

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.021

2002—2021年中国陆地水储量及其组分变化分析

褚江东^{1,2}, 栗晓玲^{1,2}, 吴海江^{1,2}, 刘雨翰^{1,2}, 冯凯³

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要:为深入探讨中国2002年4月至2021年3月陆地水储量(TWS)及其组分的变化情况,采用基于分解-集成思想的VMD-LSTM组合预测模型插补GRACE重力卫星和其后续卫星GRACE-FO间断期的数据,利用Theil-Sen斜率分析法和Mann-Kendall趋势检验法研究中国九大流域TWS及其组分的时空演变规律,并基于随机森林法初步分析TWS各组分对TWS的相对贡献率。结果表明:VMD-LSTM模型能够有效插补中国GRACE序列间断期数据,绝大多数区域的纳什效率系数大于0.6、相关系数大于0.9、均方根误差小于2 cm,插补精度显著提高;TWS变化和地下水储量变化趋势具有较好的空间一致性,除东南诸河片、珠江流域片和长江流域片外,其他流域TWS均呈下降趋势,这主要由地下水亏损导致;西部干旱半干旱地区和华北地区TWS主要受地下水储量的影响,相较于干旱半干旱地区,湿润半湿润地区的TWS受冠层水储量和土壤水储量的影响较大。

关键词:陆地水储量;VMD-LSTM;GRACE数据插补;组分变化;中国

中图分类号:TV211.1; P223 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0170-09

Analysis of terrestrial water storage and its component changes in China from 2002 to 2021 // CHU Jiangdong^{1,2}, SU Xiaoling^{1,2}, WU Haijiang^{1,2}, LIU Yuhang^{1,2}, FENG Kai³ (1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to explore the changes of terrestrial water storage (TWS) and its components in China from April 2002 to March 2021, the interval data between GRACE gravity satellite and its follow-on satellite GRACE-FO were interpolated by using a hybrid VMD-LSTM model based on the decomposition-integration idea. The Theil-Sen slope analysis method and the Mann-Kendall trend test method were used to study the spatiotemporal evolution of TWS and its components in nine major river basins in China. The random forest method was used for analyzing the relative contribution rate of each component to TWS. The results showed that the VMD-LSTM model can effectively interpolate the GRACE sequence in China, with the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient greater than 0.6, correlation coefficient greater than 0.9, and root mean square error less than 2 cm in most regions, which significantly improves the interpolation accuracy. There is a spatial consistency between the change trends of TWS and groundwater storage. Except for the Southeast River Basin, Pearl River Basin, and Yangtze River Basin, TWS in other basins shows a downward trend, which is mainly caused by groundwater deficit. TWS in western arid and semi-arid regions and North China is mainly affected by groundwater storage, and TWS is greatly affected by canopy water storage and soil water storage in humid and semi-humid regions, compared to arid and semi-arid regions.

Key words: terrestrial water storage; VMD-LSTM; GRACE data interpolation; composition changes; China

陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)是地表水、土壤水、地下水、冠层水、雪水、冰川等组分的综合

反映^[1],其变化量反映了区域水储量的总体变化。探究TWS变化的时空分布及其驱动因素,对了解区域水

基金项目:水利部重大科技项目(SKS-2022018);国家自然科学基金(52079111, 51879222)

作者简介:褚江东(1997—),男,博士研究生,主要从事水文模拟研究。E-mail:cycjd1997@nwafu.edu.cn

通信作者:栗晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水文模拟研究。E-mail:xiaolingsu@nwafu.edu.cn

循环过程和水资源优化配置具有重要意义。

卫星遥感技术为监测 TWS 变化提供了新的视角。自 2002 年 3 月 GRACE (gravity recovery and climate experiment) 重力卫星发射升空以来, GRACE 数据被应用于监测 TWS 变化^[1-2]、地下水储量变化^[3-4]、干旱演变^[5-7]、实际蒸散发^[8]、冰川冰盖消融^[9]及海平面变化^[10]等。在监测 TWS 变化方面, 陈威等^[11]基于 GRACE 数据、GLDAS (global land data assimilation system) 水文模型数据和实测降水数据剖析了中国区域 TWS 年际变化与极端气候指标 ENSO (El Niño-southern oscillation) 的关系, 发现长江流域中下游、东南诸河 TWS 与 ENSO 存在较强的相关性; Jing 等^[12]结合 GRACE 数据和 GLDAS 模型数据, 分析了澜沧江流域的 TWS 时空变化趋势; 吴奇凡^[13]结合 GRACE 数据、GLDAS 模型数据、实测地下水位等数据, 揭示了退耕还林还草工程对深层土壤水的过度消耗是黄土高原水储量下降最主要的影响因素。此外, 不少学者还探讨了 TWS 的外界驱动因素^[1, 11, 14-16], 如 Deng 等^[16]详细分析了降水、潜在蒸散发和叶面积指数对中国 TWS 变化的影响; 聂宁等^[1]探讨了长江流域水储量变化与气候波动、水库调蓄、土地利用变化等因素的关系。然而, 鲜有研究着眼于从水储量组分的角度系统分析其对中国 TWS 变化的影响。

由于 GRACE 卫星与其后续卫星 GRACE-FO 之间存在 11 月的间断期, 这限制了 TWS 变化的连续性研究。为此, 国内外研究学者就如何插补间断期的 GRACE 数据进行了大量的研究, 如 Wei 等^[2, 14-15]分别采用 LSTM (long short-term memory) 模型插补了柴达木盆地、黄河源区、黄河流域的 GRACE 间断期序列, 且模拟精度较高, 表明了 LSTM 模型在预测方面的稳健性; Xiong 等^[17]基于随机森林法、支持向量机、人工神经网络对中国大陆的 GRACE 间断期数据进行插补, 总体精度较高, 但在干旱半干旱地区的精度较差; Sun 等^[18]基于深度神经网络 (deep neural networks, DNN) 等 3 种方法重建了全球的 GRACE 序列, 但在中国西北地区的预测精度较差, 这可能与输入因素与 TWS 变化相关性不强等因素有关。因此亟待寻找一种 GRACE 数据插补精度高的模型, 以提高中国 TWS 变化研究的连续性。

