

# 卫星重力对广东省陆地水储量的时空变化 监测及其驱动因素分析<sup>\*</sup>

叶瑞明<sup>1, 2, 3)</sup>, 孙炜程<sup>1, 2, 3, 4, 5)†</sup>, 古伟军<sup>1, 2, 3, 4)</sup>, 杜向锋<sup>6)</sup>, 龚国栋<sup>1, 2, 3, 4)</sup>

(1)广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 广东广州; 2)广州市资源规划和海洋科技协同创新中心, 广东广州;

3)广东省城市感知与监测预警企业重点实验室, 广东广州; 4)广州花都规划勘测设计院有限公司, 广东广州;

5)广东工业大学土木与交通工程学院, 广东广州; 6)广东工贸职业技术学院测绘遥感信息学院, 广东广州)

**摘要** 水资源是维系生态系统与经济发展的核心要素, 近年来国家积极开展水资源基础调查, 为区域水资源管理收集基础水文信息。鉴于此, 本文综合利用 GRACE/GRACE-FO、GLDAS 与实测地下水资料, 探讨了 2002 年 4 月—2024 年 12 月广东省陆地水、地表水、地下水储量的时空变化, 并结合降水、温度、潜在蒸散及用水量等数据分析了区域水储量变化的驱动因素。结果表明: 广东省陆地水储量在东部与北部盈余, 其整体变化速率达到  $(0.19 \pm 0.09) \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 且与水资源公报数据相对变化率的吻合度达到 72.4%; 而地下水储蓄功能则因开采压力在中部与西部受限, 其与实测地下水位变化的相关系数为 0.73。驱动因素分析显示: 水储量变化与气象因素的关联程度从高到低依次为降水、潜在蒸散与气温, 且与用水量呈负相关; 在极端旱涝事件监测方面, 干旱指数 GRACE-DSI 与标准化降水指数 SPI 对区域干旱与洪涝事件的识别吻合度分别达 51.9% 与 62.5%, 且有效反映出水资源公报记录的丰枯水年份类型。相关结果可为全省水资源调查提供大尺度范围的数据参考。

**关键词** GRACE; 广东省; 陆地水储量; 降水; 干旱指数

**中图分类号** P223

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2025164

## 0 引言

广东省地处我国最南端, 受亚热带季风影响, 省内地表降水事件频发, 常引发城市内涝、山体滑坡等灾害<sup>[1]</sup>, 严重威胁城市安全与经济发展; 同时, 由于省内水资源空间分布不均, 导致区域性、季节性干旱问题突出, 其中以粤西雷州半岛干旱趋势最为严峻<sup>[2]</sup>, 同时粤港澳大湾区在高度城市化进程中也出现江河湖库生态系统退化风险<sup>[3]</sup>。此外, 2024 年中华人民共和国自然资源部印发《水资源基础调查实施方案》, 积极推动全国水资源调查工作部署<sup>[4]</sup>。在此背景下, 开展广东省水资源时空变化的监测研究, 协同水资源调查政策提供行政区尺度范围的水储量变化监测信息, 对于全面推进广东省的水环境治理具有重要的现实意义。

卫星重力数据基于重力场模型反演理论, 目前已成功实现区域陆地水储量的变化监测<sup>[5]</sup>, 其监测结果具有范围广与时效性高的优势, 有效弥补了传统水文监测站点空间分布不均的局限性。在我国华南地区的

卫星重力监测应用研究中, 丁一航等<sup>[6]</sup>利用改进经验模态分解方法处理 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)重力数据, 初步发现珠江流域存在 2.13 a 的水循环周期; 陈智伟等<sup>[7]</sup>进一步综合多源数据开展时域分析, 证实 GRACE 反演的陆地水储量季节性变化特征与 GLDAS(global land data assimilation system)模型、降水及实测地下水变化相吻合。在此基础上, Huang 等<sup>[8]</sup>构建干旱指数 GRACE-DSI(GRACE-Drought Severity Index)精确识别出珠江流域 2002—2019 年间发生的 4 次重大干旱事件; 邓梓锋等<sup>[9]</sup>通过相关性分析表明 GRACE-DSI 与标准降水指数 SPI(standardized precipitation index)及标准降水蒸散指数 SPEI(standardized precipitation evapotranspiration index)等指标的相关系数  $> 0.66$ , 为构建卫星重力的旱涝监测体系提供了可行性。此外, 在驱动因素分析方面, Zhang 等<sup>[10]</sup>采用主成分分析法揭示了珠江流域极端洪水事件与厄尔尼诺-南方涛动 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)的关联; Huang 等<sup>[11]</sup>与 Ji 等<sup>[12]</sup>分别基于 Shapley 深度学习算法与地理加权回归法量化了气象要素与人类

<sup>\*</sup> 广东省基础与应用基础研究资助项目(2023A1515110276)

<sup>†</sup> 通信作者: 孙炜程(2000—), 男, 硕士, 研究方向: 测绘、卫星重力方面应用。E-mail: sun1314350@163.com

收稿日期: 2025-09-04

活动对区域水储量变化的驱动贡献,一致指出降水是驱动珠江流域水储量变化的主导因素。整体看,卫星重力已然成为现代水文监测的重要手段之一,其可靠性在南水北调等大型水利工程中也得到了充分验证<sup>[13-14]</sup>,且诸如 HWSA(high-resolution water storage anomaly product)等高空间分辨率水储量异常模型研制同样取得一定效益<sup>[15]</sup>,对于区域水资源监测精细化应用具有巨大潜力。

当前研究主要集中在流域范围,鉴于水资源基础调查对行政单元具有管理需求,有必要将监测范围聚焦于省级行政区,协助地方水资源管理。为此本文选取广东省为研究区域,利用卫星重力数据开展全省水储量变化监测研究,综合降水、气温、潜在蒸散等自然因素与人类用水等人为要素探讨了省内水资源演

