

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.003

基于 GRACE 降尺度分析的江西省山丘区地下水 储存量变化时空演变规律

何景媛¹, 肖漫华², 游建飞¹, 陈立月¹, 朱健¹, 鲁程鹏²

(1. 江西省地质调查勘察院地质环境监测所, 江西 南昌 330006; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究江西省山丘区地下水储存量变化的时空特征, 基于 2003—2023 年 GRACE/GRACE-FO 卫星反演数据, 构建了集降尺度重建与趋势识别于一体的地下水时空演变分析框架, 揭示了地下水储存量异常 (GWSA) 数据的变化格局。通过深度学习模型对 GWSA 进行高分辨率重建, 应用 STL 分解提取长期趋势分量, 结合 Mann-Kendall 检验与 Theil-Sen 斜率估算法识别地下水变化趋势及其显著性。结果表明: 重建后的高分辨率 GWSA 数据清晰地揭示了江西山丘区地下水储存量的时空演变特征; 经 STL 分解, 序列表现出显著的长期趋势和稳定的季节波动, 2003—2023 年全省地下水整体缓慢上升, 长期趋势整体呈“东北—中部恢复、南部持续亏损”的演变格局, 南部赣州市减储显著, 是典型亏损区; 地下水变化呈现出区域差异性、阶段性演变及高频异常增强的复合特征, 反映出系统尚未稳定, 仍处于易亏的临界状态。

关键词: GRACE 卫星; 地下水储存量; STL 分解; 趋势分析; 江西省山丘区

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)06-0021-12

Spatiotemporal evolution patterns of groundwater storage variations in hilly area of Jiangxi Province based on downscaling analysis of GRACE data

HE Jingyuan¹, XIAO Manhua², YOU Jianfei¹, CHEN Liyue¹, ZHU Jian¹, LU Chengpeng²

(1. Geological Environment Monitoring Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330006, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the spatiotemporal characteristics of groundwater storage changes in the hilly areas of Jiangxi Province, based on the gravity recovery and climate experiment (GRACE)/GRACE-FO satellite inversion data from 2003 to 2023, a spatiotemporal evolution analysis framework of groundwater integrating downscaling reconstruction and trend identification was constructed, revealing the pattern of changes in groundwater storage anomalies (GWSA). The high-resolution reconstruction of GWSA was carried out through a deep learning model. The long-term trend component was extracted using seasonal-trend decomposition using LOESS (STL). The groundwater change trend and its significance were identified by combining the Mann-Kendall test and the Theil-Sen slope estimation method. The results show that the reconstructed high-resolution GWSA data clearly reveal the spatiotemporal evolution characteristics of groundwater storage in the hilly areas of Jiangxi Province; after STL, the sequence shows a significant long-term trend and stable seasonal fluctuations. From 2003 to 2023, the groundwater level in the entire province has risen slowly, and the overall long-term trend shows an evolution pattern of “recovery in northeastern and central regions but continuous depletion in southern regions”. Notably, Ganzhou City in southern Jiangxi exhibits a significant decline in groundwater storage, making it a representative groundwater-deficit zone. Groundwater variations exhibit compound characteristics, including regional disparities, phased evolution, and intensified high-frequency anomalies, indicating that the system remains unstable and is in a critical state vulnerable to further depletion.

Key words: GRACE satellite; groundwater storage; STL; trend analysis; hilly area of Jiangxi Province

基金项目: 江西省水资源基础调查项目(赣自然资办函[2024]362号); 江西省技术创新引导类计划“科技+地质”联合计划项目(2023KDG01008, 2023KDG01009); 国家自然科学基金面上项目(524032711)

作者简介: 何景媛(1985—), 女, 高级工程师, 主要从事地下水环境监测及调查评价研究。E-mail: 345129453@qq.com

通信作者: 肖漫华(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xiaomanhua@hhu.edu.cn

引用本文: 何景媛, 肖漫华, 游建飞, 等. 基于 GRACE 降尺度分析的江西省山丘区地下水储存量变化时空演变规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 21-32.

HE Jingyuan, XIAO Manhua, YOU Jianfei, et al. Spatiotemporal evolution patterns of groundwater storage variations in hilly area of Jiangxi Province based on downscaling analysis of GRACE data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6): 21-32.

地下水作为水资源的重要组成部分,因其分布广泛、易于开采、水质相对优良而被广泛用于生产、生活和生态供水^[1-2]。我国部分大中型城市以地下水为主要取用水源^[3-5],已导致地下水资源严重超采,并引起了一系列生态环境问题,给经济社会的可持续发展、人民健康和生态环境造成了严重危害^[6-8]。准确掌握地下水储存量的变化特征与分布规律,对于解决地下水资源不合理开发利用带来的生态环境问题和优化区域水资源配置具有重要意义。

传统的地下水监测方法主要依靠钻井监测^[9-10],然而在地形起伏明显、监测点难以布设的大范围丘陵山区,钻孔网络往往稀疏且观测记录间断^[11],难以全面反映地下水储存量的时空演变规律^[12-13]。与传统监测方法相比,卫星遥感产品弥补了地面监测钻井的局限,可实现近全球范围持续监测。其中,美国国家航空航天局(NASA)主导发射的重力恢复与气候实验(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)卫星在这一领域表现优异,展示出优越的时空连续性及准确性^[14-16],被广泛用于地下水储量监测中,在国外多个水资源紧张或生态敏感区域取得了一定进展^[17-19]。在我国,GRACE 卫星数据也被应用于黄河流域、海河平原和西北干旱区等多个典型区域的地下水监测研究^[20-25]。

江西省的地形地貌具有独特性,以丘陵、山地为主,约占全省面积的 70%。相较于平原区,丘陵山区因地质构造与地形条件复杂,其地下水补给来源和排泄路径多样且不稳定,地下水资源分布呈现显著的异质性^[26-27],导致地下水储量、补给机制、时空变化特征等方面的调查与评估难度更大。当前对山丘区地下水的认识主要基于分散的钻孔观测和局部水文调查资料,缺乏高时空分辨率、区域尺度的地下水储量变化评估。尤其是在降雨季节性分布不均^[28]与生态需水不断增长^[29]的背景下,山丘区地下水的时空演变机制尚未得到系统阐明,将成为制约区域水资源精细化管理的重要瓶颈。

基于此,本文通过结合卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)构建 CNN-LSTM 深度学习模型对 GRACE 卫星数据进行降尺度重建,在此基础上,利用 STL(seasonal-trend decomposition using LOESS)提取趋势项,并结合 Mann-Kendall 检验与 Theil-Sen 斜率估算法,定量识别地下水储存量的变化趋势及显著性。从数据重建到趋势识别,形成了较为完整的地下水时空演变分析框架,以期对山丘区地下水资源演变规律的认识与精细化管理提供方法支持。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