基于此, 本文采用基于分解-集成思想的变模态分解 (variational mode decomposition, VMD)-LSTM 组合预测模型插补中国 2017 年 7 月至 2018 年 5 月 GRACE 的间断期数据, 分析 2002 年 4 月至 2021 年 3 月 TWS 变化的时空演变趋势, 探讨 TWS 各组分变化对 TWS 变化的影响程度, 为水资源可持续利用提供科学依据。

1 数据来源

中国地处亚欧大陆东南部, 领土总面积约为 960 万 km², 气候类型包含热带、亚热带、温带、寒带等。中国降水主要集中在夏秋两季, 时空分布不均, 总体呈现东南多、西北少的格局。按照水利部的流域划分, 我国可划分为九大流域, 分别为东南诸河片、内陆河片、松辽流域片、海河流域片、淮河流域片、珠江流域片、西南诸河片、长江流域片和黄河流域片。

1.1 GRACE 数据

本文采用美国得克萨斯大学空间研究中心 (Center for Space Research, University of Texas at Austin) 提供的 2002 年 4 月—2021 年 3 月的质量块 (Mascons) 数据 (http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html)。该数据已替换 C₂₀ 项和地心改正项, 并扣除了冰川均衡调整的影响, 以 2004 年 1 月至 2009 年 12 月均值为基准作距平处理, 具有高分辨率、高信噪比、泄露误差小等特点^[19], 在监测水储量、干旱等方面得到了广泛的应用^[6, 20-22]。该数据的空间分辨率为 0.25° × 0.25°, 但实际分辨率约为 1° × 1°。其中, GRACE 的间断期 (2017 年 7 月至 2018 年 5 月) 数据采用 VMD-LSTM 模型插补, 其余因卫星技术原因导致的数据缺失采用时间线性插值方法补充。

1.2 GLDAS 数据

本文采用 GLDAS 水文模型中的 Noah 陆地表面模型提供的 2002 年 4 月至 2021 年 3 月逐月 0 ~ 200 cm 的土壤水储量、雪水当量、冠层水储量、降水和气温数据, 空间分辨率均为 0.25° × 0.25°。为与 GRACE 数据保持一致, 土壤水储量、雪水当量和冠层水储量以 2004 年 1 月至 2009 年 12 月均值为基准得到逐月变化值。

2 研究方法

2.1 人工神经网络

人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 是一种模仿人脑结构的信息处理系统模型, 具有自学习、自适应、自组织、非线性等特点。BP 神经网络作为 ANN 的一种类型, 具有信号正向传播, 误差反向传播的特点, 已被广泛应用在水文预测预报中^[22-23]。

2.2 VMD-LSTM 模型

VMD^[24]由经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 改进而来, 通过迭代搜寻变分模型的最优解确定每个分解分量的频率中心及带宽, 能够自适应地实现信号的频域剖分及各分量的有效分离^[25]。相对于 EMD, VMD 在噪声处理和误差采样等方面具有较好的鲁棒性^[26]。本文利用该方法将 TWS

变化序列分解成一系列满足特定要求的本征模态函数子项和一个趋势项,相关计算方法可参照周柏彤等^[25]的研究。

长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)^[27]是一种引入了遗忘门、输入门、输出门和记忆细胞的循环神经网络(recurrent neural network, RNN)。RNN既可在隐含层中保留过去的信息,也能缓解梯度消失、梯度爆炸等问题的发生。有关LSTM的计算过程可参照杨丽等^[28]的研究。

鉴于VMD和LSTM模型的优势,参照Liu等^[29]的研究,本文将这两种模型相结合,建立一种基于分解-集成思想的组合预测模型。VMD-LSTM模型主要分为两部分,第一部分进行数据预处理,即基于VMD分解原理,将非平稳时间序列分解为多个本征模态函数和一个趋势余项;第二部分进行各分量的预测,将各个子项和趋势项通过LSTM模型训练并预测,将各分量的预测值相加得到最终预测值。最后通过对预测值与实测值的对比分析评价模型性能。

VMD的二次罚因子 α 取2 000,分解模态数 k 取4~9,本文根据纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)值选择最优模态数 k 。如果 k 过小,原序列可能分解不充分,导致预测精度较低;如果 k 过大,原序列可能被过度分解,每个分量之间的差异性变小,导致预测精度较低,并花费较多的计算时间。LSTM模型中设置有一个隐含层,包含200个隐含单元,迭代次数取200,初始学习率为0.005,在125轮迭代后通过乘以因子0.2来降低学习率。

本文共设置了5种模型进行GRACE间断期序列的插补:①考虑因果关系的模型ANN-1和LSTM-1。基于ANN和LSTM模型,参照Sun等^[18]的研究,考虑到降水和气温对水储量的影响有滞后效应,取滞时为1月时精度更好,因此输入数据选用GLDAS-Noah模型提供的土壤水储量、雪水当量和冠层水储量之和的变化以及滞时为1月的降水和气温。②考虑时间序列的模型ANN-2、LSTM-2和VMD-LSTM,输入数据为前12月的TWS变化值。以上5种模型的训练期为2003年4月至2015年11月(152月),验证期为2015年12月至2017年6月(19月),预测期为2017年7月至2018年5月(11月)。

采用水文模拟中常用的评价指标NSE、相关系数(correlation coefficient, CC)、均方根误差(root mean square error, RMSE)评价模型的性能。

