引文格式:崔立鲁,卢宇恒,钟波,等.利用HUST-Grace2024模型评估珠江流域陆地水储量的可持续性[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(6):1166-1181.DOI:10.13203/j.whugis20250025

Citation: CUI Lilu, LU Yuheng, ZHONG Bo, et al. Assessing the Sustainability of Terrestrial Water Storage in the Pearl River Basin Using HUST-Grace2024 Model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(6):1166-1181.DOI:10.13203/j.whugis20250025

利用HUST-Grace2024模型评估珠江流域陆地水储量的可持续性

崔立鲁[1] 卢宇恒[1] 钟 波[2,3] 李 鱼[1] 郭昊洋[1] 孟嘉骋[1]

1 成都大学建筑与土木工程学院,四川 成都,610106

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

3 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:陆地水储量的可持续性评估及其影响因素分析对于水资源合理利用和社会经济发展等具有重要意义。利用华中科技大学最新发布的HUST-Grace2024模型反演了2003—2023年珠江流域陆地水储量变化(terrestrial water storage change, TWSC)的时空特征,并与国际上5种常用的重力恢复与气候实验及其后续卫星模型结果进行比较。采用HUST-Grace2024模型计算的可持续性指数(sustainability index, SI)详细评估珠江流域及其子流域的水资源可持续状况,同时结合气象和水文数据定量分析了降水、蒸散发、径流和归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)对TWSC的影响。结果显示,利用HUST-Grace2024与5种常用的国际模型计算得到的TWSC高度一致,其精度与国际时变重力场模型联合解算组织的模型结果相当。研究时段内,珠江流域的TWSC以4.7 mm/a的速度增长,其中南北盘江流域和红柳江流域的增长速度显著高于其他子流域。整体而言,珠江流域水资源处于轻度不可持续状态(SI=0.36),其中郁江流域和南北盘江流域的SI分别为最高0.39和最低0.34。此外,NDVI对珠江流域TWSC的影响最大,其次为径流、降水和蒸散发。虽然这4种影响因素在所有子流域的贡献率排序是一致的,但其数值上存在显著的差异。结果表明,HUST-Grace2024模型能够有效监测和评估珠江流域TWSC的时空演化过程及其可持续性,可为该地区水资源管理和科学决策等提供参考。

关键词:珠江流域;GRACE/GRACE-FO;HUST-Grace2024;陆地水储量变化;可持续性

中图分类号:P228;P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-07-25

DOI:10.13203/j.whugis20250025 **文章编号**:1671-8860(2026)06-1166-16

Assessing the Sustainability of Terrestrial Water Storage in the Pearl River Basin Using HUST-Grace2024 Model

CUI Lilu[1] *LU Yuheng*[1] *ZHONG Bo*[2,3] *LI Yu*[1] *GUO Haoyang*[1] *MENG Jiacheng*[1]

1 School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: As a core indicator for water resource management, the sustainability assessment of terrestrial water storage is crucial for addressing climate change and ensuring regional water security. **Methods**: We employed the latest HUST-Grace2024 model developed by Huazhong University of Science and Technology to analyze the spatiotemporal characteristics of terrestrial water storage change (TWSC) across the Pearl River Basin (PRB) from 2003 to 2023. The results were compared with those derived from five internationally recognized gravity recovery and climate experiment (GRACE) and GRACE Follow-On (GRACE-FO) models. Using the sustainability index (SI) derived from HUST-Grace2024, we as-

基金项目:国家自然科学基金(42374002);极地环境监测与公共治理教育部重点实验室(武汉大学)开放基金(202509)。

第一作者:崔立鲁,博士,副教授,研究方向为重力水文学。lilucui@126.com

通信作者:钟波,博士,教授。bzhong@sgg.whu.edu.cn

sessed the water resource sustainability in the PRB and its sub-basins. We also quantitatively evaluated the impact of precipitation, evapotranspiration, runoff, and the normalized difference vegetation index (NDVI) on terrestrial water storage using meteorological and hydrological data. **Results:** Comparison results indicate that the TWSC calculated by HUST-Grace2024 is highly consistent with that calculated by five commonly used international models. Its accuracy is comparable to the results of the international combination service for time-variable gravity field model, indicating that the TWSC of the PRB inverted by this model has higher reliability and accuracy. During the study period, terrestrial water storage in the PRB increased at an average rate of 4.7 mm/a, with significantly faster growth in the Nanpan and Hongliu River sub-basins compared to others. Overall, although the water resources in the PRB are in a mildly unsustainable state (SI=0.36), with the Yujiang River Basin and Nanpan-Beipan River Basin having the highest (0.39) and lowest (0.34) SI values respectively, their sustainability is continuously improving. Among the influencing factors, NDVI has the greatest impact on the TWSC in the PRB, followed by runoff, precipitation and evapotranspiration. This indicates that vegetation coverage plays a significant role in regional soil and water conservation. Although the ranking of the contribution rates of these four influencing factors is consistent across all sub-basins, there are significant differences in their numerical values. **Conclusions:** These results demonstrate that the HUST-Grace2024 model effectively monitors and evaluates the spatiotemporal evolution and sustainability of TWSC in the PRB, providing valuable insights for regional water resource management and informed decision-making.

Key words: PRB; GRACE/GRACE-FO; HUST-Grace2024; TWSC; sustainability

水是人类赖以生存和发展的重要自然资源。随着人口爆发式增长和社会经济的快速发展，人类对水资源的需求日益增长。同时，由于人类的频繁活动，全球气候呈现变暖趋势，极端水旱灾害频发，这极大地改变了区域水资源时空分布，加剧水资源的供需矛盾[1]。珠江是中国七大江河之一，其流域面积仅次于长江和黄河，多年平均水资源总量为2 501亿 m^3，位居全国第二[2]。它在中国国民经济发展中占据举足轻重的地位，是生态安全、水资源供给、航运事业和经济增长的重要支撑，其中珠江三角洲是中国三大经济圈之一，对全国经济社会发展具有举足轻重的战略地位。因此，十分有必要对珠江流域的水资源可持续性进行有效的评估。

陆地水储量包括地表水、地下水和土壤水，是陆地上可供人类使用的水资源，因此其变化特征直接反映了水资源的时空分布[3]。但是，在监测陆地水储量变化(terrestrial water storage change, TWSC)方面，传统监测手段存在成本高、难度大、无法直接获取等问题。而重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)/其后续卫星(GRACE Follow-On, GRACE-FO)通过探测时变重力信号能够获取完整的TWSC信息，在区域TWSC监测中发挥了重要作用[4-5]。许多学者利用该技术开展了对长江流域[6]、海河流域[7]、黄河流域[8]和黑河流域[9]等TWSC的时空演化及其影响因素分析。关于珠江流域，有学者将GRACE/GRACE-FO卫星数据用于反演该区域TWSC，并分析了其长期趋势变化和季节变化特征[10]，并详细探讨上述变化特征的影响因素[11]。此外，通过GRACE数据构建的标准化水储量赤字干旱指数和洪水潜力指数分别表征了珠江流域发生的干旱和洪涝事件[12-13]，分析了极端气候事件和人类活动，尤其是水库蓄水对干旱事件的影响[14]。

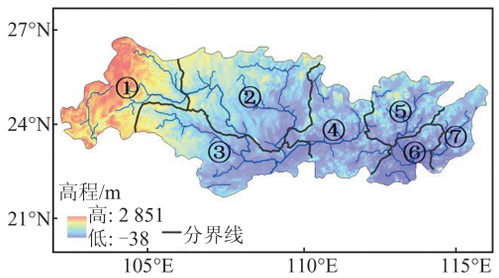
虽然上述基于GRACE/GRACE-FO数据的珠江流域水文研究取得了一定的进展，但与长江流域和黄河流域的应用成果相比仍显得较为薄弱。尤其是随着改革开放事业的蓬勃发展，珠江流域已经成为中国重要的工农业生产基地和改革开发前沿阵地，水资源的可持续性不仅关乎着地区社会经济的稳定发展，还涉及生态环境的保护。因此，有必要对珠江流域TWSC进行更加深入的研究。同时，随着GRACE/GRACE-FO数据在全球水文领域的广泛应用，其在水文研究中的独特作用被全球科学家所关注。为了进一步提升其数据精度，除了美国德克萨斯大学空间研究中心(Center of Space Research, CSR)、德国地学研究中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)和喷气动力实验室(Jet Propulsion Labpratory, JPL)3大官方机构发布了模型产品以外，国内外多家机构也陆续发布了自主研

制的GRACE/GRACE-FO模型,例如,国际时变重力场模型联合解算组织(International Combination Service for Time-Variable Gravity Field, COST-G)发布的基于多个机构时变重力场模型的联合解算模型[15],格拉茨技术大学大地测量研究所(Institute of Geodesy at Graz Univeristy of Technology, ITSG)发布的ITSG-Grace2018模型和华中科技大学发布的HUST-Grace2024模型[16]。

基于此,本文首先利用HUST-Grace2024模型和CSR RL06、GFZ RL06、JPL RL06、ITSG-Grace2018、COST-G模型分别估算2003—2023年珠江流域的TWSC,并对上述6种模型产品的不确定性和变化特征进行比较。其次,利用HUST-Grace2024模型研究珠江流域及其7大子流域的TWSC时空演化特征。然后,再利用基于TWSC构建的可持续性指数(sustainability index, SI)从多个维度评估珠江流域及其子流域陆地水储量资源可持续性的时空变化特征。最后,精确量化气象水文和植被因素对珠江流域TWSC的贡献。

1 研究区域

珠江流域位于中国南部,横跨滇、黔、桂、粤等10个省级行政区域,流域总面积为65.43 km^2,仅次于长江流域和黄河流域。地形主要以山地、丘陵为主,呈现出西高东低的分布特点。珠江主要由西江、北江、东江和珠江三角洲诸河组成,全长2 320 km,其年径流量为5 697多亿m^3,水资源十分丰富,但是存在着严重的时空分布不均,且极端水旱灾害频发[14]。珠江流域地处亚热带,气候温和多雨,属于典型的季风气候,降水量呈现出显著的东多西少的空间分布特点,且年内分布严重不均,地区分布差异较大。珠江流域主要分为7大子流域,如图1中①~⑦所示。