江西省位于中国东南部(24°29'N~30°04'N, 113°34'E~118°28'E),全省总面积约 16.69 万 km²,有赣江、抚河、信江、饶河和修水五大水系,整体呈现“三面环山、中部丘陵、北部平原”的格局,北部拥有中国最大淡水湖鄱阳湖(图 1)。江西省地处亚热带季风气候区中部,水热条件南北差异大,全省多年平均降水量为 1400~1900 mm,常住人口 4500 万人。《江西省水资源公报(2023)》显示,全省地下水资源量 341.37 亿 m³,其中山丘区占 89.5%。江西省地下水资源主要赋存于松散层孔隙含水层、基岩裂隙含水层以及局部分布的岩溶含水层中。在河流冲积平原及低山丘陵谷地,多发育第四系松散层,形成孔隙型潜水和浅层承压水,埋深较浅,受大气降水补给显著。而在广大的中低山丘陵谷区,由于基岩出露广泛,地下水主要赋存于风化壳裂隙带及构造裂隙发育带中,属裂隙型地下水,埋深变化大,水量、水质空间分异性强,补给以大气降水入渗为主,具有季节性与脉动性特点。部分地区分布有碳酸盐岩地层,地下水以岩溶水形式存在,呈带状不连续分布,流速较快、补给迅速。

1.2 研究数据

1.2.1 GRACE/GRACE-FO 卫星数据

本文使用的 GRACE 陆地水储量异常(terrestrial water storage anomaly, TWSA)数据由得克萨斯大学空间

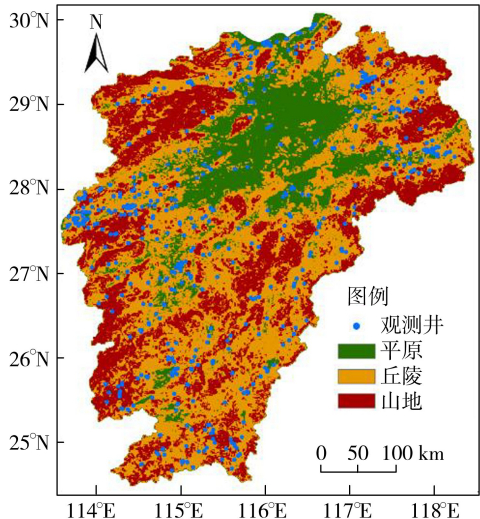


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

研究中心 (CSR)、戈达德太空飞行中心 (GSFC) 和美国喷气推进实验室 (JPL) 发布,数据覆盖时间为 2003—2023 年,空间分辨率包括 0.25°、0.5°2 种。对不同来源数据进行均值化处理,最终获得空间分辨率为 0.5° 的 TWSA 数据集。采用质量块方法反演重力场,相较于传统的球谐函数方法,该方法能有效降低海陆边界处的信号泄漏误差,提升陆地水储量变化的反演精度^[30]。由于卫星接续等问题,GRACE 卫星与其后继 GRACE-FO 卫星之间存在数据中断,本文采用奇异谱分析 (singular spectrum analysis, SSA)^[31] 对缺测期进行时间序列插值处理,以保障遥感数据的连续性和可用性。

1.2.2 全球陆面数据同化系统数据

为构建地下水储存量异常 (groundwater storage anomaly, GWSA) 数据的原始序列,引入了由 NASA 和美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 联合开发的全球陆面数据同化系统 (global land data assimilation system, GLDAS) 数据。GLDAS 将多源卫星遥感数据与地面观测数据相融合,结合一维陆面过程模型和数据同化技术,对地表的水分状态和能量通量进行高时空分辨率的再分析,被广泛应用于水文气候相关研究。本文使用了戈达德地球科学数据和信息服务中心提供的 GLDAS 的月尺度产品 GLDAS NOAH025_M.2.1,其空间分辨率为 0.25°,包括雪水当量、植被冠层水储量和土壤水分等多种陆面水体组分数据。可用于构建 TWSA 中的非地下水部分,从而通过质量平衡法反推出 GWSA。具体计算公式为

$$G = T - (S + C + M)$$

(1)

式中: G 为地下水储存量异常值; T 为陆地水储量异常值; S 为雪水当量异常值; C 为冠层截留水异常值; M 为土壤水储存量异常值。

1.2.3 GRACE 卫星数据空间降尺度的驱动变量

为构建 GRACE 卫星数据的空间降尺度模型,引入多个具有水文物理意义和时空代表性的气候与地形变量作为驱动因子。所用气象与水文数据主要来自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的 ERA5-Land 再分析产品,空间分辨率为 0.1°。植被状况则采用 MODIS 提供的归一化植被指数 (NDVI) 表征,数据来自 MOD13C2 V6 产品,空间分辨率为 0.05°。地形因子由 NASA 阿拉斯加卫星设施发布的数字高程模型 (DEM) 提供,空间分辨率为 12.5 m,用于反映地势起伏对水分迁移与积聚过程的潜在调控作用。在降尺度后的精度评价中,使用了来自江西省自然资源厅和江西省水利厅的地下水位实测数据。详细的数据信息见表 1。

表 1 数据信息
Table 1 Data information

数据类型	版本	分辨率	来源
GRACE/GRACE FO	CSR Mascons RL06	0.25°	https://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html
	JPL Mascons RL06	0.5°	https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE
	GSFC Mascons RL06	0.5°	https://earth.gsfc.nasa.gov/geo/data/grace-mascons
GLDAS	GLDAS NOAH025_M.2.1	0.25°	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_NOAH025_M_2.1
ERA5-Land	ERA5-Land monthly averaged data	0.1°	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview
NDVI	MOD13C2 V6	0.05°	https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod13c2-006
DEM	ALOS PALSAR	12.5 m	https://vertex.daac.asf.alaska.edu
地下水位	实测数据		江西省自然资源厅、江西省水利厅

2 研究方法

2.1 GRACE 卫星数据降尺度

分辨率的高低是影响遥感产品应用效果的重要因素,GRACE 卫星数据的低分辨率严重制约着其在中小尺度场景的应用^[32]。为实现对 GRACE 地下水储存量数据的高分辨率重建,采用 CNN-LSTM 深度学习模型,将原始图像数据分辨率提升至 0.1°。选用 CNN-LSTM 深度学习模型进行降尺度,可以充分发挥 CNN 在空间特征提取方面的优势,以及 LSTM 对时序动态的有效捕捉能力。CNN 用于从输入数据中提取空间特征,可以将多变量时间序列输入矩阵与多个卷积滤波器进行卷积运算,以识别空间模式。CNN 输出的空间特征图经过重塑后输入到 LSTM 层,以捕获时序依赖关系。LSTM 通过记忆单元以及输入门、遗忘门和输出门机制处理序列数据,能有效解决传统循环神经网络中的梯度消失与爆炸问题。

本文模型整体结构包括三部分:空间特征提取、时序建模与预测输出。输入层由粗分辨率 GRACE 图像

及多个驱动变量构成,经两层卷积操作提取局部空间特征,卷积后接最大池化层以压缩维度并保留主导信息,形成结构紧凑的时序特征向量。提取后的多时刻特征序列被输入至两层堆叠的 LSTM 网络中,用于捕捉时间上的动态演变规律与长期依赖关系。为防止模型过拟合,在各主要层间均加入 Dropout 层,丢弃率设为 0.5。LSTM 的输出经展平处理后送入全连接层,输出对应于高分辨率网格的预测结果。