2.3 地下水储量变化的计算

陆地水包括地表水、地下水、土壤水、雪水、生物水、冠层水、冰川等,其中生物水、地表水和冰川难以

量测,且在大部分地区相对其他成分变化可忽略不计。TWS变化可由GRACE数据提供,土壤水储量变化、雪水当量变化、冠层水储量变化可由GLDAS模型数据提供,国内外学者多采用GRACE和GLDAS模型数据计算地下水储量变化^[4,6,14-15],计算公式为

$$A_{GWS} = A_{TWS} - A_{SMS} - A_{SWES} - A_{CWS} \quad (1)$$

式中 A_{GWS} 、 A_{TWS} 、 A_{SMS} 、 A_{SWES} 、 A_{CWS} 分别为地下水储量变化、TWS变化、土壤水储量变化、雪水当量变化和冠层水储量变化,cm。由于式(1)未考虑到部分水储量(例如径流、冰川、湖泊等)的变化情况,加之数据的观测和模拟误差,这些因素会导致反演得到的地下水储量变化有一定误差。例如,湿润地区往往地表水储量较为丰富,高山高原地区雪水和冰川水储量季节性变化较明显,由此计算得到这些地区的地下水储量变化可能存在一定误差。

2.4 Theil-Sen 斜率分析与 Mann-Kendall 趋势检验法

Theil-Sen 斜率分析法是一种非参数化检验法^[30],常用来估计时间序列的趋势变化,其计算方法不易受到异常值的影响,相对于线性回归而言准确性更高。Mann-Kendall 趋势检验法也是一种非参数化的统计检验方法,被广泛应用在水文序列趋势检验的研究中^[2,15,17,31]。其统计量 $|Z| > 2.58$ 或 $1.96 < |Z| \leq 2.58$ 表明趋势分别通过了 $\alpha = 0.01$ 或 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。

2.5 随机森林法

本文采用随机森林法对TWS各组分的贡献率进行评价,具体步骤为:①基于MATLAB的Treebagger函数确定最优叶子结点数和树数,通过计算确定本文中叶子结点数、树数分别为5和100;②通过对2002年4月至2021年3月的数据进行训练,计算得到各个自变量的重要性评分;③将重要性评分转化为相对贡献率,分析TWS各组分变化对TWS变化的影响。

3 结果与分析

3.1 GRACE 序列间断期插补精度评价

图1为各模型验证期GRACE序列的插补精度评价结果。从各性能评价指标的空间分布来看,ANN-1、LSTM-1模型的插补精度稍优于ANN-2和LSTM-2模型,ANN-1和LSTM-1在云南和长江中下游地区对GRACE数据序列的插补精度较高,但在干旱半干旱地区插补精度较低。相较于ANN-1、ANN-2、LSTM-1、LSTM-2模型,VMD-LSTM模型在绝大多数流域的NSE和CC分别大于0.6和0.9,且RMSE小于2 cm,插补精度显著提高,体现出VMD-LSTM模型对GRACE序列插补的优势。

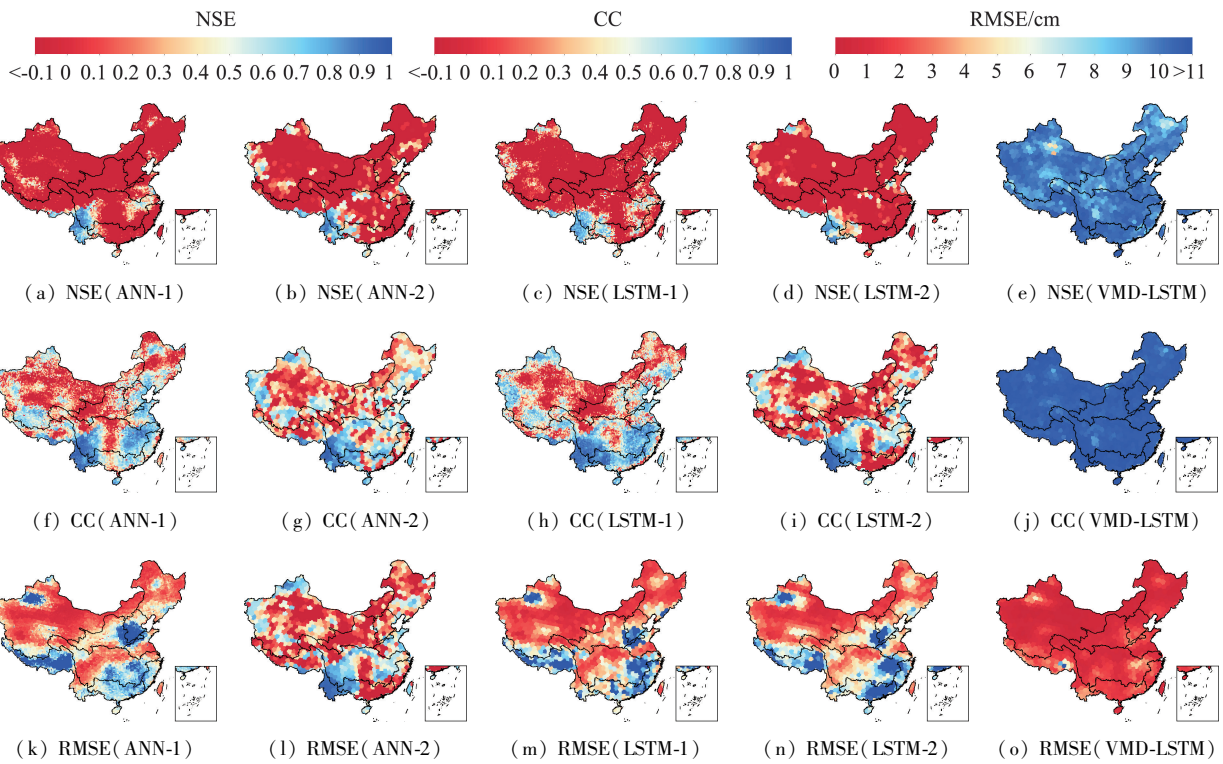


图1 各模型验证期 GRACE 序列插补精度评价结果

Fig.1 Results of accuracy evaluation of GRACE series interpolation for each model during validation period