注:①南北盘江流域;②红柳江流域;③郁江流域;④西江流域;⑤北江流域;⑥珠江三角洲;⑦东江流域。

图1 珠江流域地形图

Fig. 1 Topographic Map of the Pearl River Basin

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

2.1.1 GRACE/GRACE-FO数据

选取6种GRACE/GRACE-FO球谐系数模型(CSR RL06、GFZ RL06、JPL RL06、COST-G、ITSG-Grace2018和HUST-Grace2024)用于反演珠江流域TWSC,时间跨度为2003-01—2023-12,上述球谐系数模型阶数均截断至60阶。同时,选用文献[17]提供的GRID_CSR_GRACE_REC数据集对GRACE与GRACE-FO之间的数据空白(2017-07—2018-05)进行填补,数据的空间分辨率为1°。

2.1.2 全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)

GLDAS是由美国国家航空航天局戈达德航天飞行中心联合美国国家海洋和大气管理局国家环境预报中心利用数据同化技术,将地面观测和卫星遥感数据相结合驱动地表模型开发而成的。本文采用GLDAS Noah 2.1版,空间分辨率为1°,用于生成珠江流域TWSC,即土壤水、积雪水和植被水三者之和,并将其用于基于GRACE/GRACE-FO TWSC数据的尺度恢复和与HUST-Grace2024模型结果进行比较。

2.1.3 降水数据

降水数据来源于全球降水测量计划(global precipitation measurement, GPM)。该计划是一项由美国国家航空航天局和日本航空航天局联合实施的国际卫星任务,该卫星每3 h对全球范围内的降水情况进行监测,其时空分辨率分别为0.5 h和10 km,为气象、水文、灾害预测等领域的研究提供了重要的数据支持。本文选取的降水数据为GPM多卫星降水联合反演最终版本v07,其时间跨度与GRACE/GRACE-FO模型一致,且将其空间分辨率重采样至1°。

2.1.4 蒸散发(evapotranspiration, ET)数据

ET数据来源于全球土地蒸发阿姆斯特丹模型4.1a版本,其可提供关于土地蒸发的不同组成部分的结果,包括实际蒸发量、蒸腾作用、土壤蒸发、潜在蒸发等。除此以外,还有根区土壤水分、表层土壤水分和感热通量,其空间分辨率为0.25°[18]。该模型最大限度地恢复了当前卫星气候和环境变量观测中包含的蒸发信息,因此在气

候研究、水资源管理、生态环境管理等领域具有十分广泛的影响。本文从该模型中提取的ET数据时间跨度与GRACE/GRACE-FO模型保持一致，且将其空间分辨率重采样至1°。

2.1.5　归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）

NDVI是反映植被生长状态和覆盖率的重要指标。本文采用的NDVI数据是从美国国家航空航天局提供的MOD13C2版本6.1数据产品中提取的，其空间分辨率为0.05°。该数据产品是中分辨率成像光谱仪（moderate-resolution imaging spectroradiometer，MODIS）的众多产品之一，包含两种与植被相关的指数，分别为NDVI和增强植被指数，其被广泛地应用于气候变化研究、生态系统监测、农业评估等领域[19]。本文从该模型中提取的蒸散发数据时间跨度与GRACE/GRACE-FO模型保持一致，且将其空间分辨率重采样至1°。

2.2　研究方法

2.2.1　TWSC反演

为了确保比较的公平性和可靠性，本文对6种GRACE/GRACE-FO球谐系数模型的处理方式完全一致。首先，对球谐系数进行预处理，将除2017-07—2018-05之外的缺失月份数据采用三次样条插值算法进行填补；然后，用优化解算的高精度一阶球谐系数对原始数据中的一阶项进行替换[20]；再将原始数据中的C_{20}项替换为采用卫星激光测月得到的高精度C_{20}项数据[21]；随后扣除相应的多年球谐系数平均值，得到球谐系数变化量；分别采用300 km的高斯滤波和P4M6去相关滤波对球谐系数进行平滑处理和消除球谐系数之间相关性所导致的南北条带误差。

利用经过上述预处理得到的球谐系数变化量可以计算出地球上任意位置的TWSC值，可以用等效水高的形式表达：

$$\Delta h(\theta,\lambda)=\frac{a\rho_{\text{ave}}}{3\rho_w}\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{l}\bar{P}(\cos\theta)\frac{2l+1}{1+k_l}\left(\Delta\hat{C}_{lm}\cos(m\lambda)+\Delta\hat{S}_{lm}\sin(m\lambda)\right) \tag{1}$$

式中，Δh为等效水高；θ、λ分别为地心余纬、经度；a为地球平均半径，其值为6 371 km；ρ_{ave}为地球平均密度，其值为5 517 kg/m^3；ρ_w为水密度，其值为1 000 kg/m^3；l、m为球谐系数的阶次数；$\bar{P}(\cos\theta)$为完全规格化的勒让德函数；k_l为勒夫数；$\Delta\hat{C}$、$\Delta\hat{S}$为经过预处理后的球谐系数变化量。根据式（1）得到1°×1°格网的TWSC数据后，利用基于GLDAS模型水文数据的单一尺度因子来恢复阶数截断和滤波处理后丢失的研究区域TWSC真实信号[22]。

2.2.2　广义三角帽法

采用广义三角帽法对6种GRACE/GRACE-FO球谐系数模型反演得到的TWSC结果进行不确定性评估。广义三角帽法无需先验真实信息即可对3组及以上观测数据的不确定性进行估计，克服了难以获得真实的TWSC观测数据的难题[23]。该方法已经广泛应用于GRACE时变重力场模型的评估[24-25]，其具体原理和方法可参见文献[26]。

2.2.3　评价指标

采用相关系数r、纳什系数（Nash-Sutcliffe efficiency coefficient，NSE）、均方根误差（root mean square error，RMSE）和一致相关系数（Lin's concordance correlation coefficient，LCCC）评估HUST-Grace2024模型结果与其他5种模型结果的差异。上述4种评估指标的计算式分别为[27]：

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

$$E_{\text{NSE}}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{3}$$

$$E_{\text{RMSE}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}{n}} \tag{4}$$

$$E_{\text{LCCC}}=\frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2+\sigma_y^2+(\bar{x}-\bar{y})^2} \tag{5}$$

式中，x为HUST-Grace2024模型得到的TWSC；y为其他5种模型得到的TWSC；$\bar{x}$、$\bar{y}$分别表示x、y序列的平均值；σ_x、σ_y和σ_{xy}分别表示x、y的方差和协方差；n表示x和y序列的观测值个数。

2.2.4　TWSC的相关指数

本文通过估算TWSC的可靠性指数（reliability index，RELI）、恢复性指数（restorative index，RESI）、脆弱性指数（vulerability index，VULI）和SI来评估珠江流域及其子流域的陆地水资源可持续性，计算式分别为[28-29]：

$$L_{\text{RELI}}=\frac{N_{\text{TWSC}>0}}{N} \tag{6}$$

$$L_{\text{RESI}}=\frac{N_{\text{TWSC}>0\to\text{TWSC}<0}}{N_{\text{TWSC}<0}} \tag{7}$$

$$L_{\mathrm{VULI}}=\frac{N_{\mathrm{TWSC}<0}}{N} \tag{8}$$

$$L_{\mathrm{SI}}=\left[L_{\mathrm{RELI}}\times L_{\mathrm{RESI}}\times\left(1-L_{\mathrm{VULI}}\right)\right]^{1/3} \tag{9}$$

式中,N、$N_{\mathrm{TWSC}>0}$、$N_{\mathrm{TWSC}>0\to\mathrm{TWSC}<0}$和$N_{\mathrm{TWSC}<0}$分别为TWSC的数据总数、TWSC大于0的数据总数、TWSC大于0变为小于0的总数和TWSC小于0的数据总数,其中SI值的范围及其对应含义参照表1[29-30]。

表1 SI值的范围和含义

Table 1 SI Scope and Significance

SI范围	含义
[0,0.2]	极不可持续
(0.2,0.3]	严重不可持续
(0.3,0.5]	轻度不可持续
(0.5,0.75]	中度可持续
(0.75,1]	高度可持续

2.2.5 贡献率

本文基于主成分分析法采用贡献率量化各因素对珠江流域TWSC的影响程度,假设有p个影响因素,则计算贡献率的步骤如下[31-32]:

1)标准化。对各个影响因素变量序列进行标准化处理。

2)构建协方差矩阵。将标准化以后的影响因素变量组成数据矩阵,计算出该矩阵的协方差矩阵。

3)计算协方差矩阵的特征值和特征向量。特征值为$\lambda_i(i=1,2,\cdots,p)$,对应的特征值向量分别为:

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}a_{11}\\a_{21}\\\vdots\\a_{p1}\end{bmatrix},\boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}a_{12}\\a_{22}\\\vdots\\a_{p2}\end{bmatrix},\cdots,\boldsymbol{A}_p=\begin{bmatrix}a_{1p}\\a_{2p}\\\vdots\\a_{pp}\end{bmatrix} \tag{10}$$