2.2 STL 分解与季节幅度测算

为提取 GWSA 时间序列中的长期趋势与季节性波动,采用 STL^[33] 进行分解。STL 是一种将时间序列拆分为三部分的非参数方法,具有较强的鲁棒性与解释性,特别适用于具有非平稳季节性和潜在异常值的数据。STL 通过滑动时间窗口对时间项和季节项使用局部加权回归进行拟合,通过迭代加权实现鲁棒性。相较于傅里叶变换、经验模态分解等方法,STL 不依赖固定周期函数,能更灵活适应水文数据中常见的季节漂移、不规则波动及异常观测值。本文以 GRACE 提供的月尺度 GWSA 数据为输入,设定周期参数 period 为 12,对应年周期,并启用鲁棒分解选项以提升异常值处理能力。STL 分解结果可揭示研究区地下水储存量序列的 3 个主要特征:长期趋势波动情况、季节性响应稳定性及幅度以及残差项所代表的系统对突发扰动的敏感性。

STL 的基本分解形式为

$$Y_t = T_t + S_t + R_t \tag{2}$$

式中: Y_t 为 t 时刻 GWSA 原始序列值; T_t 为 t 时刻趋势项值; S_t 为 t 时刻季节项值; R_t 为 t 时刻残差项值。

2.3 Theil-Sen 趋势分析

Theil-Sen 斜率估算法是一种稳健的非参数趋势分析方法,由 Theil^[34] 提出,Sen^[35] 对其进行了完善。该方法不需要数据满足正态分布,并且对异常值或极端值的影响具有很强的抵抗力。Theil-Sen 斜率估算法首先通过对所有数据点组合两两配对,计算每对数据之间的斜率值,随后从所有斜率值中选取中位数作为最终趋势的估计斜率;而截距则通常取所有数据点的截距值的中位数或使用该斜率与数据点的中位数坐标计算得到。这种方法无需预设特定模型形式,能有效降低极端数据带来的偏差,尤其适用于观测数据的长期变化趋势评估,在数据异常、缺失或分布未知的情形下仍能保持较高的准确性和稳定性。

Theil-Sen 斜率估算法的计算公式为

$$S_R = \text{Median}\left(\frac{W_j - W_i}{j - i}\right) \tag{3}$$

式中: S_R 为数据对斜率的中值; W_i 、 W_j 分别为时刻 i 、 j 的江西省山丘区 GWSA 值。当 $S_R > 0$,表示 GWSA 呈增长趋势,反之呈减小趋势。

2.4 Mann-Kendall 显著性检验

Mann-Kendall 检验是一种常用的非参数统计检验方法,用于识别时间序列数据中的趋势性变化,由 Mann^[36] 提出,Kendall^[37] 进行了完善。与传统参数方法相比,Mann-Kendall 检验不要求数据服从特定的统计分布,并且能够有效处理数据中的异常值、缺失值以及非线性变化趋势。Mann-Kendall 检验因其对数据分布要求低,稳健性强,广泛应用于检测数据长期趋势变化。

3 结果与分析

3.1 TWSA 降尺度效果

采用分层随机抽样方法将江西省栅格化数据划分为训练集(70%)与验证集(30%)。在验证了降尺度模型后,将选定的预测因子的高分辨率数据作为输入,预测可用的高分辨率降尺度 TWSA 数据。交叉验证表明,该降尺度模型在江西省域尺度表现出良好的降尺度性能(图 2):相关系数为 0.94、均方根误差(RMSE)为 41.3 mm、决定系数(R^2)为 0.85,表明模型能准确捕捉 TWSA 的空间分布模式,可解释 85% 以上的 TWSA 时空变异。

由图 3 可知,经过 CNN-LSTM 深度学习模型降尺度前后 TWSA 的空间变化特征保持了较好的一致性,降

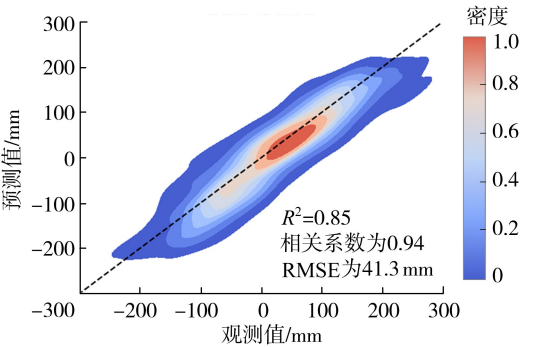


图 2 降尺度模型拟合情况

Fig. 2 Fitting performance of downscaling model

尺度后的数据能够更好地捕捉到精细的空间特征,研究区东北部和南部的高低值细节均得到准确刻画。利用现场地下水位监测结果与降尺度后的 GWSA 结果进一步验证了降尺度的有效性,67.6%的监测站点的相关系数超过 0.40(图 4)。总的来说,利用 CNN-LSTM 深度学习模型能够进行 GRACE 深度学习降尺度并成功捕捉 TWSA 时空变化的模式和趋势,提供了与原始观测相符的可靠预测结果。

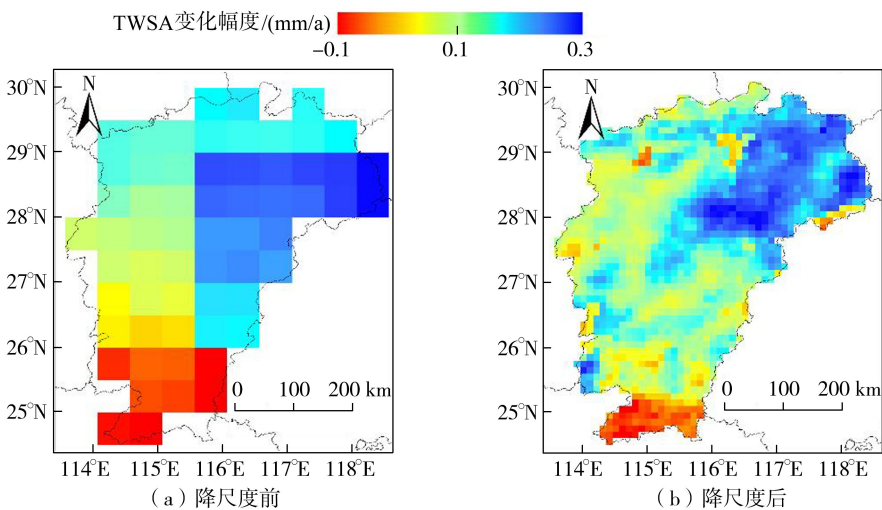


图 3 TWSA 变化幅度的空间分布情况
Fig. 3 Spatial distribution of magnitude of TWSA changes

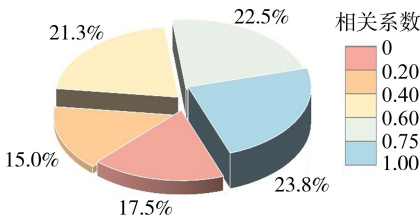


图 4 实测地下水位异常(GWLA)与降尺度后 GWSA 的相关系数
Fig. 4 Correlation coefficients of observed GWLA and downscaled GWSA