变的驱动机制,并探究了卫星重力对省内极端旱涝事件的识别能力,为广东省水资源基础调查提供相关数据参考。

## 1 研究数据源

本文收集了格拉茨技术大学大地测量研究所 ITSG(Institute of Geodesy at Graz University of Technology)发布的 GRACE、GRACE-FO(GRACE Follow-On)时变重力场模型,结合 GLDAS 模型,分别反演区域陆地水储量与地表水储量变化,并通过中国地质环境监测地下水水位年鉴获取实测地下水水位数据;同时,在驱动因素方面,本文收集相关数据模型、数据集与公报年鉴资料分别统计了区域降水量、气温、潜在蒸散、用水量等,模型与数据信息详见表 1。

表 1 研究数据信息

| 类别             | 模型与数据                                                 | 分辨率                                                                     | 时间跨度            |
|----------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 陆地水储量          | ITSG-Grace2018、ITSG-Grace_operational <sup>[16]</sup> | 原始 $3^{\circ}\times 3^{\circ}$<br>后处理 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ | 2002-04—2024-12 |
| 土壤水、雪水当量、植被冠层水 | GLDAS NOAH025 M2.1                                    | $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$                                       | 2002-04—2024-12 |
| 实测地下水水位        | 中国地质环境监测地下水水位年鉴 <sup>[17]</sup>                       | —                                                                       | 2018-01—2022-12 |
| 降水量            | CRU-TS v.4.09 Precipitation                           | $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$                                         | 2002-01—2024-12 |
| 气温             | CRU-TS v.4.09 Temperature                             | $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$                                         | 2002-01—2024-12 |
| 潜在蒸散           | 中国1km逐月潜在蒸散发数据集 <sup>[18]</sup>                       | $0.008^{\circ}\times 0.008^{\circ}$                                     | 2002-01—2023-12 |
| 水资源总量          | 广东省水资源公报 <sup>[19]</sup>                              | —                                                                       | 2003—2022       |
| 用水总量           | 广东统计年鉴 <sup>[20]</sup>                                | —                                                                       | 2003—2023       |

## 2 理论与方法

### 2.1 陆地水储量变化计算

在 GRACE/GRACE-FO 时变重力场模型的处理方面,本文对该模型完成了一阶系数与 C20 系数改正<sup>[21-22]</sup>、冰后回弹改正<sup>[23]</sup>、高斯滤波<sup>[24]</sup>、Swenson 去相关滤波<sup>[25]</sup>与尺度因子改正<sup>[26]</sup>的数据处理。

基于重力反演理论,利用 GRACE/GRACE-FO 模型反演计算区域等效水高 $H_{EW}$ (equivalent water height)<sup>[5]</sup>,进而计算区域陆地水储量变化 $H_{TWSA}$ (terrestrial water storage anomalies)。此外,本文采用奇异谱分析法对 TWSA 的空缺月份完成插值处理<sup>[27]</sup>。

$$H_{EW} = \frac{a\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{l,m}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_l} W_l \cdot [\Delta\bar{C}_{l,m} \cos(m\lambda) + \Delta\bar{S}_{l,m} \sin(m\lambda)], \quad (1)$$

$$H_{TWSA} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta h_i(\lambda_i, \theta_i) \times \cos\theta_i}{\sum_{i=1}^N \cos\theta_i}, \quad (2)$$

式中: $a$ 为地球体半径; $\rho_{ave}$ 为地球密度; $\rho_w$ 为水的密度; $\bar{P}_{l,m}$ 为完全规格化的缔合勒让德多项式; $k_l$ 为负荷勒夫系数; $l$ 、 $m$ 分别为系数的阶与次; $W_l$ 为高斯滤波系数,滤波半径为 300 km; $\theta$ 、 $\lambda$ 分别为纬度与经度; $\Delta\bar{C}_{l,m}$ 、 $\Delta\bar{S}_{l,m}$ 为规格化球谐系数较于参考系数的差值; $N$ 为区域格网总数。

### 2.2 其他水储量变化计算

GLDAS 模型提供了土壤水 $H_{SMSA}$ (soil moisture storage anomalies)、雪水当量 $H_{SWEA}$ (snow water equivalent anomalies),以及植被冠层水 $H_{CWSA}$ (canopy water storage anomalies)等水储量变化数据,地表水储量变化(surface water storage anomalies)计算式为

$$H_{SWSA} = H_{SMSA} + H_{SWEA} + H_{CWSA}. \quad (3)$$

此外,鉴于陆地水主要包括地下水、土壤水、地表水、冠层水、雪水当量等,由此推算出地下水储量变化(ground water storage anomalies)计算式为

$$H_{GWSA} = H_{TWSA} - H_{SWSA}. \quad (4)$$

### 2.3 实测地下水储量变化计算

针对广东省地下水水位变化,本文收集了 77 个地

下水位监测井数据,监测时段覆盖 2018—2022 年.实测数据转换为实测地下水储量变化( $H_{\text{实测,GWSA}}$ )<sup>[28]</sup>为

$$H_{\text{实测,GWSA}} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i \cos(\theta_i) \Delta h_{i,\text{水位}}}{\sum_{i=1}^N \cos \theta_i}, \quad (5)$$

式中:  $N$  为区域格网数量;  $S_i$  为非承压含水层的比产量或承压含水层的储水率,广东省区域取值为 0.03<sup>[7]</sup>;  $\theta_i$  为格网纬度;  $\Delta h_{i,\text{水位}}$  为格网内监测井的地下水位变化.