式中,$\boldsymbol{A}_i$为特征值λ_i对应的特征向量;a_{ij}为第i个元素在第j个主成分表达式中的权重系数。

4)计算各主成分的方差贡献率和累计贡献率,计算式为:

$$R_i=\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^{p}\lambda_k} \tag{11}$$

$$R_i^A=\frac{\sum_{k=1}^{i}\lambda_i}{\sum_{k=1}^{p}\lambda_k} \tag{12}$$

式中,R_i和R_i^A分别为第i个主成分对方差的贡献率和累计贡献率。

5)选取累计贡献率大于80%的前m个主成分,第j个主成分$F_j(j=1,2,\cdots,m)$的计算式为:

$$F_j=a_{1j}s_1+a_{2j}s_2+\cdots+a_{pj}s_p \tag{13}$$

式中,s_i为第i个影响因素标准化后的序列值。

6)各个影响因素的贡献率R_k的计算式为:

$$R_k=\sum_{k=1}^{m}R_i\times\left|a_{ij}\right| \tag{14}$$

3 结果与分析

3.1 HUST-Grace2024模型的TWSC结果验证

图2为分别采用CSR RL06、JPL RL06、GFZ RL06、ITSG-Grace2018、COST-G和HUST-Grace2024模型反演的2003-01—2023-12珠江流域的TWSC时间序列。可以看出,6组时间序列几乎完全重合,它们在相同的时间点都具有一致的波峰或者波谷,其整体变化趋势符合较好。

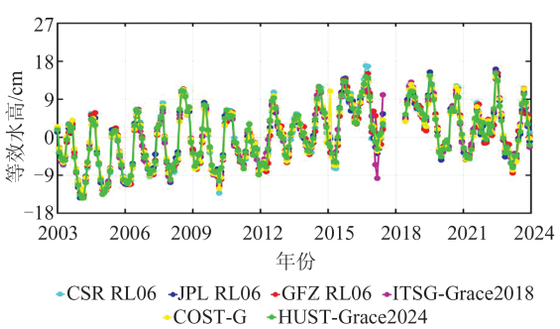


图2 2003—2023年珠江流域TWSC时间序列

Fig. 2 Time Series of TWSC in the Pearl River Basin During 2003—2023

为了评估基于HUST-Grace2024模型的TWSC精度,将其与其他5种模型得到的结果进行了比较,并绘制了散点图,如图3所示。可以看出,基于HUST-Grace2024模型的TWSC结果与其他5组结果都具有很高的一致性(r均大于等于0.98,NSE均大于等于0.96,LCCC均大于等于0.98),其中与JPL RL06模型的结果最为接近(r=0.99,NSE=0.98,RMSE=0.85 cm,LCCC=0.99),其次依次为ITSG-Grace2018、CSR RL06、COST-G,最后是GFZ RL06。

此外,本文分别计算了6组TWSC时间序列的长期趋势变化、周年振幅、周年相位、半周年振幅和半周年相位,如表2所示。可以看出,6组TWSC时间序列的5种指标都非常接近。其中,6组结果的长期趋势变化、周年振幅、周年相位、半周年振幅都为正。其中长期趋势变化的最大值为4.9 mm/a(ITSG-Grace2018),最小值

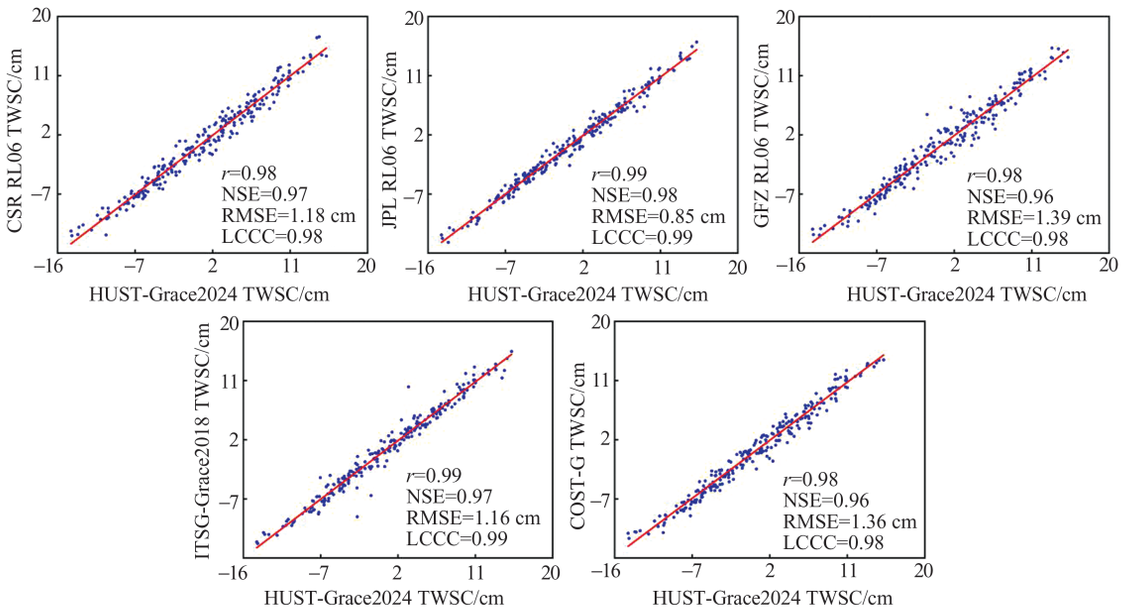


图3　HUST-Grace2024模型的TWSC与其他5种模型结果的比较

Fig. 3　Comparison of TWSC Based on HUST-Grace2024 Model with the Results from Other Five Models

表2　6种模型的TWSC时间序列分量

Table 2　Time Series Components of Six TWSC Models

模型	长期趋势变化/(mm·a^{-1})	周年振幅/cm	周年相位/rad	半周年振幅/cm	半周年相位/rad
CSR RL06	4.7	5.87	1.24	1.57	−1.27
GFZ RL06	4.6	5.65	1.10	1.34	−1.44
JPL RL06	4.8	5.66	1.29	1.56	−1.31
ITSG-Grace2018	4.9	5.77	1.11	1.36	−1.56
COST-G	4.7	5.68	1.25	1.54	−1.27
HUST-Grace2024	4.7	5.68	1.13	1.31	−1.51

为4.6 mm/a(GFZ RL06),HUST-Grace2024与CSR RL06和COST-G完全一致;周年振幅的最大值为5.87 cm(CSR RL06),最小值为5.65 cm(GFZ RL06),HUST-Grace2024与COST-G完全一致;周年相位的最大值为1.29 rad(JPL RL06),最小值为1.10 rad(GFZ RL06);半周年振幅的最大值为1.57 cm(CSR RL06),最小值为1.31 cm(HUST-Grace2024)。所有结果的半周年相位均为负值,其中最大值为−1.27 rad(CSR RL06和COST-G),最小值为−1.56 rad(ITSG-Grace2018)。比较图1、图2和表2,可以看出HUST-Grace2024模型反演得到的珠江流域TWSC与其他5组结果具有高度的一致性。

为了进一步比较6组TWSC结果的差异,本文利用广义三角帽法分别计算了它们的不确定性及其空间分布,分别如图4、图5所示。由图4可以看出,除了GFZ RL06部分不确定结果大于2 cm外,其余5组结果的不确定性都在1~2 cm之间。根据不确定性中位数结果,HUST-Grace2024模型的不确定性(1.51 cm)仅次于CSR RL06模型(1.30 cm)和COST-G模型(1.50 cm),优于其他3种模型结果(GFZ RL06为1.97 cm,JPL RL06为1.63 cm,ITSG-Grace2018为1.58 cm)。

由图5可以看出,HUST-Grace2024模型结果的不确定性呈现出两边大、中间小的分布特征。在①南北盘江流域,HUST-Grace2018模型结果的不确定性仅小于JPL RL06和GFZ RL06模型;而在②红柳江流域,其不确定性要明显小于JPL RL06、GFZ RL06和ITSG-Grace2018;在③郁江流域、④西江流域、⑤北江流域、⑥珠江三角洲和⑦东江流域,除CSR RL06模型外,HUST-Grace2024模型结果的不确定性均小于其他4种模型。因此,HUST-Grace2024模型的TWSC反演精度总体上仅次于CSR RL06和COST-G,但是在空间分布上,反演结果存在着显著的差异。在7个子流域中,HUST-Grace2018模型的不确定性均落后于CSR RL06模型,但只有在①南北

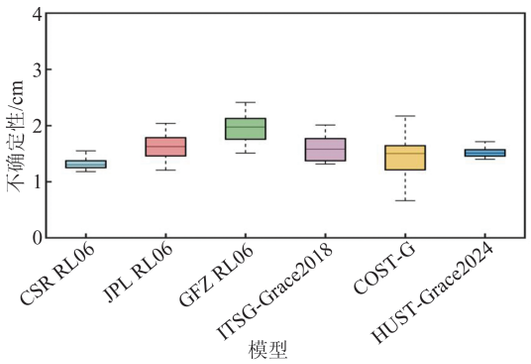


图4 6种GRACE/GRACE-FO模型反演TWSC的不确定性结果

Fig. 4 Uncertainty Results of TWSCs Based on the Six GRACE/GRACE-FO Models

盘江流域和②红柳江流域,COST-G模型的不确定性优于HUST-Grace2024模型。

图6比较了2003—2023年珠江流域HUST-Grace2024和GLDAS的TWSC结果。两组时间序列表现出相似的变化趋势,在相同的时间点上存在相似的波峰和波谷,且两者存在较强的相关性(0.78)。但是两组时间序列的振幅存在着一定的差异,这是因为GLDAS TWSC只包含土壤水、植被水和积雪水,但是陆地水的组成并不仅仅只有这3种组分,还有湖泊水、地下水以及与人类活动密切相关的水库蓄水等,而GRACE TWSC包括了所有的陆地水组分[33]。