图2为验证期VMD-LSTM模型对中国九大流域TWS变化模拟值与实测值的散点图。由图2可知,该模型在各流域的模拟精度均较高,NSE和CC值均大于0.9。但VMD-LSTM模型在东南诸河片、长江流域片对TWS变化离群高值的模拟效果稍差;西南诸河片的RMSE大于3 cm,这与藏东南地区近期冰川融化加剧、降水变少等原因^[32-33]导致该地区水储量变化幅度较为明显有一定关系。

在输入项和TWS变化相关性不强的地区,ANN-1和LSTM-1模型难以建立有效弱相关因子的对应关系;由于TWS变化数据具有复杂的非线性非平稳特征,ANN-2和LSTM-2模型也难以捕捉到序列的变化特征。相对于常规的机器学习模型,基于分解-集成思想的VMD-LSTM模型优势在于该模型将序列分解为多个分量后,各子序列的周期趋势特征更为明显,而水文序列一般具有显著的周期, VMD分解方法可能有助于LSTM模型识别受外部因素(气象因素、人类活动和植被变化等)影响的TWS变化的周期和趋势特征,从而可进一步提高GRACE序列间断期的插补精度,因此,VMD-LSTM模型在序列插补和预测上有较大的潜力。鉴于VMD-LSTM模型在中国九大流域验证期的精度较高,将基于VMD-LSTM模型插补后的TWS变化数据应用到本文研究中。

3.2 TWS变化趋势分析

基于Theil-Sen斜率分析得到2002年4月至

2021年3月TWS及其组分变化速率的空间分布(图3),其中,雪水当量的变化速率仅在中国西部和东北地区有数据,而在其他地区无常年覆盖积雪(图3(e)中空白区域)或雪水当量变化量级过小。由图3可知,TWS、地下水储量、土壤水储量、冠层水储量、雪水当量呈上升趋势的格点占比分别为46.8%、39.0%、64.9%、19.1%和4.3%,呈下降趋势的格点占比分别为53.2%、61.0%、35.1%、42.3%和17.8%。新疆天山山脉、藏东南地区和华北平原TWS和地下水储量均呈现明显的枯竭趋势,柴达木盆地、长江中游地区和松花江地区呈现上升趋势,TWS和地下水储量两者趋势较为一致。城市化发展、气候变化、人类用水量加剧等诸多因素导致华北平原的水储量下降,但在南水北调中线工程建成调水后有所缓解^[3];受气候变暖影响,藏东南地区 and 天山山脉的冰雪、冰川加速融化^[32],导致水储量下降,而青藏高原的冰雪融水由于重力作用流向处在低海拔地区的柴达木盆地^[6],导致该地区水储量不断上升;三峡大坝建成后拦截长江径流,抬高上游水位,进而导致库区上游水储量上升。松花江地区、三江源地区冠层水储量有上升趋势,而藏东南和南方大部分地区冠层水储量呈下降趋势。三江源地区TWS、冠层水储量、雪水当量均有上升趋势,这与该地区自2003年以来降水增多^[34]有一定联系。