## 2.4 驱动因素分析

由于水储量变化受多种因素协同驱动影响,本文基于偏最小二乘回归与多元线性回归,分别获取自变量对于因变量的投影重要性  $I_{\text{VP}}$  (variable importance in projection)<sup>[29-31]</sup> 与相对贡献率  $\eta$ <sup>[32]</sup>, 综合评估不同变量对水储量变化的影响程度. 相关评估指标计算公式为

$$I_{\text{VP},i} = \sqrt{\frac{n \sum_{h=1}^m R(Y, t_h)^2 W_{h,i}^2}{\sum_{h=1}^m R(Y, t_h)^2}}, \quad (6)$$

$$\eta_i = \frac{|a_i|}{\sum_{i=1}^n |a_i|}, \quad (7)$$

式中:  $n$  为自变量数量;  $m$  为提取主成分数量;  $Y$  为因变量;  $t_h$  为第  $h$  项主成分;  $R(Y, t_h)$  为  $Y$  与  $t_h$  间相关系数的平方;  $W_{h,i}$  为自变量在主成分  $t_h$  中的权重;  $a_i$  为第  $i$  个自变量的标准偏回归系数.

## 2.5 干旱指数

GRACE-DSI 基于重力反演数据计算,可捕捉区域水储量综合变化情况的干旱特征,其计算公式为

$$\sigma_{\text{GRACE-DSI},i,j} = \frac{H_{\text{TWSA},i,j} - \bar{H}_{\text{TWSA},j}}{\sigma_{\text{TWSA},j}}, \quad (8)$$

式中  $\sigma_{\text{TWSA},j}$  为  $H_{\text{TWSA},i,j}$  的标准差.

标准化降水指数  $\sigma_{\text{SPI}}$  可用于衡量区域降水异常,其基于 Gamma 分布拟合降水数据,进而通过计算混合累积概率与正态分布逆函数转换获取指数值<sup>[33]</sup>.

## 2.6 其他指标

相关系数 ( $R$ ) 可量化数据间的相互关系,且均方根误差  $\sigma_{\text{RMSE}}$  (root mean squared error) 可评估数据间的吻合度,二者计算公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(y_{0,i} - \bar{y}_0)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (y_{0,i} - \bar{y}_0)^2}}, \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{0,i})^2}{n}}, \quad (10)$$

式中  $y_i$  与  $y_{0,i}$  分别为评估值与参考值的时间序列.

# 3 结果分析

## 3.1 数据的评估验证

首先对于重力场模型反演 TWSA 的评估验证,本文收集了 CSR (Center for Space Research at University of Texas)、GFZ (Helmholtz Centre for Geosciences)、JPL (Jet Propulsion Laboratory) GRACE RL06、GRACE-FO RL06.3 模型,以及 COST-G (International Combination Service for Time-variable Gravity Field) 解算的 GRACE、GRACE-FO RL02 模型<sup>[34]</sup>, 计算结果进行对比分析,各模型反演广东省 TWSA 的时空变化结果如图 1、图 2 所示.

其中,在空间变化方面,图 1 结果表明 ITSG 模型与其他重力场模型反演 TWSA 年变化趋势的空间变化高度一致,均表明 TWSA 显著变化集中在北部与东部区域;且在时间变化方面,图 2 结果表明 ITSG 模型结果与其他模型结果吻合度较高,相关系数均  $> 0.90$ . 整体表明本文采用的 ITSG 模型结果与其他重力场模型差异较小.

同时,本文结合广东省水资源公报提供的水资源总量变化进一步进行比较验证得到图 3-a<sup>[19]</sup>, 结果表明, TWSA 与公报数据的年际变化具有良好的一致性,二者的相关系数达到 0.66. 此外,本文以期间最大值与最小值的绝对差为参考量,将当年与上一年数据的年际变化差值作为变化量,通过各年变化量与参考量的比值分别统计 TWSA 与公报数据的相对变化率而得到图 3-b, 发现 TWSA 与公报数据在相对变化率方面存在较好的对应关系,二者的标准差为 27.6%,即 TWSA 与公报数据相对变化率的吻合度达到 72.4%,有利于卫星重力基于相对变化率计算省内每年的水资源变化总量. 经计算得知重力场模型反演 TWSA 在 2003—2016 年增加了 769.96 亿  $\text{m}^3$ , 占同期公报数据水资源增量的 77.6%, 该结果与上述吻合度存在良好的一致性,说明卫星重力可为省水资源调查提供水资源总量尺度的数据参考.

此外,针对重力场模型与 GLDAS 模型推算 GWSA 的评估验证,本文利用中国地质环境监测地下水位年鉴提供的 2018—2022 年的实测数据<sup>[17]</sup>, 从区域内地下水储量的时间变化方面进行比较分析. 图 4 展示了模型反演 GWSA 与实测 GWSA 的时间变化,且基于最