3.2 地下水储存量长期趋势

图 5 为江西省山丘区 2003—2022 年 GWSA 的逐年空间分布,负值表示储存量亏损,正值代表储存量积累。总体来看,山丘区 GWSA 在研究期间表现出显著的年际波动与明显的南北分异特征,整体经历了多次亏损与恢复循环。2003—2011 年,GWSA 多数年份以负值为主,且西南部湘赣交界处的亏损点长期存在,提示该阶段地下水补给不足或开采强度偏高,尤其在 2004 年和 2009 年,区域南部出现-85 mm 以上的亏损。2012 年后,区域 GWSA 快速转正,2012 年和 2013 年开始呈现广泛增储格局。2015 年进一步表现为显著正值,多数区域 GWSA 达 60 mm 以上,显示该年储存量回升明显。2016 年为整个时段内 GWSA 峰值,正值广泛覆盖大部分区域,局部超过 125 mm。此后 GWSA 开始逐步下降,2017—2019 年逐步转为中性或弱负值;2020 年与 2021 年南部再次出现-85 mm 以上亏损区,说明区域地下水系统面临再度衰减的压力。

从空间分布来看,南部在多数减储年份均呈现最深的负值,是地下水收支最为脆弱的区域,可能与地形起伏大、包气带浅薄及集中开采有关。中北部则易在增储年形成 90 mm 左右的增储中心,表明该区以渗漏补给为主、对降水等短期补给响应敏感。长期来看,虽然 2016 年的极端增储一度抵消了早期亏损,但 2020 年后的连续负值使得区域地下水量重新进入减储状态,需重点关注未来持续性补给能力与人类取水压力的平衡。

由图 6 可知,整体上 GWSA 具有明显的季节周期性:枯水期亏损、丰水期回升。1—4 月整体以负值为主,尤其是 1 月、2 月,GWSA 负值区域几乎覆盖全区,表明此时地下水补给不足,储存量处于低谷;该时段气温较低、降水稀少、蒸发弱但补给极少,地下水以自然消耗和人类取水带来的亏损为主。进入 5 月,中部开始出现零值以上的区域,表明局部区域受到降水入渗补给过程影响,地下水储存量有所回升。夏季为全年增储最显著阶段,特别是 6 月和 7 月 GWSA 达到全年峰值,大部分区域显示正值,局部区域超过 160 mm,说明夏

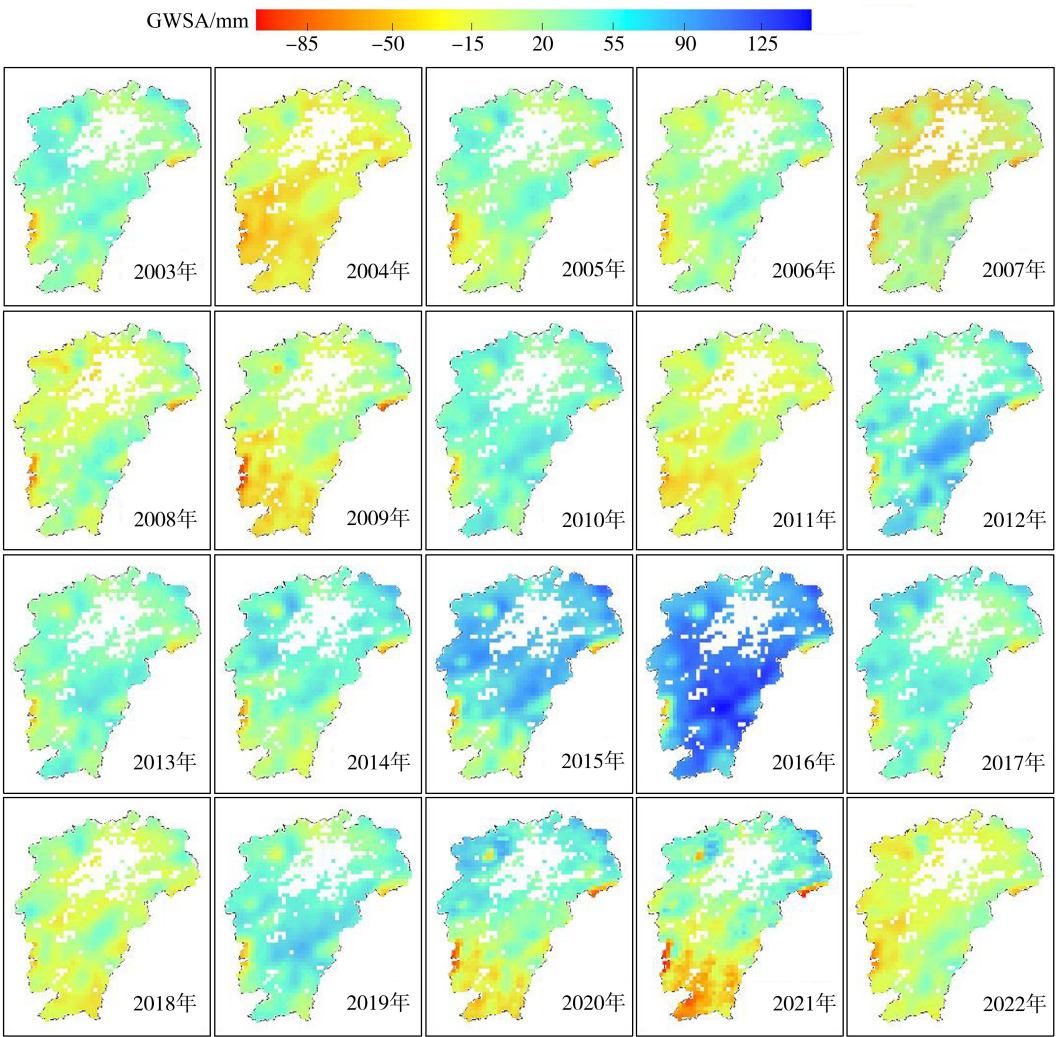


图 5 2003—2022 年 GWSA 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of GWSA from 2003 to 2022

季主汛期降水对地下水系统有强烈的正向驱动作用。这一期间地下水补给迅速增强,成为调节全年储存量的关键窗口期。9 月仍维持一定的正值,但幅度开始减弱。进入 10 月后,正值区域迅速缩小,中北部重新出现-80 mm 以上的亏损区,表明地下水系统已转入消耗阶段,且补给作用基本结束。从空间分布来看,正负值的年内演替具有明显的一致性。在减储期,负值广泛分布于全域,而在增储期,正值首先出现在北部,并逐渐向南扩展。

图 7 揭示了 2003—2023 年江西山丘区 GWSA 的长期变化格局及其对季节信号剔除的敏感性。在原始月尺度序列(图 7(a))中,江西中部与东北部呈现出明显的正趋势,Theil-Sen 斜率多介于 0.05~0.10 mm/月,局部网格超过 0.10 mm/月,显示 2003—2023 年该区域地下水总体处于缓慢回升状态;西南及赣南局部则出现-0.05 mm/月以上的负斜率,个别网格低于-0.10 mm/月,反映赣南深丘低山交错带地下水的持续衰减。由于季节周期和短时波动混杂在序列中,Mann-Kendall 显著点数量极其有限,零星分布于赣东北与赣西南强正趋势带边缘,显著单元不足总网格的 5%。

季节分量对 GWSA 趋势检验的干扰不容忽视,未剔除季节性时弱趋势极易被误判为不显著。将同一时序经 STL 分解后(图 7(b))趋势项的空间对比度显著增强:东北—中东带大面积跃升至 0.10 mm/月以上,正趋势连片分布更为连续;但赣南的负趋势也被放大,形成多块-0.10 mm/月以上的显著衰减核心。去除了季节成分后,Mann-Kendall 检验的显著格点剧增并呈面状分布,正趋势区与负趋势区内部大多达到 $p<0.05$ 的显著水平,表明原本被季节噪声掩盖的长期信号得以凸显。相比原始数据,显著网格占比由不足 5% 提升至 70% 以上,其中高度正向显著单元主要分布在抚河—信江一带及鄱阳湖东缘丘陵区,负向显著单元则集中于