图4、表1分别为中国九大流域TWS及其组分时间序列和变化趋势Z值统计,图4中由于冠层水

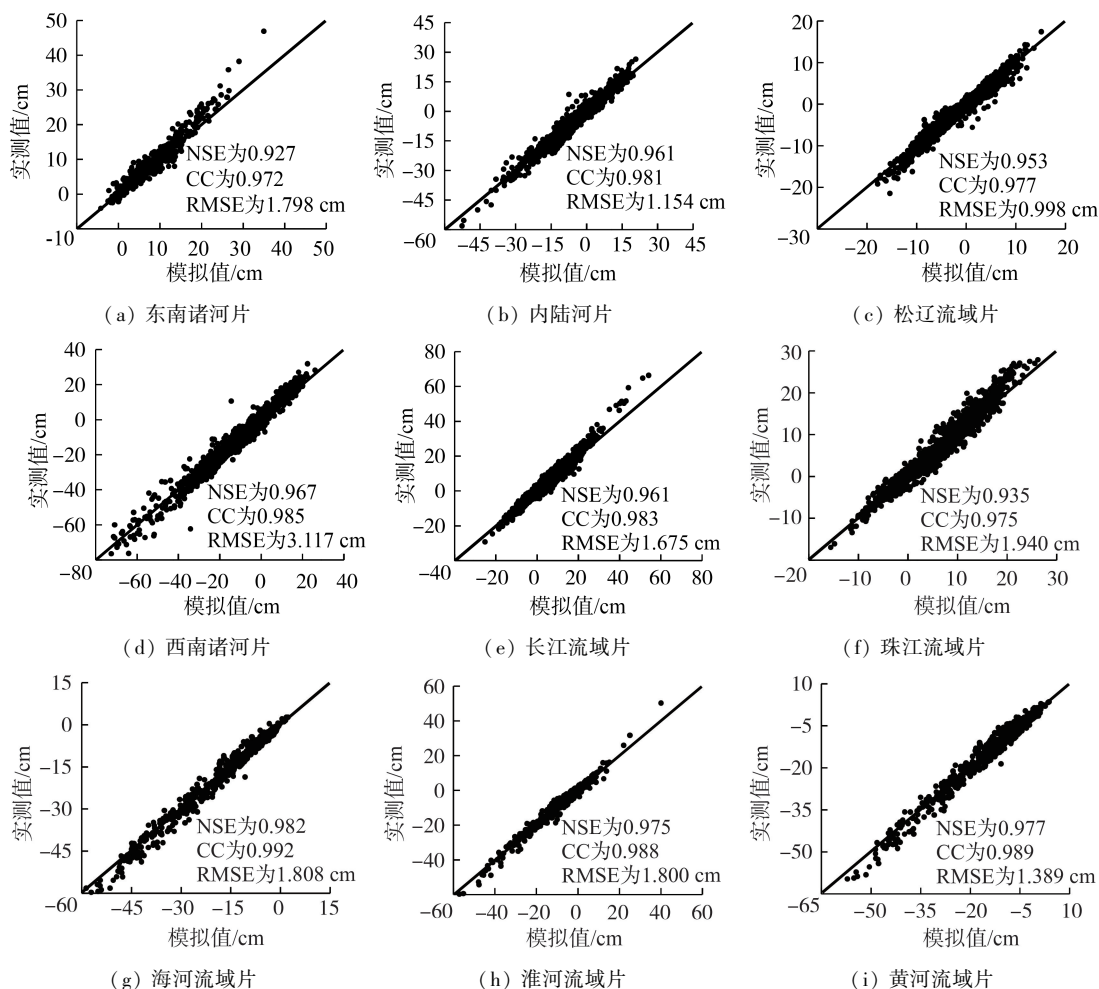


图2 验证期 VMD-LSTM 模型对 TWS 变化模拟值与实测值的散点图

Fig.2 Scatter plots of simulated values of TWS anomalies obtained with VMD-LSTM model and in-situ data during validation period