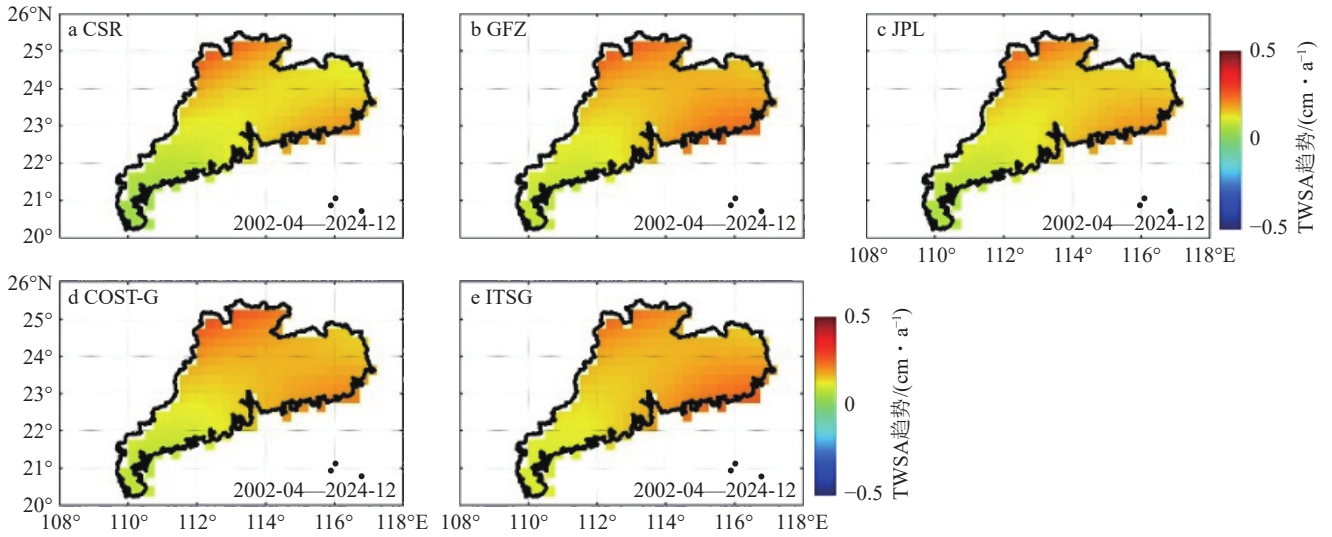


图 1 多源重力场模型反演广东省 TWSA 年变化趋势的空间变化

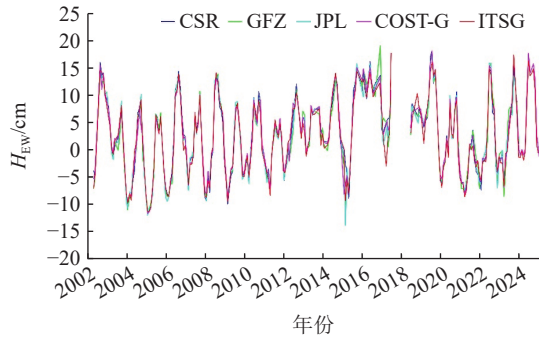


图 2 多源重力场模型反演广东省 TWSA 的时间变化

小二乘拟合计算时序结果的趋势及其不确定度,并综合二者的  $\sigma_{\text{RMSE}}$  与相关系数进行数学统计得到表 2。

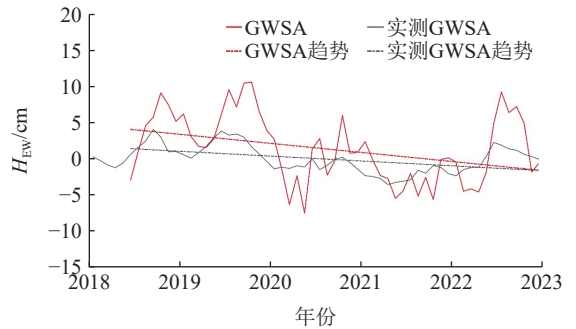


图 4 重力场模型反演 GWSA 与实测 GWSA 的时间变化

表 2 重力场模型反演 GWSA 与实测 GWSA 的结果统计

| 地下水储量变化 | 趋势 $/(\text{cm} \cdot \text{a}^{-1})$ | $\sigma_{\text{RMSE}}/\text{cm}$ | 相关系数 |
|---------|---------------------------------------|----------------------------------|------|
| GWSA    | $-1.25 \pm 0.81$                      | 3.82                             | 0.73 |
| 实测GWSA  | $-0.67 \pm 0.32$                      |                                  |      |

表 2 统计数据结果显示, GWSA 与实测 GWSA 在 2018-06—2022-12 期间均表现为显著下降趋势, 下降速率分别达到  $(-1.25 \pm 0.81)$  与  $(-0.67 \pm 0.32) \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 在此期间二者的相关系数达到 0.73, 且  $\sigma_{\text{RMSE}}$  达到 3.82 cm. 整体看, 重力场模型反演 GWSA 与实测 GWSA 具有良好的一致性, 验证了模型反演 GWSA 数据的可靠性, 同时说明模型反演 GWSA 可有效弥补实测地下水数据量的局限性, 如补充早期实测地下水资料的数据空白, 有利于大尺度区域的地下水储量监测。

### 3.2 广东省陆地水储量时空变化分析

鉴于卫星重力观测数据的空间分辨率有限, 因此本文将研究区域聚焦在广东省大部陆域范围进行分析, 而未考虑海上的岛屿群落。本文综合利用 GRACE/GRACE-FO 模型、GLDAS 模型反演计算 2002-04—