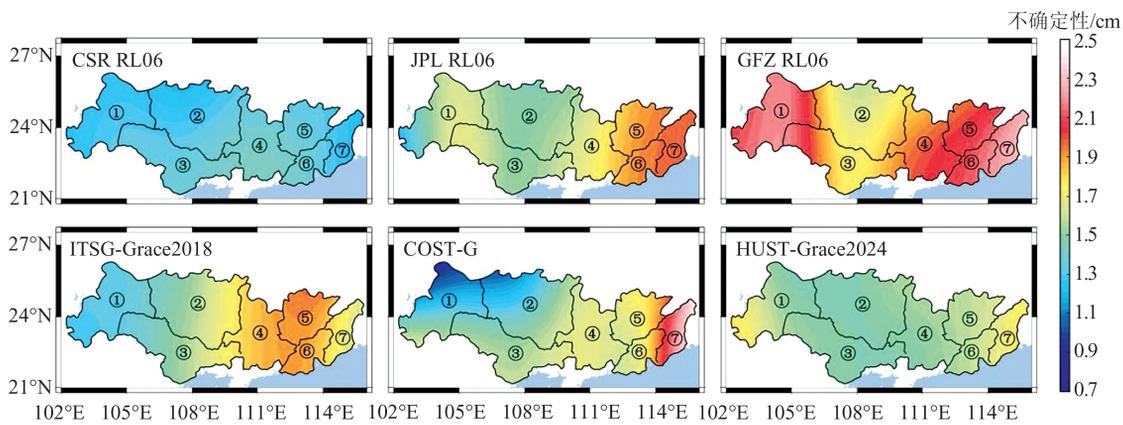
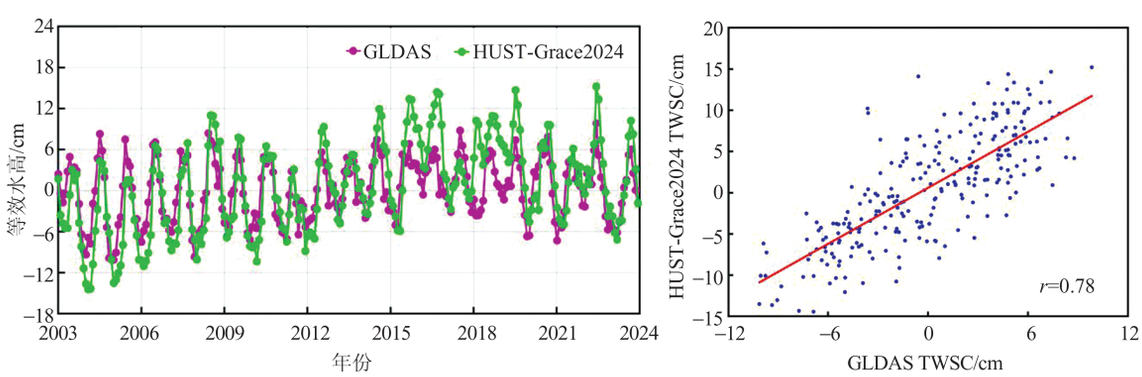


图5 6种GRACE/GRACE-FO模型反演TWSC的不确定性空间分布

Fig. 5 Spatial Distribution of Uncertainty of TWSCs Based on the Six GRACE/GRACE-FO Models



(a) 2003—2023年珠江流域TWSC时间序列 (b) 散点图

图6 HUST-Grace2024和GLDAS模型计算的2003—2023年珠江流域TWSC时间序列及其散点图

Fig. 6 Time Series of TWSC Derived from HUST-Grace2024 and GLDAS in the Pearl River Basin During 2003—2023 and Their Scatterplot

3.2 珠江流域陆地水储量可持续性分析

为了评估珠江流域水资源的可持续性,本文利用HUST-Grace2024 TWSC结果分别计算了珠江流域和7个子流域的可持续性各项指标(表3)及空间分布(图7)。由表3可以看出,珠江流域及其子流域均属于轻度不可持续(0.3<SI<0.4),其中③郁江流域的SI最高(0.38),而①南北盘江流域的SI最低(0.34),且各子流域间SI相差不大。

在空间分布上,珠江流域的SI整体上呈现出明显的两端低、中间高特征,但是东部比西部略高(图7);除①南北盘江流域属于轻度不可靠(0.48)外,珠江流域和其他6个子流域均属于中度可靠(0.52<RELI<0.55),且其不可靠性的空间

表 3　2003—2023年珠江流域及其子流域可持续相关指数

Table 3　Sustainable Coorelation Index for the Preal River Basin and Its Sub-Basins During 2003—2023

流域	SI	RELI	RESI	VULI
珠江流域	0.36	0.53	0.17	0.47
①南北盘江流域	0.34	0.48	0.17	0.52
②红柳江流域	0.38	0.53	0.19	0.47
③郁江流域	0.39	0.55	0.19	0.45
④西江流域	0.38	0.54	0.19	0.46
⑤北江流域	0.37	0.52	0.18	0.48
⑥珠江三角洲	0.38	0.54	0.19	0.46
⑦东江流域	0.38	0.52	0.20	0.48

分布与SI相同。从RESI结果来看，珠江流域整体都处于极不可恢复（0.17＜RESI＜0.20）。RESI呈现出两边低、中间高的空间分布特征，流域大部分区域都属于极不可恢复，但是②红柳江流域和③郁江流域的东部和④西江流域的西部区域则处于严重不可恢复。在脆弱性方面，南北盘江流域属于中度非脆弱（0.52），而珠江流域和其他6个子流域则属于轻度脆弱（0.45＜VULI＜0.48），同时VULI分布呈现出两端高、中间低且东部比西部略低的特征，这与SI、RELI和RESI刚好相反。

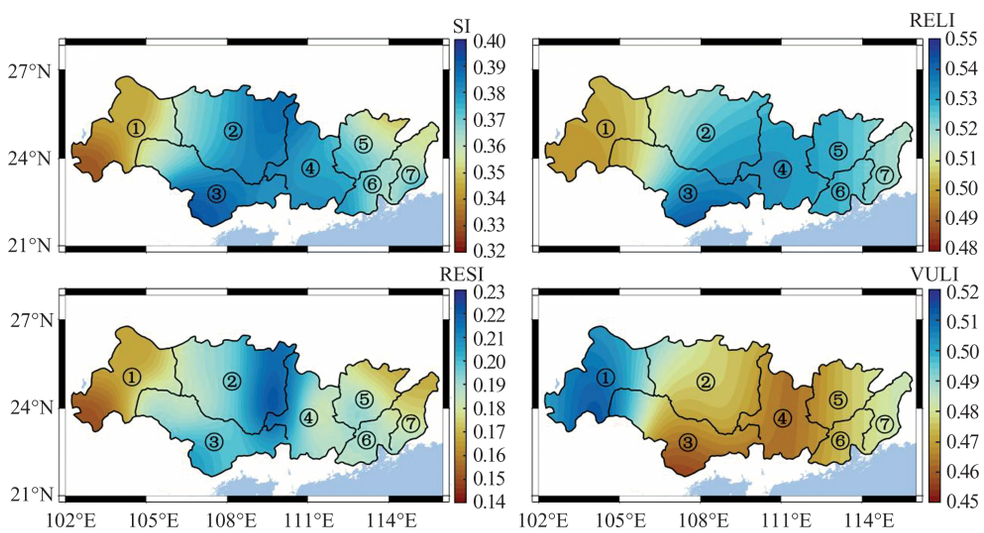


图 7　珠江流域TWSC可持续性各项指标空间分布

Fig. 7　Spatial Distribution of Sustainability-Related Indicators of TWSC in the Pearl River Basin

为了评估珠江流域水资源可持续性的动态变化，进一步计算了珠江流域可持续性年度变化（图8）和长期趋势变化（图9）。由图8可以看出，2003—2023年珠江流域可持续性明显分为两个阶段：第一阶段为2003—2010年，在该时间段可持续性变化较为稳定（0.19～0.35），基本处于严重不可持续，只有2004年和2005年为极不可持续，2008年为轻度不可持续；第二阶段为2012—2023年，该阶段可持续性变化较大，其中2019年为高度可持续，而2012—2016年、2018年和2020—2021年SI则为0，这是因为上述年份内TWSC从正值变为负值的次数为0，即RESI为0。恢复性则与可持续性具有相同的变化趋势。可靠性和脆弱性也与上述两者有相似的变化，即分为两个时间段：2003—2011年和2012—2023年。

在第一阶段，RELI均值为0.32，除了2011年为极不可靠（0.17），其余年份均为轻度不可靠。而VULI的均值为0.68，其中2008年和2011年分别为轻度脆弱和高度非脆弱，其余年份则均为中度非脆弱。第二阶段时，RELI均为0.68，大部分年份为中度可靠性，2016年和2018年为高度可靠，2023年则为轻度不可靠。而VULI均值为0.32，2016年、2018年和2019年为极脆弱，2023年为中度非脆弱，其余年份则为轻度脆弱。综上可知，前后两个阶段珠江流域水资源可持续性存在着显著的差异。尤其在2012年以后，SI和RESI出现了明显的大范围波动，RELI显著提升，而VULI则显著下降。而珠江流域7大子流域水资源可持续性各项指标均为相似的变化趋势。

由图9可以看出，珠江流域SI、RELI和RESI在整体上呈现出上升趋势，VULI则呈现了下降趋势。SI、RELI和RESI在空间分布上表现为两端高、中间低，且西部比东部略高的特点，其中①南北盘江流域的长期变化趋势最高，④西江流域最低；而VULI的表现则刚好相反。这说明虽然珠江流域水资源的可持续性正在持续改善，但其脆弱性却越来越差。

