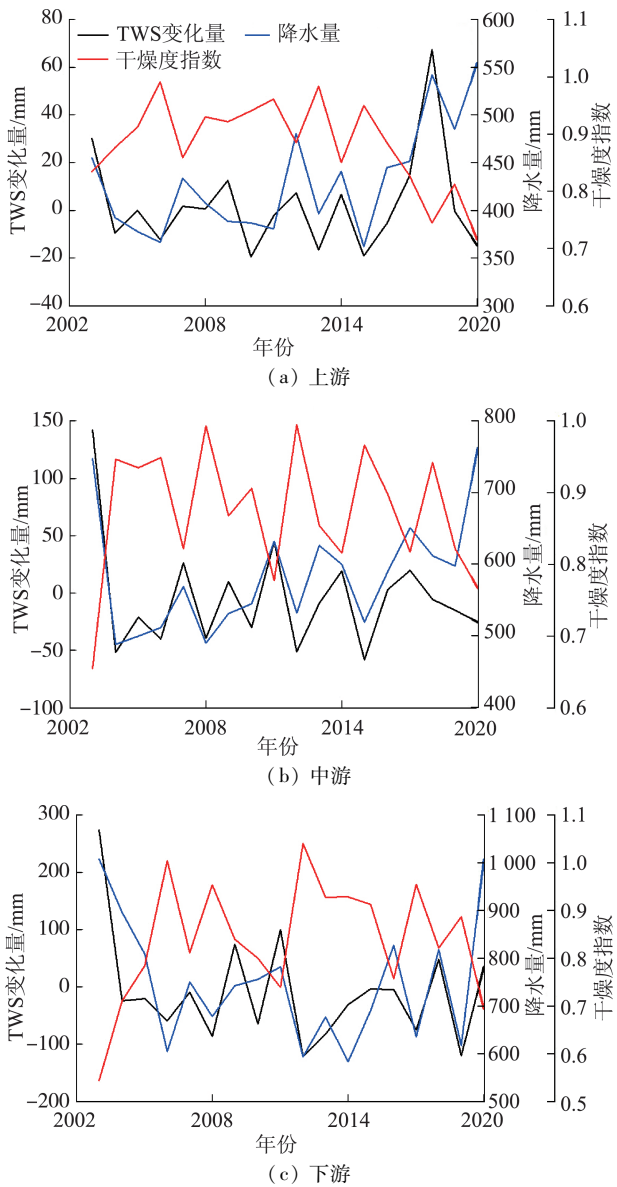


图7 TWS变化量、降水量和干燥度指数在
年尺度上的变化关系

Fig.7 Trends of change of TWS, precipitation,
and dryness index on yearly scale

4 结 论

a. 基于 LSTM 模型重建 GRACE 和 GRACE-FO 间 TWS 变化量是可靠的,其与 GLDAS 和水量平衡方程计算的 TWS 变化量的相关系数分别为 0.65 和 0.72。

b. 研究期间,黄河流域 TWSA 分别以 -0.40 mm/月 和 -5.34 mm/a 的速率下降,上、中、下游 TWSA 分别以 -0.16 mm/月 、 -0.67 mm/月 和 -1.83 mm/月 的速率下降,表明黄河流域 TWS 变化空间差异显著。TWSA 最小值出现在 6 月,最大值出

现在 10 月。黄河流域地下水储量以 -6.48 mm/a 的速率快速下降,TWSA 的急剧下降很可能是地下水急剧下降导致的,两者的 Spearman 秩相关系数为 0.90。

c. 黄河流域上、中、下游年 TWS 变化量与年降水量和年干燥度指数分别呈极显著的正相关关系和负相关关系。上、中、下游年 TWS 变化量与年降水量的 Spearman 秩相关系数分别为 0.79、0.89 和 0.71;上、中、下游年 TWS 变化量与年干燥度指数的 Spearman 秩相关系数分别为 -0.74 、 -0.93 和 -0.77 ,表明降水和蒸散发是黄河流域 TWS 变化量的重要影响因素。

参考文献:

[1] 王浩,胡鹏.水循环视角下的黄河流域生态保护关键问题[J].水利学报,2020,51(9):1009-1014. (WANG Hao,HU Peng. Key issues of ecological conservation in the Yellow River Basin from a water cycle perspective[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(9):1009-1014. (in Chinese))

[2] 张永凯,孙雪梅.黄河流域水资源利用效率测度与评价[J].水资源保护,2021,37(4):37-43. (ZHANG Yongkai,SUN Xuemei. Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):37-43. (in Chinese))

[3] 左其亭,张志卓,吴滨滨.基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J].水资源保护,2020,36(2):1-7. (ZUO Qiting,ZHANG Zhizhuo,WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):1-7. (in Chinese))

[4] 王慧亮,申言霞,李卓成,等.基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J].水资源保护,2020,36(6):12-17. (WANG Huiliang,SHEN Yanxia,LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):12-17. (in Chinese))

[5] 王煜,彭少明,武见,等.黄河流域水资源均衡调控理论与模型研究[J].水利学报,2020,51(1):44-55. (WANG Yu,PENG Shaoming,WU Jian, et al. Research on the theory and model of water resources equilibrium regulation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(1):44-55. (in Chinese))