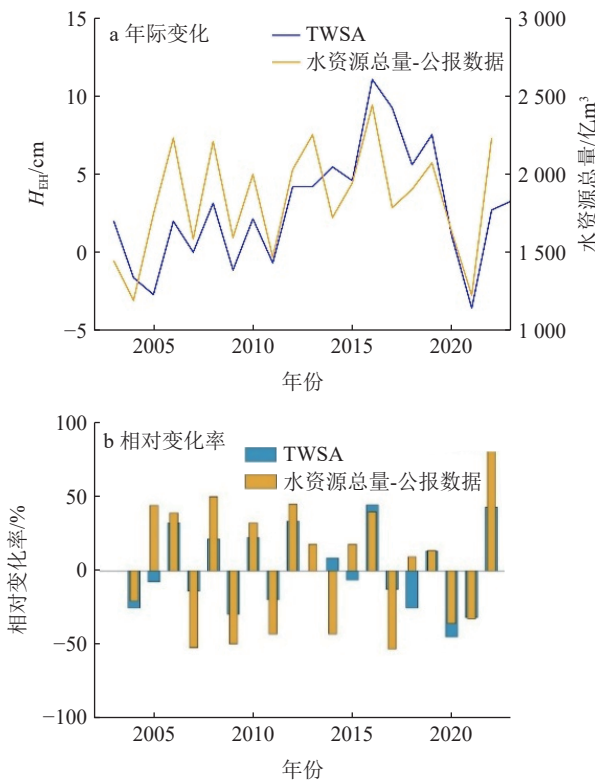


图 3 广东省水资源的年际变化与相对变化率对比

2024-12 期间广东省 TWSA、SWSA、GWSA 的时空变化。

在空间变化方面,图 5 展示了 TWSA、SWSA、GWSA 年变化趋势的空间变化,结果表明 TWSA 在区域北部与东部出现盈余而在区域西部基本维持稳定,其中 SWSA 在区域中部与西部出现缓慢上升,而 GWSA 除区域中部与西部外基本呈上升趋势,这是由于珠三角与粤西地区的地下水资源开发程度较高<sup>[35-36]</sup>,导致该区域地下水资源的储蓄功能受限。

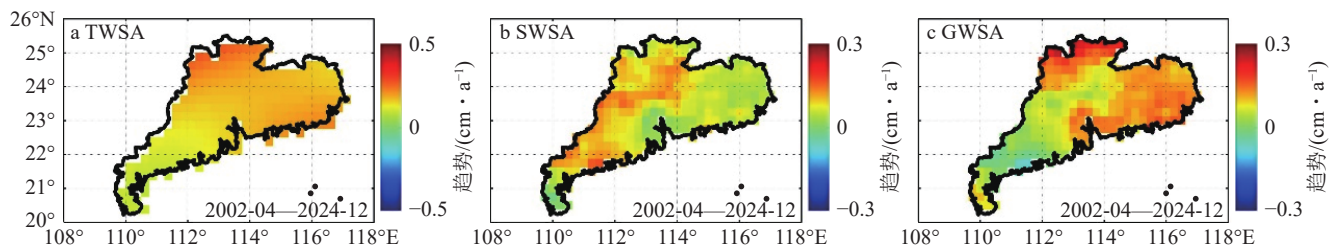


图 5 广东省 TWSA、SWSA、GWSA 年变化趋势的空间变化

而在时间变化方面,图 6 给出了广东省 TWSA、SWSA、GWSA 的时间变化,表 3 综合统计了各水储量变化的趋势、 $\sigma_{\text{RMSE}}$  与相关系数。结果显示在 2002-02—2024-12 期间,广东省 TWSA 整体以  $(0.19\pm0.09)\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$  的速率呈上升趋势,其中 SWSA 与 GWSA 的上升速率分别达到  $(0.06\pm0.06)$  与  $(0.13\pm0.06)\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,其中 TWSA 与 SWSA、GWSA 的  $\sigma_{\text{RMSE}}$  分别达到 5.10 和 5.20 cm,且相关系数分别达到 0.72 和 0.69。

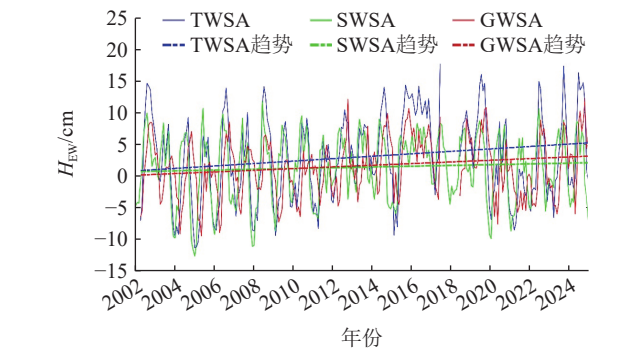


图 6 广东省 TWSA、SWSA、GWSA 的时间变化

表 3 水储量变化的趋势、 $\sigma_{\text{RMSE}}$  与相关系数

| 水储量变化 | 趋势/( $\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ) | $\sigma_{\text{RMSE}}$ /cm | 相关系数 |
|-------|--------------------------------------|----------------------------|------|
| TWSA  | $0.19\pm0.09$                        | —                          | —    |
| SWSA  | $0.06\pm0.06$                        | 5.10                       | 0.72 |
| GWSA  | $0.13\pm0.06$                        | 5.20                       | 0.69 |

3.3 驱动因素分析

针对广东省水储量变化的驱动因素,本文收集了降水量、气温、潜在蒸散及用水量等数据,综合利用偏最小二乘回归与多元逐步回归方法对广东省 TWSA、SWSA 及 GWSA 进行驱动因素分析。其中图 7 给出了各水储量与多源驱动因素的年际变化;表 4 统计了驱动因素与各水储量变化的投影重要性  $I_{\text{VP}}$ ;图 8 展示了驱动因素对于水储量变化的相对贡献率。