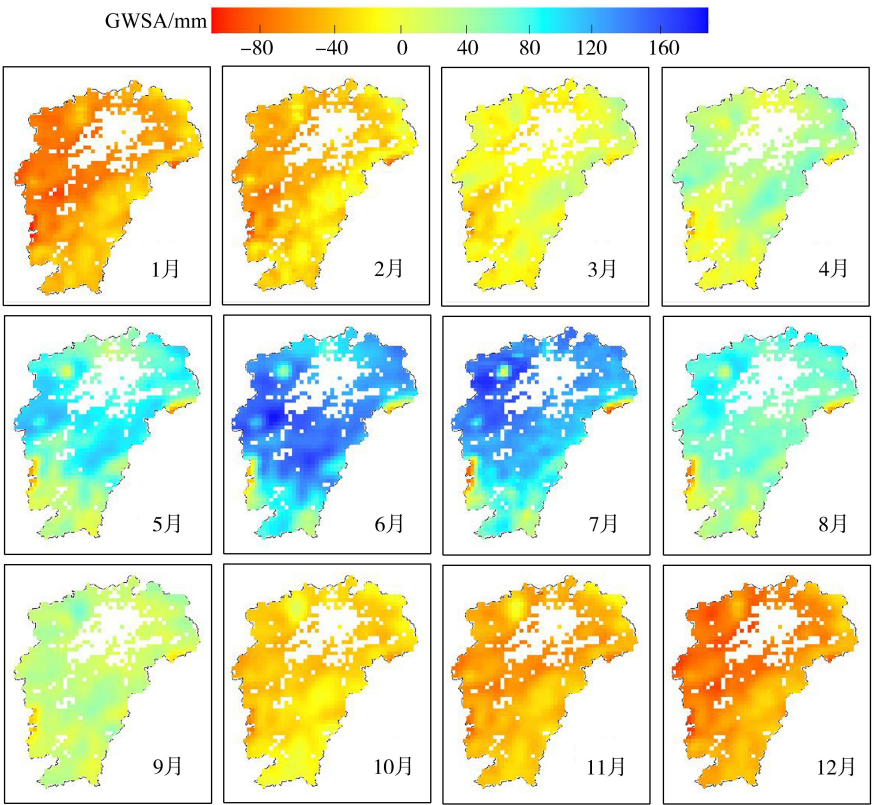


图 6 GWSA 年内空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of GWSA within the year

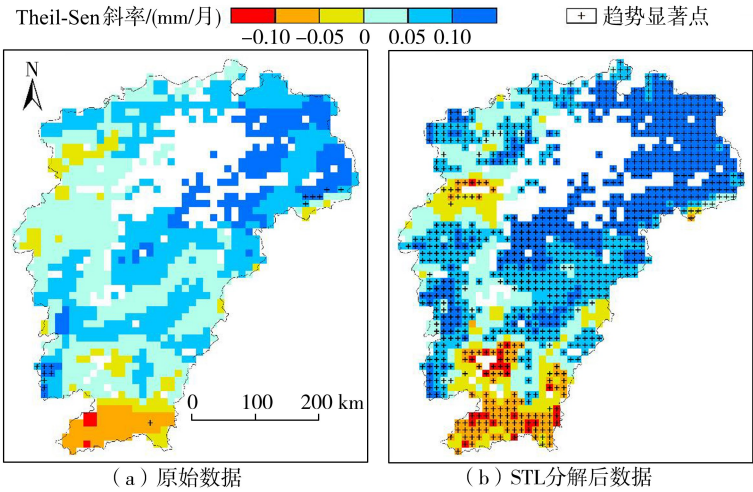


图 7 2003—2023 年 GWSA 变化趋势

Fig. 7 Variation trend of GWSA from 2003 to 2023

赣南的赣州市境内,同时西部赣江源西侧也出现一个负值中心。总的来看,经 STL 分解后的结果更能反映江西省山丘区地下水储存量东北—中部一带连续恢复,南部持续亏损的长期演变,提示应重点关注赣南衰减区的补给管理与用水配置,同时巩固鄱阳湖流域地下水增长带来的生态调蓄成果。

3.3 季节循环幅度与年际变异

对江西省 2003—2023 年逐月 GWSA 序列进行 STL 分解后,识别出显著的年内周期变化、阶段性长期趋势,以及增强的高频异常波动(图 8)。季节项解释了 78.3% 的总变异度,表明地下水储存量变化主要受降水、蒸发等季节性因素主导;趋势项贡献 7.9%,揭示了地下水系统存在缓慢的长期波动过程;残差项占 13.8%,反映了系统对突发气候事件和人类活动扰动的响应。与原始序列相比,STL 分解提取的趋势项展现出更加清晰和显著的上升趋势。

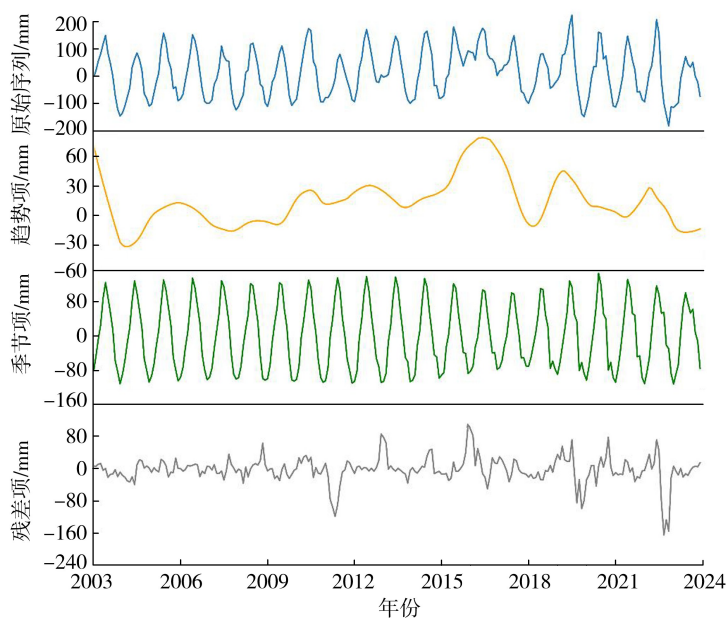


图 8 2003—2023 年江西省山丘区 GWSA 经 STL 分解的序列

Fig. 8 GWSA sequence after STL in hilly area of Jiangxi Province (2003—2023)

长期趋势项整体呈“先降—后升—再缓降”三阶段格局。2003 年初趋势项高达 70 mm 左右,但在年末迅速跌至负值,反映了 2003 年江西省遭遇的历史罕见极端干旱事件^[38],持续的干旱导致了严重的地下水亏损。2004—2013 年趋势曲线持续低幅震荡,显示该时期可能存在降水偏少与用水需求增加之间的博弈。2015 年后趋势项陡增,并在 2016 年以约 5 mm/月的回升速率攀至 75 mm 左右的峰值,之后持续衰减,在 2022 年再次回落至接近 0,显示近期恢复势头减弱。总体上看,长期趋势的振荡表明自然补给与人类耗水在 2003—2023 年交替占优,地下水系统尚未达到稳态。2014—2016 年的显著回升可能与丰水年、高密度水利工程调蓄相关,而 2017—2019 年的快速下滑则提示在气候变干及早情集中年份下可能存在的地下水开采压力。2003—2023 年 GWSA 的净增幅并不显著,且 2020—2023 年显露出再度走低的迹象,表明区域地下水系统仍处于易亏临界状态。