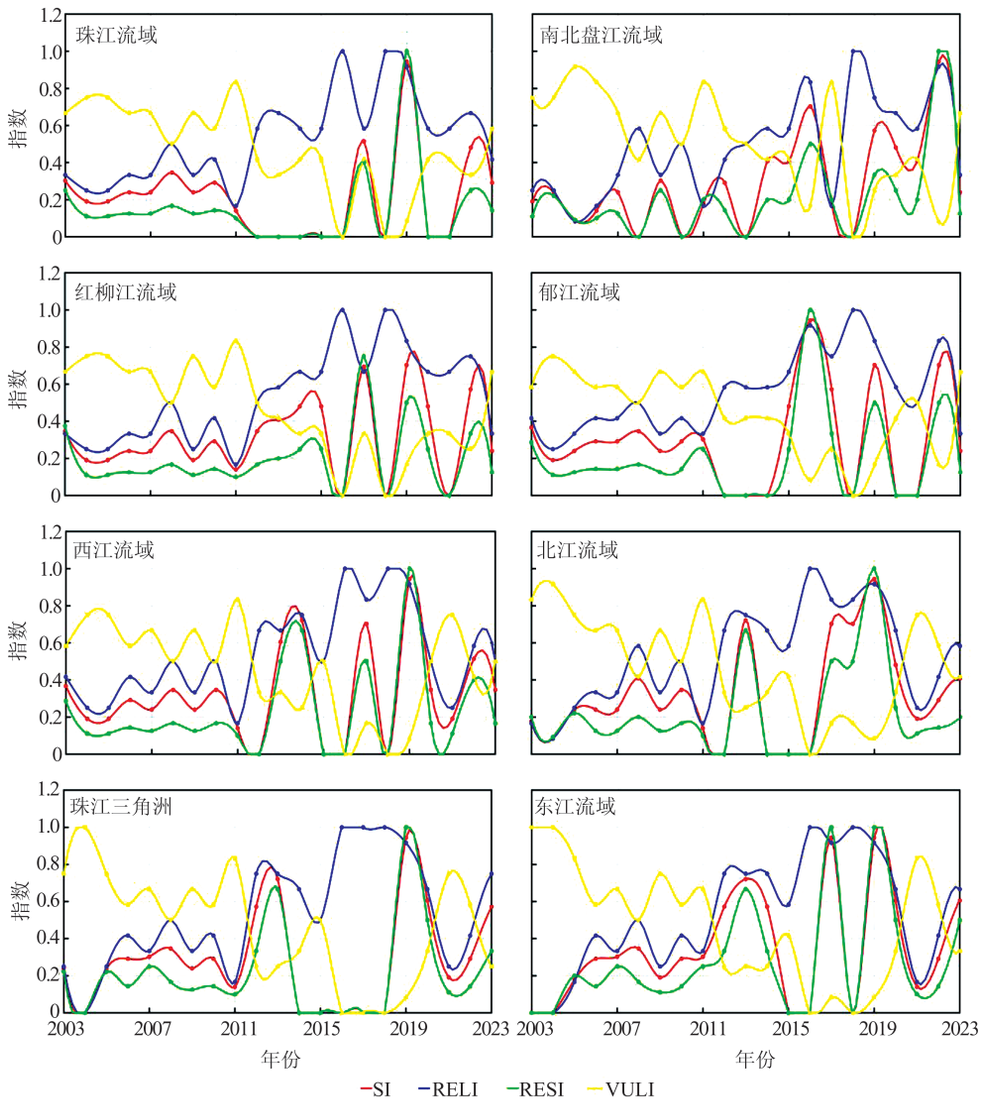


图8 2003—2023年珠江流域TWSC的各项指数时间演化特征

Fig. 8 Characteristics of Temporal Evolution of Indicators of TWSC in the Pearl River Basin During 2003—2023

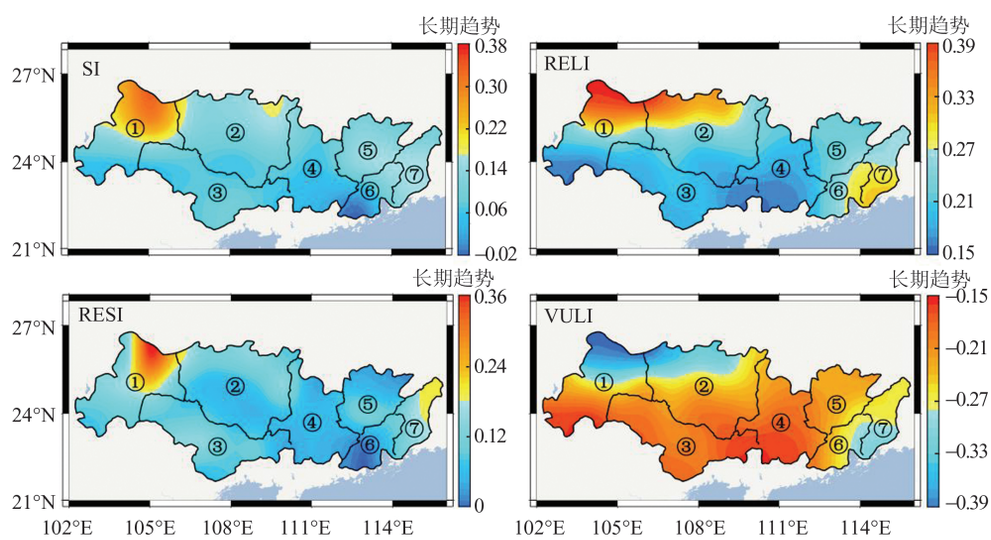


图9 2003—2023年珠江流域TWSC可持续性的各项指数长期趋势变化空间分布

Fig. 9 Spatial Distribution of Long-Term Trend Change of Sustainability-Related Indicators of TWSC in the Pearl River Basin During 2003—2023

3.3　珠江流域陆地水储量影响因素分析

根据水平衡方程和植被在水土保持中的作用,分别选取了降水、ET、径流和NDVI作为影响珠江流域TWSC的主要因素进行分析。分别比较了2003—2023年珠江流域降水、ET、径流和NDVI与TWSC月值和年值随时间变化的序列(图10、图11)。图10(a)显示降水与TWSC都存在显著的季节变化特征,且两者存在着一定的相似性。虽然降水在研究期间呈现出一定的增长趋势(1.47 mm/a),但远小于TWSC的4.7 mm/a,这说明影响珠江流域TWSC的因素不止降水这一种因素;图10(b)显示ET也呈现出显著的季节变化特征,虽然其也表现为增长趋势(0.11 mm/a),但是并不显著;图10(c)显示径流也展现出与ET相似的变化特征,即具有显著的季节变化,但是增长趋势不明显(0.34 mm/a);图10(d)则显示NDVI并没有表现出明显的变化趋势(0.05 mm/a),但是与上述3种因素一样表现出显著的季节性变化。

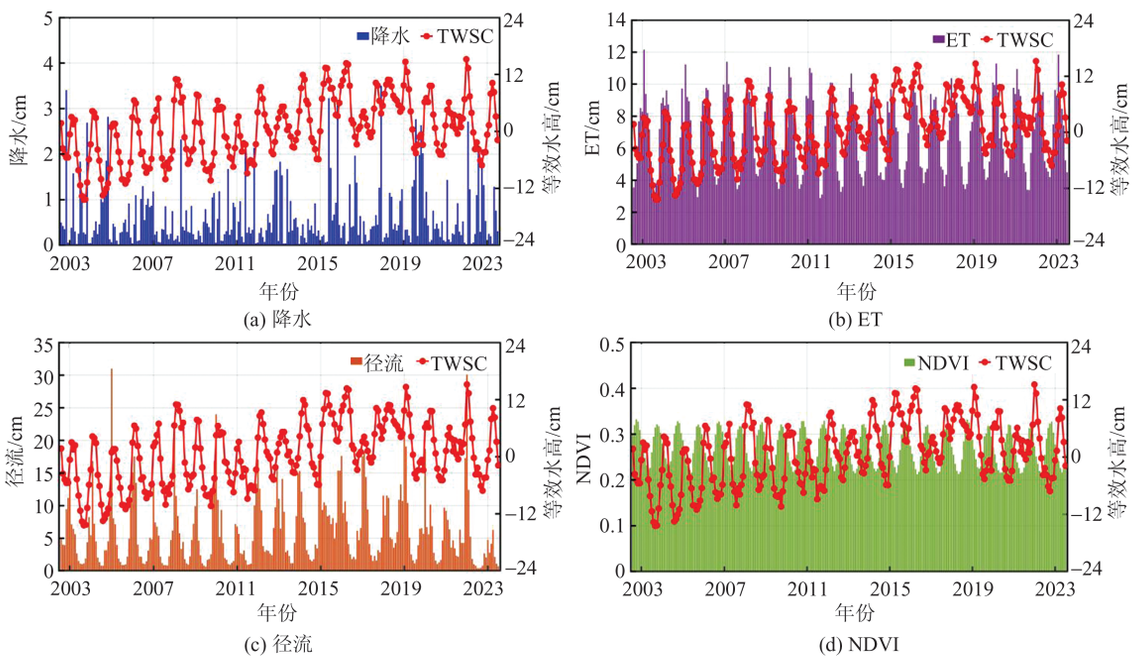


图10　2003—2023年珠江流域TWSC与降水、ET、径流和NDVI月值时间变化

Fig. 10　Month Temporal Change of TWSC, Precipitation, ET, Runoff and NDVI in the Pearl River Basin During 2003—2023

由图11(a)可以看出,TWSC呈现出显著的先上升(2005—2016年)后下降(2018—2021年)的年变化趋势,但是降水的年变化趋势却与TWSC呈现出较大的差异,而与径流的年变化趋势较为接近(图11(c)),两者的相关系数达到了0.88,说明它们之间的联系十分密切。ET则没有较为明显的变化(图11(b))。由图11(d)可以看出,从2005年到2016年NDVI有较为缓慢增加的趋势,这与TWSC在同期呈现的上升趋势一致。这表明植被覆盖率的增加有利于TWSC的增加。

图12给出了2003—2023年珠江流域4种影响因素和TWSC的长期趋势变化空间分布。由图12可以看出,绝大部分地区的降水都表现为增长趋势,其中增长较快的区域主要集中在②红柳江流域、④西江流域、⑤北江流域和⑥珠江三角洲,最大值出现在⑤北江流域的南部(2.8 mm/a)。ET的空间分布则表现为西部增加而东部减少的特征。其中,ET增长最快的区域为③郁江流域,最高速率达到了0.44 mm/a。径流则表现为中间增加、两边减少的空间分布特点,②红柳江流域、③郁江流域和④西江流域的径流表现为增长趋势,且②红柳江流域和③郁江流域交界处的增长率是最高的(1.3 mm/a)。珠江流域NDVI整体呈现出增长趋势,增长最快的区域为③郁江流域,其次为②红柳江流域,最大值出现在上述两个流域东部交界处(0.077 mm/a)。珠江流域的TWSC整体上呈现出增加趋势,其中增长速率最快的区域主要集中在①南北盘江流域和②红柳江流域的北部(最大值为6.5 mm/a),而增长趋势最慢的则为③郁江流域的南部,最慢增长速率为3.0 mm/a,两者相差超2倍。综上所述,4种因素的长期趋势变化空间分布均与TWSC存在着一定的差异,这表明珠江流域TWSC的长期趋势变