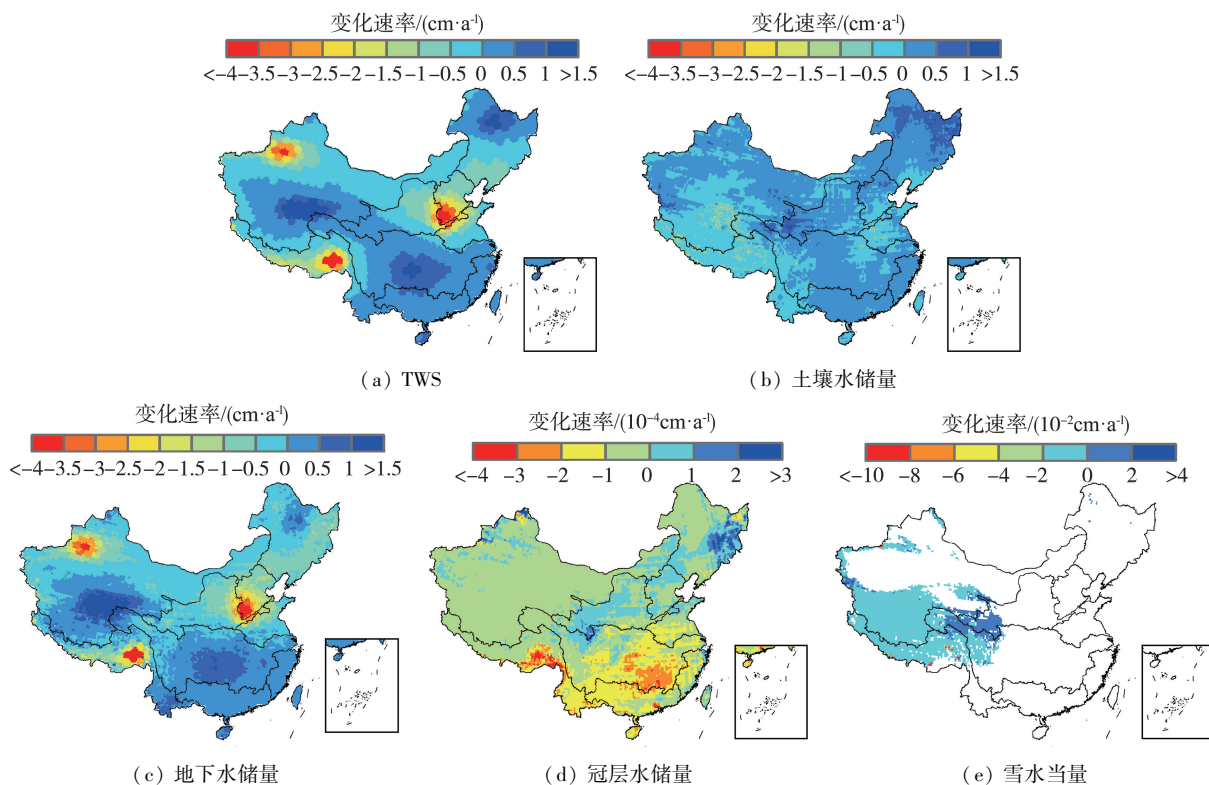


图3 TWS 及其组分变化速率空间分布

Fig.3 Spatial distributions of TWS and its component change rates

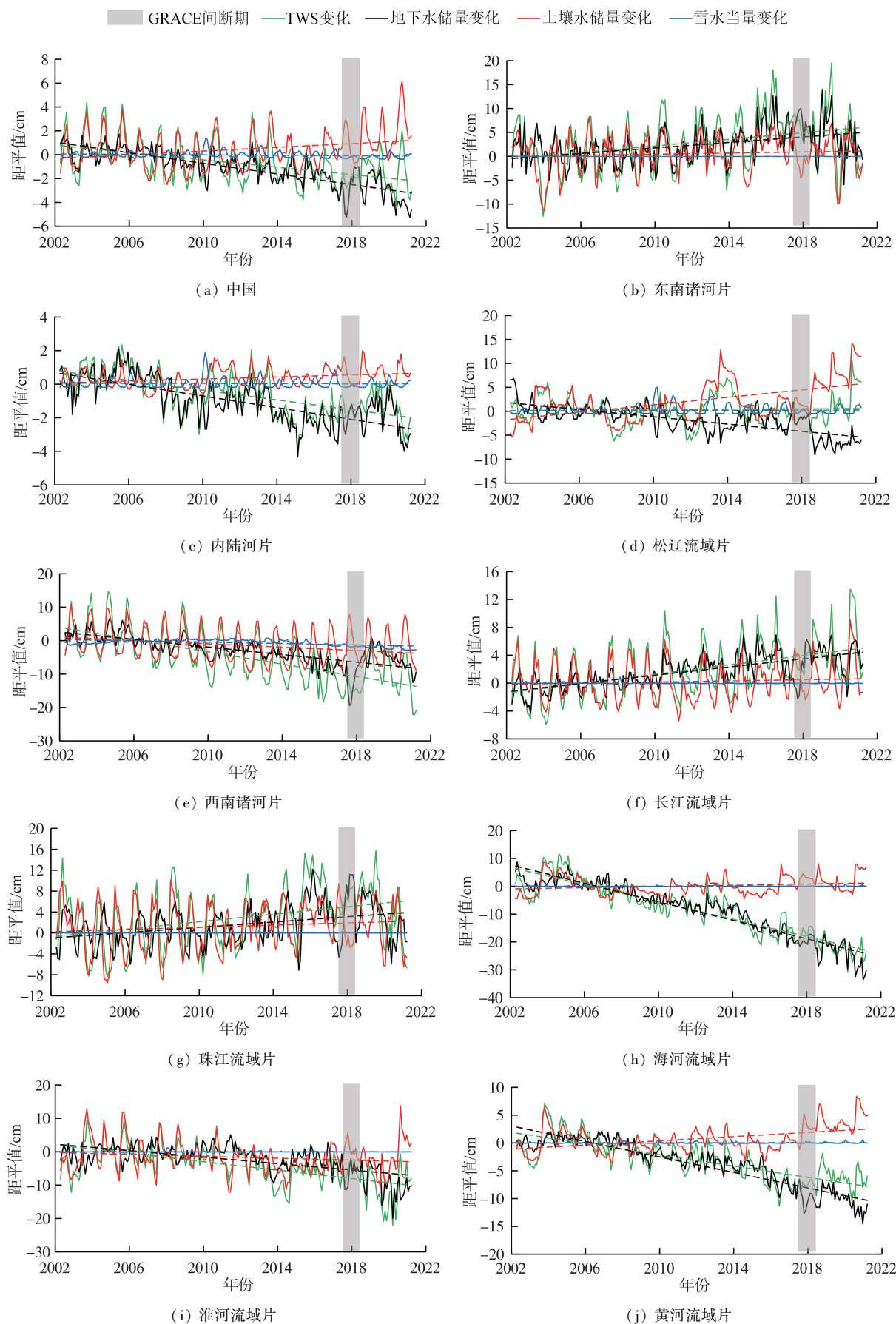


图4 TWS及其组分变化时间序列

Fig.4 Time series of TWS and its component changes

表 1 TWS 及其组分变化趋势 Z 值统计

Table 1 Statistics of Z values of TWS and its component change trends

流域	TWS	地下水 储量	冠层水 储量	雪水 当量	土壤水 储量
东南诸河片	4.95 **	6.31 **	-0.86	-0.37	1.06
内陆河片	-9.60 **	-11.53 **	-0.71	-0.75	4.30 **
松辽流域片	-0.44	-11.04 **	0.42	0.62	7.66 **
西南诸河片	-10.57 **	-13.11 **	-2.21 *	-9.85 *	-4.63 **
长江流域片	7.14 **	11.51 **	-2.09 *	-1.21	1.08
珠江流域片	5.30 **	5.05 **	-1.53	-0.71	1.78
海河流域片	-16.80 **	-18.45 **	0.40	0.16	2.87 **
淮河流域片	-9.74 **	-9.40 **	-1.20	-0.40	-2.25 *
黄河流域片	-13.12 **	-16.98 **	0.55	1.20	6.37 **

注: * 表示趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验, ** 表示趋势通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验。

储量变化量级过小未展示。由此可知,除东南诸河片、长江流域片、珠江流域片 TWS 呈现极显著上升趋势,松辽流域片 TWS 呈不显著下降趋势外,其余流域均呈极显著下降趋势,这与 Xiong 等^[17] 研究结果基本一致;地下水储量除松辽流域片呈极显著下降趋势,其余流域变化趋势均与 TWS 相同;冠层水储量仅西南诸河片和长江流域片呈显著下降的趋势;西南诸河片雪水当量呈极显著下降趋势;相较于其他组分,土壤水储量在多数流域呈上升趋势。内陆河片、松辽流域片、海河流域片、黄河流域片 TWS 亏损主要是因为地下水储量的减少引起。整体而言,2002 年 4 月至 2021 年 3 月,中国 TWS、地下水储量、土壤水储量、雪水当量、冠层水储量的变化速率分别为 -0.15 cm/a 、 -0.22 cm/a 、 0.08 cm/a 、 -0.01 cm/a 、 $-4 \times 10^{-5} \text{ cm/a}$,折合累计水量变化约为 -2.88 万亿 m^3 、 -4.22 万亿 m^3 、 1.54 万亿 m^3 、 -1920 亿 m^3 、 -7.7 亿 m^3 。

3.3 TWS 各组分变化的相对贡献率

图 5 为 2002 年 4 月至 2021 年 3 月中国 TWS 各组分变化的相对贡献率空间分布图。由图 5 可看出,土壤水储量变化贡献率高的区域主要集中在松辽流域片、黄河上游、云贵高原和秦岭山脉等地区,地下水储量变化贡献率高的区域主要集中在华北平原、三峡库区和西部干旱半干旱地区。冠层水储量和雪水当量变化较土壤水储量、地下水储量变化量级小,但从图 5 中看出,冠层水储量变化贡献率高的区域主要集中在额尔齐斯河流域、松辽流域片、东南诸河片和青藏高原等地区,这些地区的草地或林地生态系统较为完备,植被冠层截留能力较强;青藏高原和松辽流域片的雪水当量变化占 TWS 变化比例较高。结合表 2 可看出,相对于其他流域片,内陆河片、海河流域片和黄河流域片的地下水储量变化对 TWS 变化起主导作用。内陆河片气候干燥,土壤