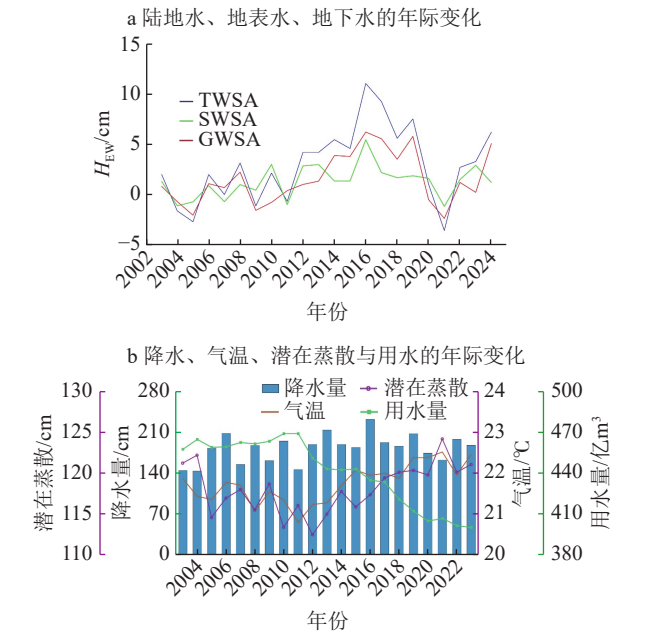


图 7 广东省水储量与多源驱动因素的年际变化

表 4 投影重要性  $I_{\text{VP}}$

| 水储量类型 | 降水量  | 气温   | 潜在蒸散 | 用水量  |
|-------|------|------|------|------|
| TWSA  | 1.08 | 0.32 | 0.46 | 0.56 |
| SWSA  | 1.17 | 0.29 | 0.43 | 0.46 |
| GWSA  | 0.91 | 0.29 | 0.59 | 0.64 |

在自然因素方面,表 4 与图 8 结果表明:各水储量变化与气象因素的  $I_{\text{VP}}$  与相对贡献率从高到低依次为降水、潜在蒸散与气温,说明降水是各水储量变化的主要驱动因素,其中主要作用于 SWSA;而潜在蒸散量少于降水量,加上蒸散比气温更能直接作用于水储量变化,综合导致潜在蒸散对于水储量变化的驱动影响程度低于降水而高于气温,其对于 GWSA 的  $I_{\text{VP}}$  与相对贡献率较高,据《广东省地下水功能区划》得知省内浅层地下水功能区占总功能区的 96.6%,而浅

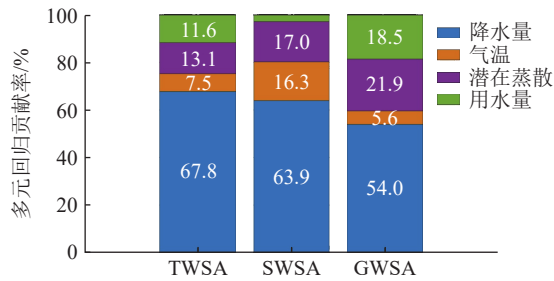


图8 多元线性回归的相对贡献率

层地下水的埋深低导致其受到潜在蒸散的驱动影响较大。结合图7水储量与气象因素的年际变化进行比较,发现降水在2016年达到历年最高,2004、2011与2021等年份降水量显著偏低,且潜在蒸散在2021年达到顶峰,同年各水储量变化均具有良好的对应关系。而在人为因素方面,表4与图8结果表明,用水

量对于GWSA的 $I_{VP}$ 与相对贡献率较高,分别达到0.64与18.5%。从长期看,用水量在2003—2011年处于较高水平(图7),其间GWSA均值较全时段均值偏低1.56 cm;而在2011—2019年用水量持续下降,其间GWSA整体水平缓慢提高,说明人类用水包含了大量的地下水资源,二者的年际变化呈现负相关。

### 3.4 极端旱涝事件识别

鉴于降水是驱动广东省TWSA的主要因素,本文从月的时间尺度进一步探究了降水与TWSA之间的关联性。通过相位计算得知卫星重力滞后于实际降水约1个月,以此为前提条件,分别基于GRACE模型反演数据与降水量数据计算干旱指数GRACE-DSI<sup>[37]</sup>与标准化降水指数SPI<sup>[38]</sup>,上述指数的时间变化如图9-a所示。