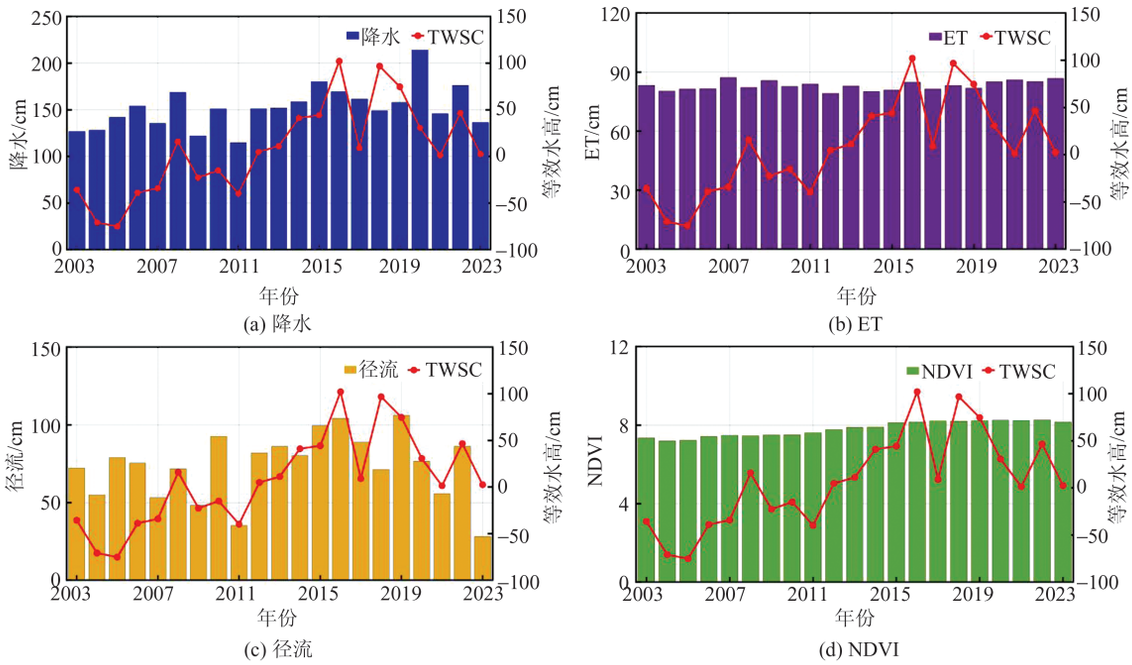


图11 2003—2023年珠江流域TWSC与降水、ET、径流和NDVI年值时间变化

Fig. 11 Year Temporal Change of TWSC, Precipitation, ET, Runoff and NDVI in the Pearl River Basin During 2003—2023

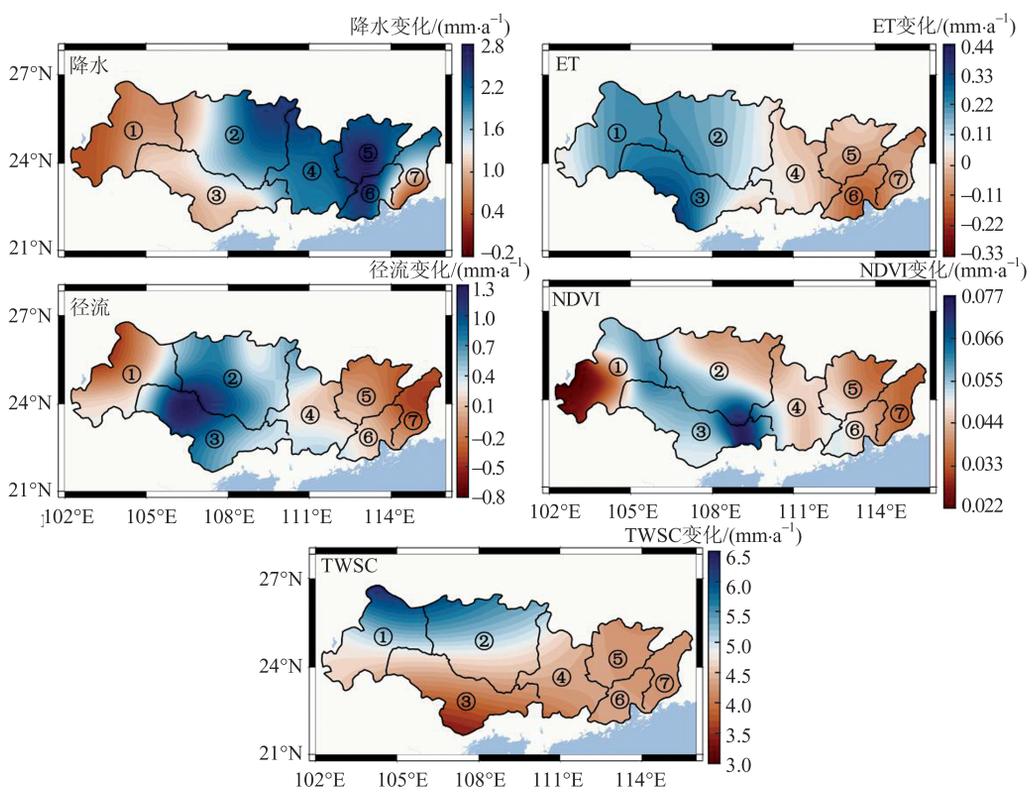


图12 2003—2023年珠江流域降水、ET、径流、NDVI和TWSC长期趋势变化

Fig. 12 Long-Term Trends of Precipitation, ET, Runoff, NDVI and TWSC in the Pearl River Basin Duirng 2003—2023

化并不是由某一种因素主导的,而是由多种因素的共同影响。因此,为了更好地判断和量化4种因素对TWSC的影响,本文将贡献率作为衡量某种因素对TWSC影响程度的指标。

表4分别给出了珠江流域及其7个子流域降水、ET、径流和NDVI对TWSC的贡献率。可以

表 4　2003—2023 年珠江流域及其子流域降水、ET、径流和 NDVI 对 TWSC 的贡献率/%

Table 4　Contribution of Precipitation, ET, Runoff and NDVI to TWSC in the Preal River Basin and Its Sub-Basins During 2003—2023/%

流域	降水	ET	径流	NDVI
珠江流域	21.17	6.28	27.44	45.12
①南北盘江流域	15.21	6.76	24.95	53.08
②红柳江流域	22.05	8.89	26.91	42.15
③郁江流域	19.11	3.87	28.65	48.37
④西江流域	21.84	13.80	27.86	36.50
⑤北江流域	22.52	14.65	27.87	34.96
⑥珠江三角洲	22.66	0.26	30.69	46.39
⑦东江流域	18.52	13.41	24.19	43.88

看出，无论是珠江流域还是7个子流域，4种影响因素的贡献率排序都是一致的，即NDVI最大，其次是径流和降水，最后是ET。NDVI的贡献率都在34%以上，远超其他3种影响因素，其中最大值（53.08%）出现在①南北盘江流域，最小值（34.96%）则位于⑤北江流域。径流的贡献率在24%～31%之间，在⑥珠江三角洲的值最大（30.69%），这是因为珠江三角洲位于珠江的出海口，所有径流都汇聚于此，在这里珠江的江面也是最宽的。而降水的贡献率则在15%～23%之间，其在⑥珠江三角洲的值最大（22.66%），这与径流的结果相同。其与珠江流域径流的主要补给为降水有密切的关系（两者扣掉季节项后相关系数仍达到0.71）。ET的贡献率均小于15%，其中在⑤北江流域最大（14.65%），在③郁江流域最小（3.87%）。总体而言，珠江流域对TWSC影响最大的因素是NDVI，其贡献率接近50%，降水和径流也具有一定的影响，而ET的影响最小。

图13给出了2003—2023年珠江流域降水、ET、径流和NDVI对TWSC的贡献率空间分布。可以看出，降水和径流的贡献率呈现出两边高、中间低的空间分布特征，在整体上，径流的贡献率（22.3%～33.1%）要高于降水（7.8%～25.9%），这说明降水并非径流的唯一补给来源。而ET和NDVI的贡献率空间分布表现出一定的相似性，即显著的东西分布特征，但是ET是东高西低，而NDVI是西高东低，这说明珠江流域的植被蒸腾在ET中的占比并不高。其中，ET贡献率较大的区域集中在⑤北江流域东北部（18.6%～22.2%），而在①南北盘江流域、②红柳江流域和③郁江流域，ET的贡献率则较低，大约在0.5%～4.1%之间。NDVI在①南北盘江流域北部有较大的贡献率（54.9%～58.5%），而较低的贡献率则出现在⑤北江流域东北部（29.5%～33.1%）。通过比较降水、径流和NDVI贡献率的空间分布可知，NDVI贡献率较高的区域降水和径流的贡献率都比较低。例如，①南北盘江流域、③郁江流域和⑦东江流域，这可能是较高的NDVI区域，其水土保持能力较强的缘故。