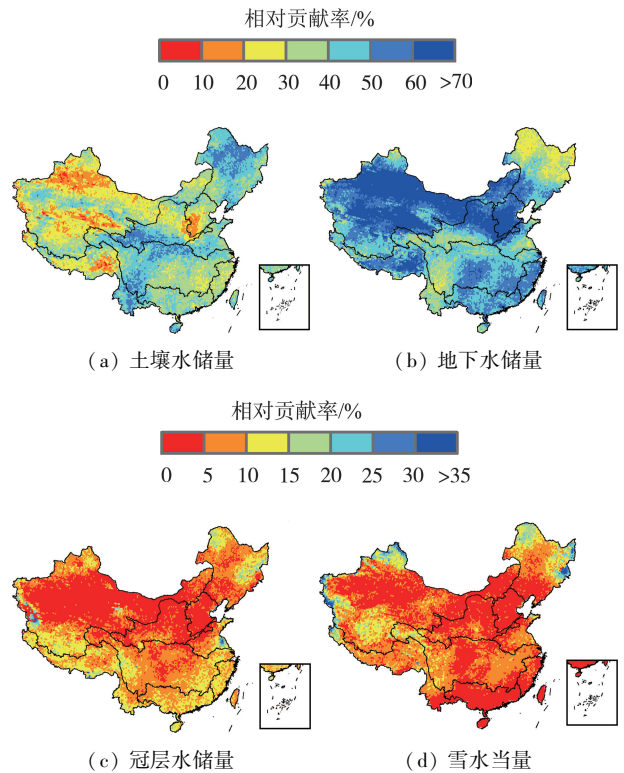


图 5 TWS 各组分变化的相对贡献率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of relative contribution rate of each TWS component change

水、冠层水和雪水可基本忽略不计,地下水是干旱半干旱地区人类赖以生存的宝贵水源;海河流域片人口密集,农业灌溉用水较多,过度抽取地下水导致该地区水储量减少。由于充沛的降水和较发达的生态系统,湿润半湿润地区的冠层水储量变化和土壤水储量变化占比较干旱半干旱地区高;高纬度高海拔地区雪水当量变化占比较低纬度低海拔地区高。

表 2 TWS 各组分变化的相对贡献率

Table 2 Relative contribution rate of each TWS component change

流域	相对贡献率/%			
	地下水储量	冠层水储量	雪水当量	土壤水储量
东南诸河片	52.9	10.1	3.1	33.8
内陆河片	60.6	4.1	6.7	28.7
松辽流域片	37.3	8.1	9.8	44.8
西南诸河片	48.8	10.4	7.4	33.4
长江流域片	45.6	7.7	6.2	40.5
珠江流域片	49.6	10.0	1.7	38.6
海河流域片	65.7	2.9	2.3	29.1
淮河流域片	45.0	8.2	6.0	40.8
黄河流域片	53.4	3.6	3.9	39.1

4 结 论

a. 与 ANN、LSTM 等模型相比较,基于分解-集成思想的组合预测模型 VMD-LSTM 能够更为有效

地插补中国 GRACE 序列间断期的数据,大多数地区 NSE 大于 0.6、CC 大于 0.9、RMSE 小于 2 cm,插补精度显著提高,可为其他地区 GRACE 序列间断期数据的插补研究提供参考思路。

b. TWS 变化和地下水储量变化的趋势具有较好的空间一致性,除东南诸河片、珠江流域片和长江流域片,其他流域 TWS 均呈现出下降趋势,而下降趋势主要由地下水亏损导致;2002 年 4 月—2021 年 3 月中国 TWS、地下水储量、土壤水储量、雪水当量、冠层水储量的变化速率分别为 -0.15 cm/a 、 -0.22 cm/a 、 0.08 cm/a 、 -0.01 cm/a 、 $-4 \times 10^{-5} \text{ cm/a}$,折合累计水量变化约为 -2.88 万亿 m^3 、 -4.22 万亿 m^3 、 1.54 万亿 m^3 、 -1920 亿 m^3 、 -7.7 亿 m^3 ,今后有必要针对水储量下降的典型地区进行气候变化和人类活动的驱动因素分析,以采取有效措施缓解和补救。

c. 地下水储量变化在西部干旱半干旱地区和华北地区对 TWS 变化起主导作用,湿润半湿润地区的冠层水储量变化和土壤水储量变化对 TWS 变化的贡献较干旱半干旱地区高。

参考文献:

[1] 聂宁,张万昌,陈豪,等.长江流域水储量变化的时间变化特征及归因分析[J].水科学进展,2021,32(3):396-407. (NIE Ning, ZHANG Wanchang, CHEN Hao, et al. Temporal variation characteristics and attribution analysis of terrestrial water storage change in the Yangtze River Basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 396-407. (in Chinese))

[2] WEI Linyong, JIANG Shanhu, REN Liliang, 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, 2021, 598: 126274.

[3] LONG Di, YANG Wenting, SCANLON B R, et al. South-to-North Water Diversion stabilizing Beijing's groundwater levels[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3665.

[4] 李舒,师鹏飞,谷晓伟,等. GRACE 重力卫星监测煤矿开采区地下水变化研究[J]. 水利学报, 2021, 52(12): 1439-1448. (LI Shu, SHI Pengfei, GU Xiaowei, et al. GRACE-based monitoring groundwater change in coal mining areas[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(12): 1439-1448. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 栗晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演

变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese))

[7] 冉艳红,钟敏,陈威,等. 利用 GRACE-FO 重力卫星探测 2019 年长江中下游极端干旱[J]. 科学通报, 2021, 66(1): 107-117. (RAN Yanhong, ZHONG Min, CHEN Wei, et al. Monitoring the extreme drought in the middle and lower reaches of the Yangtze River in 2019 from GRACE-FO satellites [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(1): 107-117. (in Chinese))

[8] 鞠艳,张珂,李炳锋,等. 金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 104-110. (JU Yan, ZHANG Ke, LI Bingfeng, et al. Spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration and its influencing factors in the Jinsha River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 104-110. (in Chinese))

[9] MU Yaqiong, WEI Yanqiang, WU Jinkui, et al. Variations of mass balance of the Greenland ice sheet from 2002 to 2019[J]. Remote Sensing, 2020, 12(16): 2609.