[6] 左其亭,张志卓,马军霞.黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系[J].中国人口·资源与环境,2021,31(10):29-38. (ZUO Qiting,ZHANG Zhizhuo,MA Junxia. Relationship between water resource utilization

- level and socio-economic development in the Yellow River Basin[J]. China Population Resources and Environment, 2021, 31(10): 29-38. (in Chinese))
- [7] 聂琳娟,超能芳,晁定波. GRACE 卫星的冰川消融与水储量变化探讨[J]. 测绘科学, 2016, 41(8): 82-86. (NIE Linjuan, CHAO Nengfang, CHAO Dingbo. Correlation analysis between the glacier melting and regional water storage change based on GRACE satellite[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(8): 82-86. (in Chinese))
- [8] 彭桢燃,胡正旺,王林松,等. 格陵兰岛冰盖消融时空特征(2003—2015 年)及其对海平面上升的贡献[J]. 地球科学, 2021, 46(2): 743-758. (PENG Zhenran, HU Zhengwang, WANG Linsong, et al. Spatio-temporal characteristics of ice sheet melting in Greenland and contributions to sea level rise from 2003 to 2015[J]. Earth Science, 2021, 46(2): 743-758. (in Chinese))
- [9] 李晓英,吴淑君,王颖,等. 淮河流域陆地水储量与干旱指标分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 80-85. (LI Xiaoying, WU Shujun, WANG Ying, et al. Analysis of terrestrial water storage and drought indices in the Huaihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 80-85. (in Chinese))
- [10] 魏浩翰,何秀凤,郑加柱. 联合重力卫星数据及气候水文模型监测西南地区陆地水储量变化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 488-492. (WEI Haohan, HE Xiufeng, ZHENG Jia Zhu. Terrestrial water storage variations in Southwest China revealed by gravity mission and hydrologic and climate model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(6): 488-492. (in Chinese))
- [11] 张璐,江善虎,任立良,等. 基于 GRACE 数据监测黄河流域陆地水储量变化[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 47-51. (ZHANG Lu, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. Explore and analysis variation of the terrestrial water storage in Yellow River Basin based on GRACE data[J]. Yellow River, 2020, 42(4): 47-51. (in Chinese))
- [12] 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. (LI Xiaoying, WU Shujun, CAI Chenkai, et al. The spatiotemporal variations of terrestrial water storage in the Yellow River Basin[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(11): 1833-1838. (in Chinese))
- [13] LI C, ZHANG Y, SHEN Y, et al. Decadal water storage decrease driven by vegetation changes in the Yellow River Basin[J]. Science Bulletin(Beijing), 2020, 65(22): 1859-1861.
- [14] SUN Z, LONG D, YANG W, et al. Reconstruction of GRACE data on changes in total water storage over the global land surface and 60 basins[J]. Water Resources Research, 2020, 56(4): 1-21.
- [15] 棚键豪,陈智伟,张兴福,等. 联合 GRACE 与 GRACE-FO 反演 2002—2020 年长江流域陆地水储量变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(9): 961-966. (XUAN Jianhao, CHEN Zhiwei, ZHANG Xingfu, et al. Combining GRACE and GRACE-FO to derive terrestrial water storage changes in the Yangtze River Basin from 2002 to 2020[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(9): 961-966. (in Chinese))
- [16] XIE J, XU Y, WANG Y, et al. Influences of climatic variability and human activities on terrestrial water storage variations across the Yellow River Basin in the recent decade[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2019, 579: 124218.
- [17] 徐鹏飞,蒋涛,章传银,等. GRACE/GRACE-FO 空窗期的陆地水储量变化数据间断补偿:以全球典型流域为例[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3048-3067. (XU Pengfei, JIANG Tao, ZHANG Chuanyin, et al. Data filling of terrestrial water storage anomaly during the gap period of GRACE/GRACE-FO: a case study of global typical basins[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3048-3067. (in Chinese))
- [18] 冯贵平,宋清涛,蒋兴伟. 卫星重力监测全球地下水储量变化及其特征[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(4): 822-828. (FENG Guiping, SONG Qingtao, JIANG Xinwei. Global groundwater storage changes and characteristics observed by satellite gravimetry[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(4): 822-828. (in Chinese))
- [19] WEI L, JIANG S, REN L, et al. Spatiotemporal changes of terrestrial water storage and possible causes in the closed Qaidam Basin, China using GRACE and GRACE follow-on data[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2021, 598: 126274.
- [20] GADEDJISSO-TOSSOU A, ADJEGAN K I, KABLAN A K M. Rainfall and temperature trend analysis by Mann-Kendall test and significance for rainfed cereal yields in northern togo[J]. Science, 2021, 3(1): 17.
- [21] 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. (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. (in Chinese))
- [22] 涂梦昭,刘志锋,何春阳,等. 基于 GRACE 卫星数据的中国地下水储量监测进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(6): 643-656. (TU Mengzhao, LIU Zhifeng, HE Chunyang, et al. Research progress of groundwater storage changes monitoring in China based on GRACE satellite data[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(6): 643-656. (in Chinese))

(收稿日期:2021-12-30 编辑:施业)