季节项在整个观测期内振幅相对稳定,年际季节振幅均值为 226.5 mm,振幅在 174.3~249.7 mm 之间波动,表明区域地下水系统具有明显的季节性响应。高值主要出现在每年 6—7 月,平均 126 mm,与华东地区梅雨及台风集中期一致,低值主要出现在 12 月至次年 1 月,平均 -95 mm,对应枯水期蒸散发和农业用水的集中消耗,体现江西省山丘区在典型亚热带季风控制下雨季补给、旱季消耗的循环过程。2017 年前后振幅略有收敛,随后再度恢复,表明季节性补给及消耗强度与降雨年际波动同步放大。总的来看,尽管在个别年份存在一定的振幅扩大或收缩现象,但整体上未出现持续性的衰减趋势,季节波动结构在整个序列中保持较为一致,说明地下水系统的季节调节能力相对稳定,未受到显著干扰。

残差项捕捉了短期扰动对系统的影响,即短时异常。在多数年份中,残差波动幅度较小,表明 STL 分解有效地将主要趋势与季节信息分离。其均值近 0,但标准差从 2010 年前的约 20 mm 上升至近年的 30~40 mm,反映系统对突发事件的响应幅度显著增强。正向脉冲集中于 2013 年、2016 年,负向脉冲出现于 2011 年、2020 年和 2022 年。这类脉冲往往反映该时期流域发生的极端水文事件,例如 2022—2023 年的负向脉冲即反映了当年夏季鄱阳湖流域所经历的 1951 年以来最严重干旱事件^[39]。残差振幅在 2015 年后整体放大,尤其是 2019 年开始频繁出现不平稳波动。提示近年来极端水文事件频率及幅度同步增加,将成为未来一个时期流域水资源调控的不确定源。

4 讨 论

从趋势分析结果看,江西省南部赣州市大部处于减储趋势,GWSA 低值聚集,是区域地下水亏损热点。究其原因,赣南红层盆地的基岩裂隙风化壳含水介质蓄水系数低、渗透性差,地下水主要以浅层风化裂隙水或层间裂隙水零散赋存,难以形成大规模储层^[40-41]。中国地质调查局在赣州市兴国县开展的找水工程也表

明,赣南一带普遍存在“季节型、水质型、工程型”复合缺水问题,地下水赋存呈明显“贫水性”,需依赖构造裂隙或古河道等局部蓄水构造“夹缝取水”^[42]。2000 年以来,赣州作为江西省南部最大的城市,城市化水平保持上升趋势^[43],伴随城市人口增长,工农产业迅速扩张。以脐橙为代表的经济作物种植产业蓬勃发展,使其成为脐橙种植面积世界第一的产区^[44]。同时,作为全国重要的离子型稀土资源产地^[45-46],其稀土产业规模也在不断扩张。城市化进程叠加农业灌溉和工业用水的快速增长,必然推动用水总量持续上升^[47]。地下水作为补充水源的开发程度随之不断加深,而山丘区地表水调配体系相对薄弱,依赖地下水供水便会形成区域性地下水超采,造成储存量亏损,赣州市也因此成为江西省主要超采区之一^[48-51]。

GRACE 卫星数据的月际变化易受到异常值、测量误差和数据处理产生的不确定性的严重影响^[52]。STL 能够同时分离出其长期趋势、周期性季节波动与残差扰动,提供了一种简单准确的趋势提取方式,在对径流^[53]、降水^[54]、湖泊水位^[55]等水文要素的时间序列分解上得到了国内外学者的广泛认可。本文采用 STL 分解对 GWSA 逐月时间序列进行趋势项提取,避免了季节成分对趋势项的干扰,从而使提取的趋势序列更真实地反映水文序列长期变化轨迹^[56]。经过 STL 处理后,对比发现多数栅格增减趋势与原始序列保持一致,却极大提升了分解后序列趋势分析结果的显著比例。趋势幅度与空间连贯性的双双提高,显示 STL 分解在水文序列中能有效提取底层变异,使得统计结果更为准确可靠,再次展现出 STL 分解在水文序列分析中的优越性。

5 结 论

a. 深度学习模型实现了对 2003—2023 年 GRACE/GRACE-FO 水储存量数据的高分辨率重建,生成的月尺度数据集更清晰地揭示了江西山丘区地下水存在的空间格局,有效地解决了原始遥感数据分辨率不足带来的局限性,为中小流域尺度的地下水储存量研究提供了可靠的数据实现方案。

b. STL 分解显著提升了趋势识别的清晰度,揭示出 2003—2023 年江西省山丘区大部分地区地下水储存量呈上升趋势,但西部和南部存在集中亏损区,南部赣州市尤为显著,全省呈“东北—中部连续恢复,南部持续亏损,总体缓慢上升”的长期演变特征。

c. 江西省山丘区地下水储存量变化在 2003—2023 年呈现明显的季节性主导、阶段性趋势演变及高频异常增强三重特征,整体表现为季节性循环稳定、长期趋势振荡上升但恢复乏力,以及对极端气候事件和人为扰动的响应日益敏感,表明区域地下水系统尚未达到动态稳态,仍处于易亏的临界状态。

参考文献:

[1] KUANG Xingxing,LIU Junguo,SCANLON B R,et al. The changing nature of groundwater in the global water cycle[J]. Science, 2024,383(6686):eadf0630.

[2] 徐丽丽,束龙仓,李伟,等. 2000—2020 年中国地下水开采时空演变特征[J]. 水资源保护,2023,39(4):79-85. (XU Lili, SHU Longcang,LI Wei,et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):79-85. (in Chinese))

[3] 马静,刘红亮,栾清华,等. 基于水资源通用配置与模拟模型的邯郸市水资源优化配置[J]. 科学技术与工程,2023,23(9):3889-3903. (MA Jing,LIU Hongliang,LUAN Qinghua,et al. Optimal allocation of water resources in Handan based on general water allocation and simulation model[J]. Science Technology and Engineering,2023,23(9):3889-3903. (in Chinese))

[4] 凌敏华,陈万贺. 地下水资源对新疆经济社会支撑作用的定量评价[J]. 水资源保护,2021,37(2):49-54. (LING Minhua, CHEN Wanhe. Quantitative evaluation of groundwater resources supporting economy and society in Xinjiang[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):49-54. (in Chinese))

[5] 李圣品,李文鹏,殷秀兰,等. 全国地下水水质分布及变化特征[J]. 水文地质工程地质,2019,46(6):1-8. (LI Shengpin,LI Wenpeng,YIN Xiulan,et al. Distribution and evolution characteristics of national groundwater quality from 2013 to 2017[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2019,46(6):1-8. (in Chinese))