[10] RAJ R P, ANDERSEN O B, JOHANNESSEN J A, et al. Arctic sea level budget assessment during the GRACE/Argo time period [J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2837.

[11] 陈威,钟敏,冯伟,等. 2005—2017 年两次强 ENSO 事件对中国区域陆地水储量变化影响的卫星重力观测[J]. 地球物理学报, 2020, 63(1): 141-154. (CHEN Wei, ZHONG Min, FENG Wei, et al. Effects of two strong ENSO events on terrestrial water storage anomalies in China from GRACE during 2005-2017 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(1): 141-154. (in Chinese))

[12] JING Wenlong, ZHAO Xiaodan, YAO Ling, et al. Variations in terrestrial water storage in the Lancang-Mekong River Basin from GRACE solutions and land surface model [J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: 124258.

[13] 吴奇凡. 黄土高原陆地水储量变化归因分析及区域尺度地下水补给[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.

[14] 梁文涛,卫林勇,刘懿,等. 近 20 年黄河源区陆地水储量增加及其可能原因分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(9): 70-74. (LIANG Wentao, WEI Linyong, LIU Yi, et al. Increase in terrestrial water storage and possible causes over the source region of the Yellow River in recent two decades [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(9): 70-74. (in Chinese))

[15] 任立良,王宇,江善虎,等. 基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域陆地水储量及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 26-32. (REN Liliang, WANG Yu, JIANG Shanhu, et al. GRACE and GRACE-FO-based

- terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 26-32. (in Chinese))
- [16] DENG Shanshan, LIU Suxia, MO Xingguo. Assessment and attribution of China's droughts using an integrated drought index derived from GRACE and GRACE-FO data [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127170.
- [17] XIONG Jinghua, YIN Jiabo, GUO Shenglian, et al. Continuity of terrestrial water storage variability and trends across mainland China monitored by the GRACE and GRACE-Follow on satellites [J]. Journal of Hydrology, 2021, 599: 126308.
- [18] SUN Zhangli, LONG Di, YANG Wenting, 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): e2019WR026250.
- [19] SAVE H, BETTADPURS, TAPLEY B D. High-resolution CSR GRACE RL05 mascons [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(10): 7547-7569.
- [20] YIN Wenjie, FAN Zongwen, TANGDAMRONGSUB N, et al. Comparison of physical and data-driven models to forecast groundwater level changes with the inclusion of GRACE: a case study over the state of Victoria, Australia [J]. Journal of Hydrology, 2021, 602: 126735.
- [21] CUI Aihong, LI Jianfeng, ZHOU Qiming, et al. Use of a multiscalar GRACE-based standardized terrestrial water storage index for assessing global hydrological droughts [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126871.
- [22] ZHANG Bao, YAO Yibin, HE Yulin. Bridging the data gap between GRACE and GRACE-FO using artificial neural network in Greenland [J]. Journal of Hydrology, 2022, 608: 127614.
- [23] LAI Yu, ZHANG Bao, YAO Yibin, et al. Reconstructing the data gap between GRACE and GRACE follow-on at the basin scale using artificial neural network [J]. Science of the Total Environment, 2022, 823: 153770.
- [24] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [25] 周柏彤, 刘增力, 朱健晨. 关于多种模态分解方法的分离效果的差别探讨 [J]. 信息技术, 2016(12): 87-92. (ZHOU Baitong, LIU Zengli, ZHU Jianchen. Study on the difference separation effect between several modal decomposition and its application on the rolling bearing fault feature extraction [J]. Information Technology, 2016(12): 87-92. (in Chinese))
- [26] 王瑞, 陈泽坤, 逯静. 基于 VMD 和 IBA-LSSVM 的短期风电功率预测 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49(6): 575-582. (WANG Rui, CHEN Zekun, LU Jing. Short term prediction of wind power based on VMD and IBA-LSSVM [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 575-582. (in Chinese))
- [27] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [28] 杨丽, 吴雨茜, 王俊丽, 等. 循环神经网络研究综述 [J]. 计算机应用, 2018, 38(增刊 2): 1-6. (YANG Li, WU Wuxi, WANG Junli, et al. Research on recurrent neural network [J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(Sup2): 1-6. (in Chinese))
- [29] LIU Yishun, YANG Chunhua, HUANG Keke, et al. Non-ferrous metals price forecasting based on variational mode decomposition and LSTM network [J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 188: 105006.
- [30] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [31] 刘浏, 王宣宣, 牛乾坤, 等. 雅鲁藏布江流域陆地水储量变化特征及归因 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 135-144. (LIU Liu, WANG Xuanxuan, NIU Qiankun, et al. Evolution characteristic of terrestrial water storage change and its attribution analysis over the Yarlung Zangbo River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 135-144. (in Chinese))
- [32] 邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响 [J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1309-1323. (DENG Haijun, CHEN Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: a case study in Tianshan Mountains of Central Asia [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1309-1323. (in Chinese))
- [33] 韩煜娜, 左德鹏, 王国庆, 等. 变化环境下青藏高原陆地水储量演变格局及归因 [J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 199-207. (HAN Yuna, ZUO Depeng, WANG Guoqing, et al. Evolution pattern and attribution analysis of terrestrial water storage in Tibetan Plateau under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 199-207. (in Chinese))
- [34] 蔡永祥, 罗少辉, 王军, 等. 三江源地区 1961-2019 年降水量时空变化特征 [J]. 草业科学, 2022, 39(1): 10-20. (CAI Yongxiang, LUO Shaohui, WANG Jun, et al. Spatiotemporal variations in precipitation in the Three-River Head water region from 1961 to 2019 [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(1): 10-20. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-03-29 编辑: 施业)