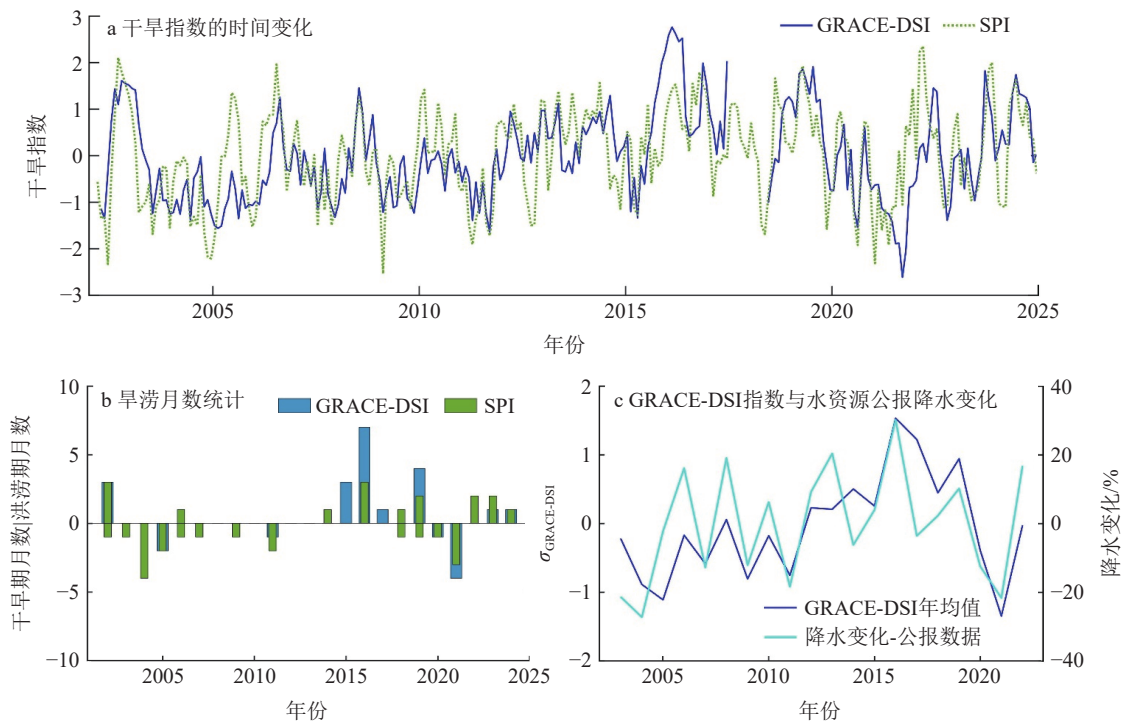


图9 干旱指数结果统计及公报数据比较

同时,本文以指数 $<-1.5$ 时作为干旱期, $>1.5$ 时则作为洪涝期,分别统计了广东省每年的显著旱涝月数得到图9-b。此外,本文添加了水资源公报的年降水变化作为实测数据对GRACE-DSI年均值进行对比分析得到图9-c,协同探讨了GRACE-DSI指数监测显著旱涝事件的可行性。

首先在时间变化对比方面,图9-a显示GRACE-DSI与SPI指数在研究时段内的月尺度升降情况具有一定的吻合度,同时图9-c反映GRACE-DSI指数的年旱涝变化情况与公报数据较为一致,经相关性分析计算得知,GRACE-DSI与SPI指数及公报降水变化的相

关系数分别达到0.56与0.64,为GRACE-DSI与SPI及公报降水变化的良好相关性提供了数据支撑。此外,由图9-b可见不同指数的旱涝月数统计结果,本文经过数学统计得知GRACE-DSI与SPI指数反映的共同干旱有14个月,总干旱月数达27个月;共同洪涝月数有20个月,总洪涝月数达32个月(统计月数含重复月份)。通过计算共同洪涝与总洪涝月数比值,得知GRACE-DSI与SPI指数在干旱和洪涝事件中的吻合度分别达到51.9%和62.5%。

在极端旱涝事件的识别能力上,本文以SPI指数出现2月及以上旱涝的年份作为极端旱涝年份,同时

结合水资源公报统计了极端旱涝年份的降水变化及其旱涝类型得到表 5。表 5 统计结果表明, GRACE-DSI 指数在极端旱涝年份出现旱涝事件的占比达到 75%, 并且该指数与公报数据的降水量变化及旱涝类型具有良好的对应关系, 其主要差异在于 GRACE-DSI 指数未识别出 2004 枯水年的极端干旱, 而经数学统计得知 GRACE-DSI 指数在当年 5 月的值 $<-1.0$ , 这表明 GRACE-DSI 指数仍捕捉到了 2004 年全省水储量持续处于低位的状态。

表 5 极端旱涝月数与水资源公报数据统计

| 年份   | SPI | GRACE-DSI | 水资源公报  |      |
|------|-----|-----------|--------|------|
|      |     |           | 降水变化/% | 旱涝类型 |
| 2002 | +3  | +3        | 3.63   | 平水年  |
| 2004 | -4  | 0         | -27.26 | 枯水年  |
| 2005 | -2  | -2        | -2.28  | 平水年  |
| 2011 | -2  | -1        | -18.39 | 偏枯水年 |
| 2016 | +3  | +7        | 30.25  | 丰水年  |
| 2019 | +2  | +4        | 10.20  | 偏丰水年 |
| 2021 | -3  | -4        | -21.67 | 枯水年  |
| 2022 | +2  | 0         | 16.78  | 偏丰水年 |

注: 指数“+”表示极端洪涝月数, “-”表示极端干旱月数; 水资源公报统计了降水量较2002—2022年均值的偏离值。

整体说明, 基于 GRACE/GRACE-FO 时变重力场模型计算的干旱指数 GRACE-DSI 可有效识别广东省的极端旱涝事件, 为全省月时间尺度的旱涝监测应用提供一定的数据参考。

4 结论

本文综合利用时变重力场模型、GLDAS 模型、实测地下水数据与其他水文资料等数据探究了广东省 TWSA、SWSA、GWSA 在 2002-04—2024-12 期间的时空变化及其驱动因素, 为全省水资源基础调查提供了大尺度范围的数据参考, 结果表明:

- 1)广东省东部与北部 TWSA 呈上升趋势, 整体上升速率达到 $(0.19\pm0.09)\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ , 其在相对变化率方面与公报数据的吻合度达到 72.4%; 而 GWSA 在中部与西部因水资源开发而储蓄受限, 其与实测 GWSA 的相关系数达到 0.73。
- 2)降水是造成广东省水储量变化的主导因素, 其对于 SWSA 的 $I_{vp}$ 值与贡献率较高, 而潜在蒸散则与人类用水量对于 GWSA 的关联度较高且呈负相关。
- 3)GRACE-DSI 与 SPI 指数的相关系数达到 0.56, 且二者识别广东省极端干旱与洪涝事件的吻合度可

分别达到 51.9% 与 62.5%, 有效反映出水资源公报记录丰枯水年份的降水变化。

**致谢** 感谢中国城市规划学会城市感知学术专班对本工作的支持!

5 参考文献

[1] 肖柳斯, 张华龙, 吴乃庚, 等. 广东省汛期分钟尺度极端降水的时空分布及持续性特征 [J]. 大气科学, 2024, 48(5): 1728

[2] 陈子燊, 黄强, 刘曾美. 1962—2007 年广东干湿时空变化特征分析 [J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 469

[3] 赵玲玲, 夏军, 杨芳, 等. 粤港澳大湾区水生态修复及展望 [J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5054

[4] 中华人民共和国自然资源部. 水资源基础调查实施方案 [EB/OL]. (2024-03-11) [2025-08-15]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content\\_6939730.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6939730.htm).