[6] 井森,张江江,刘瑾,等. 水位、水量、产量联控的华北平原地下水超采区节水灌溉多目标优化[J]. 水资源保护,2025,41(2):184-192. (JING Miao,ZHANG Jiangjiang,LIU Jin,et al. Multi-objective optimization of water-saving irrigation in groundwater over-exploitation area of the North China Plain under joint control of water level,water volume,and crop yield[J]. Water Resources Protection,2025,41(2):184-192. (in Chinese))

[7] 徐腾,王以鹏,叶逾,等. 地下水超采管控体系及水量-水位双控体系研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(4):27-35. (XU

- Teng, WANG Yipeng, YE Yu, et al. Research progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(4): 27-35. (in Chinese))
- [8] 卢毅, 宋泽卓, 刘瑾, 等. 基于 DFOS 的通州湾地区地面沉降监测与变形分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2): 81-88. (LU Yi, SONG Zezhuo, LIU Jin, et al. Land subsidence monitoring and deformation analysis of Tongzhou Bay area based on DFOS[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2): 81-88. (in Chinese))
- [9] 王振兴, 李向全, 侯新伟, 等. 太行山前严重缺水地区地下水勘查实践: 以灵寿县丘陵区为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(3): 127-132. (WANG Zhenxing, LI Xiangquan, HOU Xinwei, et al. Groundwater exploration in serious water shortage area of Taihang piedmont: a case study in the hilly area of Lingshou County[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(3): 127-132. (in Chinese))
- [10] 杜卫兵, 赵寿刚, 杨浩明, 等. 引江济淮河南段输水河道周边地下水位变化规律研究[J]. *人民黄河*, 2025, 47(3): 84-90. (DU Weibing, ZHAO Shougang, YANG Haoming, et al. Study on the variation law of groundwater level around the water conveyance channel caused by Henan section of the Yangtze-to-Huaihe River diversion project[J]. *Yellow River*, 2025, 47(3): 84-90. (in Chinese))
- [11] READING L, GURIEFF L B, CATANIA S. Sustainable groundwater management through collaborative local scale monitoring[J]. *Water Resources Management*, 2025, 39(2): 725-740.
- [12] AKHTAR F, NAWAZ R A, HAFEEZ M, et al. Evaluation of GRACE derived groundwater storage changes in different agro-ecological zones of the Indus basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127369.
- [13] 任永强, 潘云, 宫辉力. 海河流域地下水储量空间变化趋势分析[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(2): 89-98. (REN Yongqiang, PAN Yun, GONG Huili. Haihe Basin groundwater reserves space trend analysis[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 35(2): 89-98. (in Chinese))
- [14] RATEB A, SCANLON B R, POOL D R, et al. Comparison of groundwater storage changes from GRACE satellites with monitoring and modeling of major U. S. aquifers[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(12): e2020WR027556.
- [15] 王芊予, 栗晓玲, 褚江东, 等. 基于 GRACE 数据重建的黄河流域实际蒸散发及其时空演变特征分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(5): 112-121. (WANG Qianyu, SU Xiaoling, CHU Jiangdong, et al. Analysis of actual evapotranspiration and its spatio-temporal evolution characteristics in the Yellow River Basin based on GRACE data reconstruction[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(5): 112-121. (in Chinese))
- [16] 褚江东, 栗晓玲, 吴海江, 等. 2002—2021 年中国陆地水储量及其组分变化分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 170-178. (CHU Jiangdong, SU Xiaoling, WU Haijiang, et al. Analysis of terrestrial water storage and its component changes in China from 2002 to 2021[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 170-178. (in Chinese))
- [17] ALI S, WANG Qiumei, LIU Dong, et al. Estimation of spatio-temporal groundwater storage variations in the Lower Transboundary Indus Basin using GRACE satellite[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127315.
- [18] AMIRI V, ALI S, SOHRABI N. Estimating the spatio-temporal assessment of GRACE/GRACE-FO derived groundwater storage depletion and validation with in-situ water quality data (Yazd Province, central Iran) [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129416.
- [19] THOMAS B F, FAMIGLIETTI J S, LANDERER F W, et al. GRACE Groundwater Drought Index: evaluation of California central valley groundwater drought[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198: 384-392.
- [20] 康小虎, 李琳, 孙超, 等. 基于 GRACE 与 GLDAS 数据的黄河流域甘肃段地下水可持续性研究[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(2): 196-206. (KANG Xiaohu, LI Lin, SUN Chao, et al. Evaluation of groundwater sustainability in the Yellow River Basin of Gansu Province using GRACE and GLDAS data products[J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(2): 196-206. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] 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. (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. (in Chinese))
- [23] 阮永健, 吴秀芹. 基于 GRACE 和 GLDAS 的西北干旱区地下水资源量可持续性评价[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(3): 787-800. (RUAN Yongjian, WU Xiuqin. Evaluation of groundwater resource sustainability based on GRACE and GLDAS in arid region of Northwest China[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(3): 787-800. (in Chinese))
- [24] 王晟, 田琳, 李峰平, 等. 松花江流域陆地水储量时空变异特征与影响因素探究[J]. *中国农村水利水电*, 2024(10): 47-58.

(WANG Sheng,TIAN Lin,LI Fengping,et al. Characteristics and influencing factors of spatial-temporal variation of land water reserves in Songhua River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower,2024(10):47-58. (in Chinese))

[25] 刘芳芳,黄耀欢,姚华荣,等. 基于 GRACE 的京津冀地下水储量变化时空演变格局[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):874-882. (LIU Fangfang,HUANG Yaohuan,YAO Huarong,et al. Spatiotemporal evolution pattern of groundwater storage changes in Beijing-Tianjin-Hebei region based on GRACE[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(5):874-882. (in Chinese))

[26] YANG Weifei,XIAO Changlai,ZHANG Zhihao,et al. Estimation of the groundwater balance of a mountainous basin based on long-term streamflow data;a case study of the Tao'er River Basin,China[J]. Environmental Earth Sciences,2021,80(20):689.

[27] 肖旭芳,张双龙,郭雯,等. 西南喀斯特地区地表水和地下水环境污染特征与研究展望[J]. 地球与环境,2023,51(5):564-573. (XIAO Xufang,ZHANG Shuanglong, GUO Wen, et al. Environmental pollution characteristics of surface water and groundwater in Southwest China and its research prospects[J]. Earth and Environment,2023,51(5):564-573. (in Chinese))

[28] 张奇. 湖泊流域水文学研究现状与挑战[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(7):1559-1573. (ZHANG Qi. Hydrology of lake catchment;research status and challenges[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2021,30(7):1559-1573. (in Chinese))

[29] 刘玉婷,许继军,刘思敏,等. 长江上游地区生态需水量变化研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(8):120-131. (LIU Yuting,XU Jijun,LIU Simin,et al. Study on change of eco-water demand in region of upper Yangtze River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2021,52(8):120-131. (in Chinese))

[30] 张岚,孙文科. 重力卫星 GRACE Mascon 产品的应用研究进展与展望[J]. 地球与行星物理论评,2022,53(1):35-52. (ZHANG Lan,SUN Wenke. Progress and prospect of GRACE Mascon product and its application[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics,2022,53(1):35-52. (in Chinese))

[31] VAUTARD R,YIOU P,GHIL M. Singular-spectrum analysis;a toolkit for short,noisy chaotic signals[J]. Physica D:Nonlinear Phenomena,1992,58(1/2/3/4):95-126.