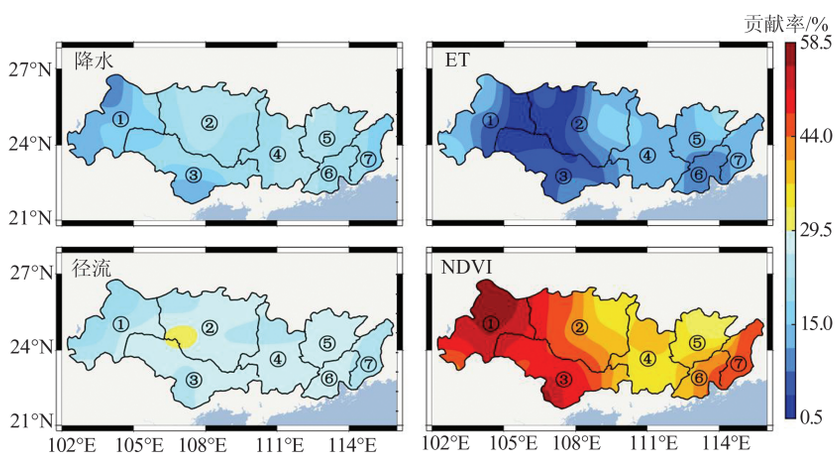


图13　2003—2023年珠江流域降水、ET、径流、NDVI对TWSC的贡献率空间分布

Fig. 13　Spatial Distribution of the Contributions of Precipitation, ET, Runoff, NDVI to TWSC in the Pearl River Basin Duirng 2003—2023

为了分析4种因素对TWSC贡献率的动态变化，进一步估算了珠江流域及其7个子流域的降水、ET、径流和NDVI对TWSC贡献率的时间演化过程（图14）。在2003—2023年期间，珠江流域NDVI的贡献率在71.42%的时间都是最大的，其中，最大值（59.31%）出现在2010年，最小值（15.87%）则发生在2022年。而径流和降水贡献率最大的次数分别为4和2，其中径流和降水贡献

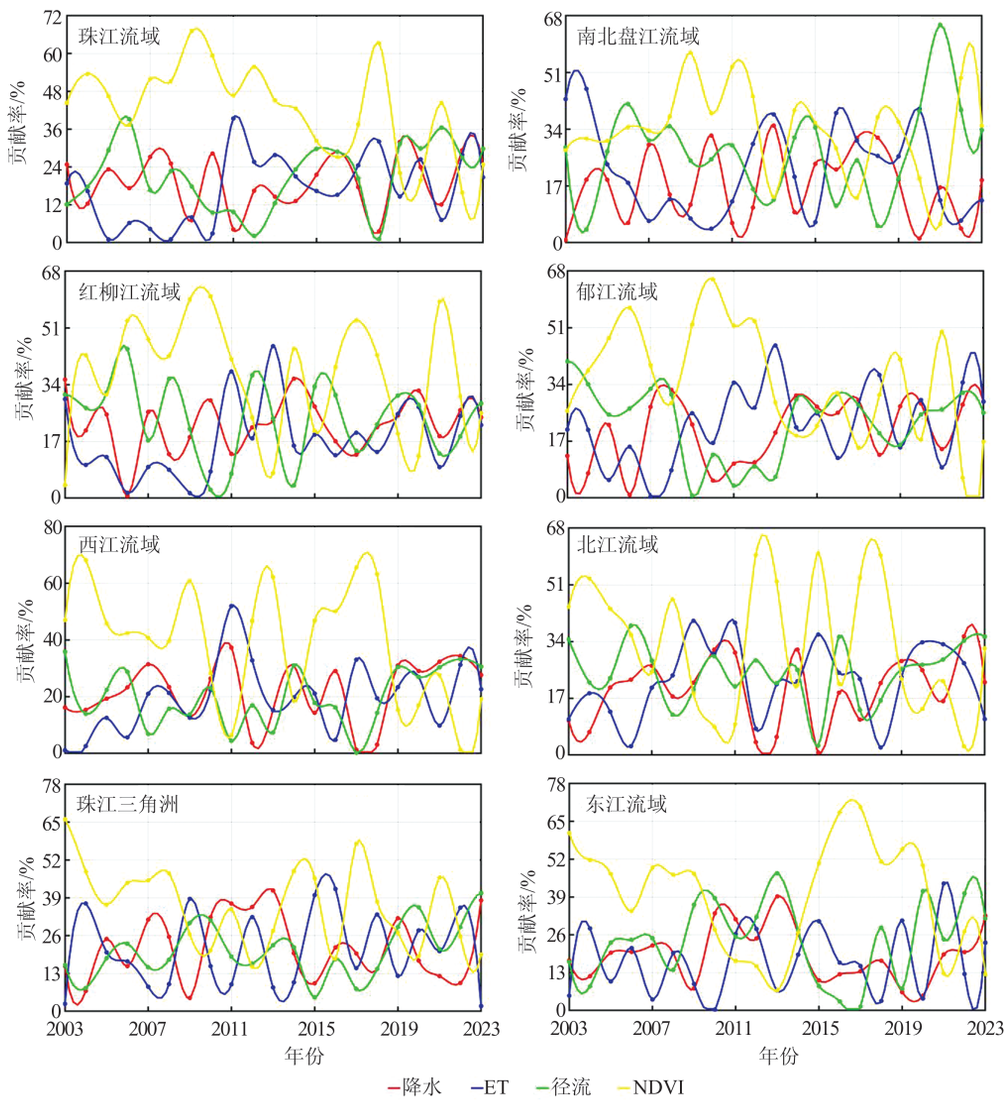


图14 2003—2023年珠江流域降水、ET、径流和NDVI对TWSC贡献率的时间演化特征

Fig. 14 Characteristics of Temporal Evolution of the Contributions of Precipitation, ET, Runoff, NDVI to TWSC in the Pearl River Basin During 2003—2023

率的最大值分别出现在2006年(39.17%)和2019年(31.9%),而最小值则分别出现在2012年(2.15%)和2018年(3.53%)。从年平均贡献率来看,4种因素按照从高到低排序是NDVI(42.31%)、径流(21.29%)、降水(19.39%)和ET(17.01%),这与表4的结果基本一致。

由图14还可知,NDVI的贡献率在所有子流域为最大的次数均高于其他3个影响因素,其中在④西江流域的次数最多(14次),在⑤北江流域的次数最少(8次);径流贡献率为最大出现次数最多(5次)的流域是②红柳江流域、⑤北江流域和⑦东江流域;在③郁江流域和⑥珠江三角洲,降水贡献率为最大出现的次数最多(5次);而ET贡献率为最大在①南北盘江流域出现的次数最多(5次)。

本文还绘制了珠江流域4种因素贡献率的长期趋势空间分布图(图15)。降水贡献率的长期趋势变化主要集中在0附近,这说明在研究时间段内降水贡献率并没有显著的变化。但是,在①南北盘江流域东部、④西江流域、⑤北江流域和⑦东江流域部分区域降水贡献率具有一定的上升趋势,其中①南北盘江流域东北部的增长趋势最大(1.5%/a),而降水贡献率具有下降趋势的区域主要集中在①南北盘江流域西部和②红柳江流域部分区域,而下降趋势最大值则位于①南北盘江流域西北部(−1.0%/a);ET贡献率在各个子流域的表现呈现出显著的差异,其中在①南北盘江流域东部和③郁江流域中部具有较为明显的减少趋势(−1.1~−0.5)%/a,而在④西江流域北部则出现了一定增加趋势(0.5~1.1)%/a;

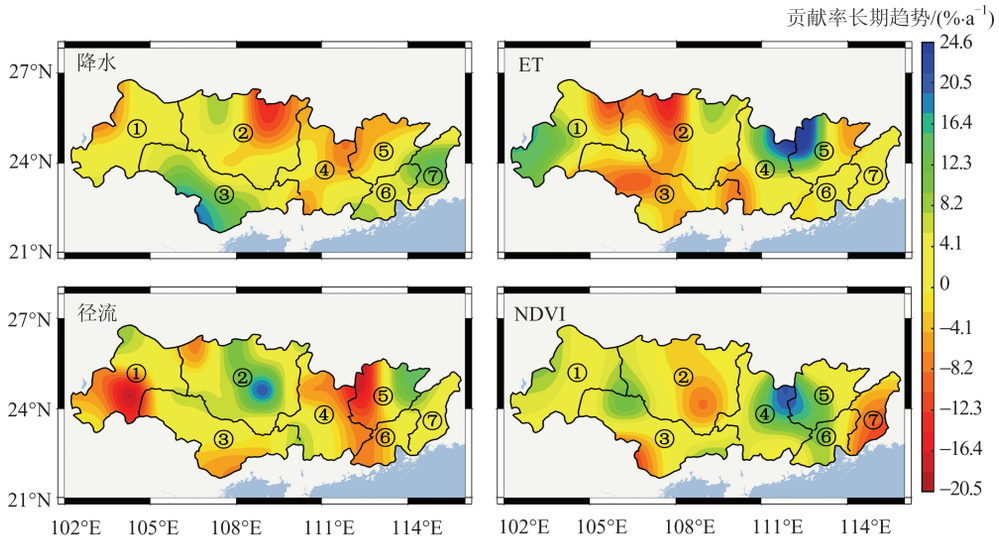


图 15　2003—2023年珠江流域降水、ET、径流和NDVI对TWSC贡献率的长期趋势变化空间分布

Fig. 15　Spatial Distribution of Long-Term Trend Change of the Contributions of Precipitation, ET, Runoff, NDVI to TWSC in the Pearl River Basin During 2003—2023

径流贡献率在④西江流域、⑤北江流域和⑥珠江三角洲部分区域表现出较为明显的下降趋势(−1.0～−0.5)%/a,而在其余地区则没有显著的变化;相较而言,NDVI贡献率在大部分地区也没有显著的变化,仅在①南北盘江流域、③郁江流域、⑤北江流域和⑦东江流域部分地区出现了减少的趋势(−1.0～−0.6)%/a这可能与4个流域NDVI下降有关(图11)。