[32] KALU I,NDEHEDEHE C E,FERREIRA V G,et al. Statistical downscaling of GRACE terrestrial water storage changes based on the Australian Water Outlook model[J]. Scientific Reports,2024,14(1):10113.

[33] CLEVELAND R B,CLEVELAND W S,MCRAE J E,et al. STL;a seasonal-trend decomposition procedure based on loess[J]. Journal of Official Statistics,1990,6(1):3-33.

[34] THEIL H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis[J]. Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Series A,1950,53:386-392.

[35] 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.

[36] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica,1945,13(3):245-259.

[37] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London:Griffin,1948.

[38] 尹洁,张超美,张传江. 江西 2003 年特大干旱气候分析[J]. 江西气象科技,2005,28(2):19-22. (YIN Jie,ZHANG Chaomei,ZHANG Chuanjiang. Climatic feature analysis about extraordinary drought in Jiangxi in 2003[J]. Jiangxi Meteorological Science & Technology,2005,28(2):19-22. (in Chinese))

[39] 雷声,石莎,屈艳萍,等. 2022 年鄱阳湖流域特大干旱特征及未来应对启示[J]. 水利学报,2023,54(3):333-346. (LEI Sheng,SHI Sha,QU Yanping,et al. Characteristics of extreme drought in the Poyang Lake Basin in 2022 and implications for future response[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(3):333-346. (in Chinese))

[40] 李志勇,黎义勇,黄长生,等. 赣江流域红层盆地典型构造样式与地下水动力学模式[J]. 地质通报,2020,39(12):1873-1882. (LI Zhiyong,LI Yiyong,HUANG Changsheng,et al. Typical structural geology and groundwater dynamics in red beds basins of Ganjiang River Basin,South China[J]. Geological Bulletin of China,2020,39(12):1873-1882. (in Chinese))

[41] MÉZQUITA GONZÁLEZ J A,COMTE J C,LEGCHENKO A,et al. Quantification of groundwater storage heterogeneity in weathered/fractured basement rock aquifers using electrical resistivity tomography;sensitivity and uncertainty associated with petrophysical modelling[J]. Journal of Hydrology,2021,593:125637.

[42] 王新峰,宋绵,龚磊,等. 赣南缺水区地下水赋存特征及典型蓄水构造模式解析:以兴国县为例[J]. 地球学报,2018,39(5):573-579. (WANG Xinfeng,SONG Mian,GONG Lei,et al. An analysis of characteristics of groundwater occurrence and typical model of water-storage structures in water-deficient areas of southern Jiangxi Province;a case study of Xingguo County [J]. Acta Geoscientica Sinica,2018,39(5):573-579. (in Chinese))

[43] 冯兴华,钟业喜,吴巍,等. 新型城镇化背景下江西省城市人口增长与土地扩张协调性研究[J]. 地理与地理信息科学,

2016,32(3):81-88. (FENG Xinghua,ZHONG Yexi,WU Wei,et al. Coordination between urban land expansion and population growth under the background of the new urbanization in Jiangxi Province[J]. Geography and Geo-Information Science,2016,32(3):81-88. (in Chinese))

[44] 熊德斌,欧阳洪妹,李佳欢. 政府有为、市场有效与特色农业发展机制:赣南脐橙产业升级历史变迁考察[J]. 上海大学学报(社会科学版), 2021, 38(5): 79-92. (XIONG Debin, OUYANG Hongshu, LI Jiahuan. Government facilitation, market efficiency and development mechanism of characteristic agriculture: a historical investigation of the industrial upgrading of southern Jiangxi navel oranges [J]. Journal of Shanghai University (Social Sciences Edition), 2021, 38(5): 79-92. (in Chinese))

[45] 江磊,马光正,刘凡,等. 资源型支柱产业对城市化的影响:以赣州稀土产业为例[J]. 环境科学研究,2022,35(10):2236-2243. (JIANG Lei,MA Guangzheng,LIU Fan,et al. Influence of resource-based pillar industries on urbanization:a case study of Ganzhou rare earth industry[J]. Research of Environmental Sciences,2022,35(10):2236-2243. (in Chinese))

[46] 赖丹,吴一丁. 南方离子型稀土产业发展现状、问题及出路:以赣州为例[J]. 稀土,2019,40(4):140-148. (LAI Dan,WU Yiding. Development status,problems and solutions of southern ion-type rare earth industry:taking Ganzhou as an example[J]. Chinese Rare Earths,2019,40(4):140-148. (in Chinese))

[47] LIU Menghang, FANG Chuanglin, BAI Yu. Exploring the relationship between water-energy consumption and urbanization in China:a urban-rural transformation perspective[J]. Environmental Impact Assessment Review,2025,112:107834.

[48] 李洪任,雷声,汪国斌. 江西省地下水开发利用红线管理控制指标研究[J]. 人民长江,2014,45(21):83-86. (LI Hongren, LEI Sheng,WANG Guobin. Study on red line management and control indicators of groundwater exploitation in Jiangxi Province [J]. Yangtze River,2014,45(21):83-86. (in Chinese))

[49] 刘昕,肖华,王栋. 长江流域地下水利用现状及超采区治理对策[J]. 长江科学院院报,2024,41(3):16-21. (LIU Xin,XIAO Hua,WANG Dong. Groundwater utilization and countermeasures of groundwater overexploitation in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2024,41(3):16-21. (in Chinese))

[50] 曹先树,王浩,吴晨晨,等. 淮河流域及山东半岛地下水超采原因与管理对策[J]. 水利水电科技进展,2024,44(5):65-73. (CAO Xianshu,WANG Hao,WU Chenchen,et al. Causes and management measures of groundwater overexploitation in Huaihe River Basin and Shandong Peninsula[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(5):65-73. (in Chinese))

[51] CHEN Xinyu, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Quantifying natural recharge characteristics of shallow aquifers in groundwater overexploitation zone of North China[J]. Water Science and Engineering,2021,14(3),184-192.

[52] BONIN J A, BETTADPUR S, TAPLEY B D. High-frequency signal and noise estimates of CSR GRACE RL04[J]. Journal of Geodesy,2012,86(12):1165-1177.

[53] 赵轶琳,刘文丰,李政,等. 基于 STL 时序分解的天然径流演变规律与影响因素分析[J]. 水利学报,2025,56(2):216-226. (ZHAO Yilin,LIU Wenfeng,LI Zheng,et al. Analyses of the evolution and influencing factors of natural runoff in China based on STL decomposition[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2025,56(2):216-226. (in Chinese))

[54] HE Renfei,ZHANG Limao,CHEW A W Z. Modeling and predicting rainfall time series using seasonal-trend decomposition and machine learning[J]. Knowledge-Based Systems,2022,251:109125.

[55] WANG F, WANG X, ZHAO Y, et al. Long-term periodic structure and seasonal-trend decomposition of water level in Lake Baiyangdian,northern China[J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2014,11(2):327-338.

[56] HUMPHREY V, GUDMUNDSSON L, SENEVIRATNE S I. Assessing global water storage variability from GRACE: trends, seasonal cycle,subseasonal anomalies and extremes[J]. Surveys in Geophysics,2016,37(2):357-395.

(收稿日期:2025 - 07 - 01 编辑:刘晓艳)