4　结　语

本文首先采用HUST-Grace2024时变重力场模型反演了2003—2023年珠江流域TWSC时空演化特征,并采用国际上常用的5种GRACE/GRACE-FO模型对其进行了对比验证。随后,采用HUST-Grace2024模型计算的TWSC分析了珠江流域及其7个子流域同一时期的可持续性时空变化特征。最后,结合降水、ET、径流和NDVI数据分析了其对珠江流域TWSC贡献率的时空特征及其趋势变化,主要结论如下:

1)基于HUST-Grace2024的近21年珠江流域TWSC结果与国际上常用的5种GRACE/GRACE-FO模型反演结果具有高度一致性,其中与JPL RL06的结果最为接近,且其不确定性仅次于CSR RL06结果,与COST-G结果相当。

2)在研究时段内,珠江流域的TWSC整体呈现出增加的趋势,并表现出显著的南北差异,其中①南北盘江流域和②红柳江流域的增长趋势显著快于其他子流域。

3)珠江流域及其7个子流域的TWSC在研究期间内整体上处于轻度不可持续状态,其中③郁江流域和①南北盘江流域的SI分别为最高和最低。从年尺度来看,2003—2011年SI值较为稳定,而2012—2023年SI值出现较大的起伏。从空间分布来看,SI呈现出东西部小、中间大的特点。从变化趋势来看,珠江流域的SI整体上处于增加的状态,且①南北盘江流域的增长速率最快,这与TWSC的变化趋势存在着一定的相似性。

4)根据贡献率结果显示,珠江流域降水、ET、径流和NDVI对TWSC的影响存在着显著的差异,其中NDVI的贡献率最大(45.12%),其次是径流(27.44%)和降水(21.17%),最后是ET(6.28%)。在7个子流域中,4种因素的贡献率排序完全一致,但是在数值上存在着差异。其中NDVI的贡献率在①南北盘江流域最大,径流和降水的贡献率在⑥珠江三角洲最大,ET的贡献率在⑤北江流域最大。

参　考　文　献

[1]　夏军, 刘春蓁, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-12.
XIA Jun, LIU Chunzhen, REN Guoyu. Opportunity and Challenge of the Climate Change Impact on the Water Resource of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1): 1-12.

[2]　水利部珠江水利委员会. 走进珠江. [EB/OL]. [2022-07-19]. http://www.pearlwater.gov.cn/

swh/zjzj/.
Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. Entering the Pearl River [EB/OL]. [2022-07-19]. http://www.pearlwater.gov.cn/swh/zjzj/.

[3] 罗志才,钟波,周浩,等.利用卫星重力测量确定地球重力场模型的进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1713-1727.
LUO Zhicai, ZHONG Bo, ZHOU Hao, et al. Progress in Determining the Earth's Gravity Field Model by Satellite Gravimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1713-1727.

[4] CUI L L, ZHU C K, WU Y L, et al. Natural and Human-Induced Influences on Terrestrial Water Storage Change in Sichuan, Southwest China from 2003 to 2020[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1369.

[5] ZHONG B, LI Q, LI X P, et al. Basin-Scale Terrestrial Water Storage Changes Inferred from GRACE-Based Geopotential Differences: A Case Study of the Yangtze River Basin, China[J]. *Geophysical Journal International*, 2023, 233(2): 1318-1338.

[6] XU G D, WU Y L, LIU S L, et al. How 2022 Extreme Drought Influences the Spatiotemporal Variations of Terrestrial Water Storage in the Yangtze River Catchment: Insights from GRACE-Based Drought Severity Index and In-Situ Measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 626: 130245.

[7] 聂圣琨,尹文杰,郑伟,等.南水北调前后海河流域陆地水储量变化分析[J].大地测量与地球动力学,2023,43(2):128-134.
NIE Shengkun, YIN Wenjie, ZHENG Wei, et al. Analysis of Land Water Reserves in Haihe River Basin Before and After South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, 43(2): 128-134.

[8] 张博,曹丹平,唐家奎.应用GRACE和气象数据监测黄河流域陆地水储量时空变化[J].遥感技术与应用,2024,39(3):699-707.
ZHANG Bo, CAO Danping, TANG Jiakui. Application of GRACE and Meteorological Data to Monitor Terrestrial Water Storage in the Yellow River Basin[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2024, 39(3): 699-707.

[9] 曹艳萍,南卓铜,胡兴林.利用GRACE重力卫星数据反演黑河流域地下水变化[J].冰川冻土,2012,34(3):680-689.
CAO Yanping, NAN Zhuotong, HU Xinglin. Changes of Groundwater Storage in the Heihe River Basin Derived from GRACE Gravity Satellite Data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 680-689.

[10] 熊景华,王兆礼.基于GRACE重力卫星的珠江流域陆地水储量时空变化研究[J].水文,2021,41(6):33-39.
XIONG Jinghua, WANG Zhaoli. Spatiotemporal Changes of Terrestrial Water Storage in the Pearl River Basin Based on GRACE Data[J]. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(6): 33-39.

[11] HUANG H J, FENG G B, CAO Y E, et al. Simulation and Driving Factor Analysis of Satellite-Observed Terrestrial Water Storage Anomaly in the Pearl River Basin Using Deep Learning[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16): 3983.

[12] 邓梓锋,吴旭树,王兆礼,等.基于GRACE重力卫星数据的珠江流域干旱监测[J].农业工程学报,2020,36(20):179-187.
DENG Zifeng, WU Xushu, WANG Zhaoli, et al. Drought Monitoring Based on GRACE Data in the Pearl River Basin, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(20): 179-187.

[13] 熊景华,王兆礼.基于GRACE重力卫星的珠江流域大尺度洪水监测[J].水力发电学报,2021,40(5):68-78.
XIONG Jinghua, WANG Zhaoli. Exploration of Large-Scale Flood Monitoring in the Pearl River Basin Based on GRACE Satellites[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(5): 68-78.

[14] CUI L L, CHEN X S, AN J C, et al. Spatiotemporal Variation Characteristics of Droughts and Their Connection to Climate Variability and Human Activity in the Pearl River Basin, South China[J]. *Water*, 2023, 15(9): 1720.

[15] MEYER U, JEAN Y, KVAS A, et al. Combination of GRACE Monthly Gravity Fields on the Normal Equation Level[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1645-1658.

[16] ZHOU H, ZHOU Z B, LUO Z C. A New Hybrid Processing Strategy to Improve Temporal Gravity Field Solution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(8): 9415-9432.

[17] LI F P, KUSCHE J, RIETBROEK R, et al. Comparison of Data-Driven Techniques to Reconstruct (1992—2002) and Predict (2017—2018) GRACE-Like Gridded Total Water Storage Changes Using Climate Inputs[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(5): e2019WR026551.

[18] MIRALLES D G, HOLMES T R H, DE JEU R A

M, et al. Global Land-Surface Evaporation Estimated from Satellite-Based Observations [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(2): 453-469.

[19] 杜梅，赵健赟. 基于MODIS NDVI的湟水流域植被覆盖时空变化特征分析[J]. 青海大学学报，2020, 38(6): 77-84.
DU Mei, ZHAO Jianyun. Analysis on the Characteristics of Spatial and Temporal Variation of Vegetation Coverage in Huangshui River Basin Based on MODIS NDVI[J]. *Journal of Qinghai University*, 2020, 38(6): 77-84.

[20] SUN Y, RIVA R, DITMAR P. Optimizing Estimates of Annual Variations and Trends in Geocenter Motion and J2 from a Combination of GRACE Data and Geophysical Models[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(11): 8352-8370.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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(1): 015015.

[24] KHANDU, FOROOTAN E, SCHUMACHER M, et al. Exploring the Influence of Precipitation Extremes and Human Water Use on Total Water Storage (TWS) Changes in the Ganges-Brahmaputra-Meghna River Basin[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(3): 2240-2258.

[25] LONG D, PAN Y, ZHOU J, et al. Global Analysis of Spatiotemporal Variability in Merged Total Water Storage Changes Using Multiple GRACE Products and Global Hydrological Models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 198-216.

[26] CUI L L, LUO C J, YAO C L, et al. The Influence of Climate Change on Forest Fires in Yunnan Province, Southwest China Detected by GRACE Satellites[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 712.

[27] CUI L L, YIN M Q, ZOU Z B, et al. Spatiotemporal Change in Evapotranspiration Across the Indus River Basin Detected by Combining GRACE/GRACE-FO and Swarm Observations[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(18): 4469.

[28] SANDOVAL-SOLIS S, MCKINNEY D C, LOUCKS D P. Sustainability Index for Water Resources Planning and Management[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2011, 137(5): 381-390.

[29] 瞿伟，陈沛男，张普方，等. GRACE/GRACE-FO揭示黄河上游2002—2022年GWS及可持续性时空演化[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2024, 49(8): 1287-1299.
QU Wei, CHEN Peinan, ZHANG Pufang, et al. Spatiotemporal Changes of GWS Changes and Their Sustainability in the Upper Reaches of the Yellow River Basin from 2002 to 2022 Revealed by GRACE/GRACE-FO Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1287-1299.

[30] 许智铭，王正涛. 联合GRACE和水文数据探测松花江流域地下水时空变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2023, 48(9): 1409-1415.
XU Zhiming, WANG Zhengtao. Detect Songhua River Basin Groundwater Spatiotemporal Variation Characteristics by GRACE and Multi-source Hydrological Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(9): 1409-1415.

[31] FENG T F, SHEN Y Z, WANG F W, et al. Spatiotemporal Variability and Driving Factors of the Shallow Soil Moisture in North China During the Past 31 Years[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129331.

[32] 赵丹丹. 基于机器学习算法的黄河流域水储量数据重建[D]. 开封：河南大学，2021.
ZHAO Dandan. Reconstruction of Water Storage Data in the Yellow River Basin Based on Machine Learning Algorithm[D]. Kaifeng: Henan University, 2021.

[33] ZHANG Z Z, CHAO B F, CHEN J L, et al. Terrestrial Water Storage Anomalies of Yangtze River Basin Droughts Observed by GRACE and Connections with ENSO[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 126: 35-45.