[5] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30205

[6] 丁一航, 黄丁发, 姜中山, 等. 利用 GRACE 研究我国四大流域陆地水储量循环周期 [J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(6): 603

[7] 陈智伟, 张兴福, 冉将军, 等. 利用新版 GRACE 时变模型反演珠江流域陆地水储量变化 [J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(3): 305

[8] Huang Z Y, Jiao J J, Luo X, et al. Drought and flood characterization and connection to climate variability in the Pearl River basin in Southern China using long-term GRACE and reanalysis data[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(6): 2053

[9] 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

[10] Zhang L, Shen Y Z, Chen Q J, et al. Influence factors and mechanisms of 2015–2016 extreme flood in Pearl River basin based on the WSDI from GRACE[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 47: 101376

[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] Ji R K, Wang C, Cui A X, et al. Assessing terrestrial water storage dynamics and multiple factors driving forces in China from 2005 to 2020[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122464

- [13] 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
- [14] Yang W T, Long D, Scanlon B R, et al. Human intervention will stabilize groundwater storage across the North China Plain[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(2): e2021WR030884
- [15] Zhang G Q, Xu T R, Yin W J, et al. A machine learning downscaling framework based on a physically constrained sliding window technique for improving resolution of global water storage anomaly[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 313: 114359
- [16] Mayer-Gürr T, Behzadpur S, Ellmer M, et al. ITSG-Grace2018: monthly, daily and static gravity field solutions from GRACE[DS/OL]. (2018-12-04) [2025-08-28]. <https://icgem.gfz-potsdam.de/sl/temporal/>
- [17] 中国地质环境监测院. 中国地质环境监测地下水位年鉴[M]. 北京: 中国大地出版社. 2023
- [18] 彭守璋. 中国 1km 逐月潜在蒸散发数据集(1901—2024)[DS/OL]. (2025-07-02) [2025-08-20]. <https://www.tpd.c.ac.cn/zh-hans/data/>
- [19] 广东省水利厅. 广东省水资源公报[R/OL], (2023-06-07) [2025-08-15]. <http://www.gdhw.gov.cn/swhfwj/attachment/0/47/47736/927669.pdf>
- [20] 广东省统计局. 广东省统计年鉴[R/OL], (2024-12-18) [2025-08-15]. <https://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/index.html>
- [21] Cheng M K, Ries J C, Tapley B D. Variations of the Earth's figure axis from satellite laser ranging and GRACE[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B1): 1409
- [22] 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
- [23] Chambers D P, Wahr J, Tamisiea M E, et al. Ocean mass from GRACE and glacial isostatic adjustment[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B11): 2010JB007530
- [24] Jekeli. Alternative methods to smooth the Earth's gravity field[D]. Columbus: Ohio State University, 1981
- [25] Swenson S, Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8): 2005GL025285
- [26] Landerer F W, Swenson S C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(4): 2011WR011453
- [27] Yi S, Sneeuw N. Filling the data gaps within GRACE missions using singular spectrum analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(5): e2020JB021227
- [28] Su Y Z, Guo B, Zhou Z T, et al. Spatio-temporal variations in groundwater revealed by GRACE and its driving factors in the Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 922
- [29] Chen X H, Jiang J B, Lei T J, et al. GRACE satellite monitoring and driving factors analysis of groundwater storage under high-intensity coal mining conditions: a case study of Ordos, northern Shaanxi and Shanxi, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(2): 673
- [30] 禚键豪, 张兴福, 陈鑑华, 等. 利用 COST-G GRACE 时变模型反演黄土高原陆地水储量变化[J]. *大地测量与地球动力学*, 2022, 42(5): 510
- [31] Yin W J, Zhang G Q, Liu F T, et al. Improving the spatial resolution of GRACE-based groundwater storage estimates using a machine learning algorithm and hydrological model[J]. *Hydrogeology Journal*, 2022, 30(3): 947
- [32] Sun Z H, Mao Z A, Yang L Y, et al. Impacts of climate change and afforestation on vegetation dynamic in the Mu Us Desert, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 108020
- [33] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Anaheim, Amer Meteor Soc, 1993: 179
- [34] Meyer U, Lasser M, Dahle C, et al. Combined monthly GRACE-FO gravity fields for a Global Gravity-based Groundwater Product[J]. *Geophysical Journal International*, 2023, 236(1): 456
- [35] 赵良杰, 杨杨, 曹建文, 等. 珠江流域地下水资源评价及问题分析[J]. *中国地质*, 2021, 48(4): 1020
- [36] 申子通, 陈南祥, 贺新春. 珠江流域片地下水资源开发利用现状及保护对策分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(2): 37
- [37] Zhao M, Geruo A, Velicogna I, et al. Satellite observations of regional drought severity in the continental United States using GRACE-based terrestrial water storage changes[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(16): 6297
- [38] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(3): 429

# Monitoring spatio-temporal changes of terrestrial water storage in Guangdong province based on satellite gravity and analysis of driving factors

Ye Ruiming<sup>1, 2, 3)</sup>, Sun Weicheng<sup>1, 2, 3, 4, 5)</sup>, Gu Weijun<sup>1, 2, 3, 4)</sup>, Du Xiangfeng<sup>6)</sup>, Gong Guodong<sup>1, 2, 3, 4)</sup>

(1)Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong, China; 2)Collaborative Innovation Center for Natural Resources Planning and Marine Technology of Guangzhou, Guangzhou, Guangdong, China; 3)Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing Monitoring and Early Warning, Guangzhou, Guangdong, China; 4)Guangzhou Huadu Planning & Design Survey Institute Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong, China; 5)School of Civil Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong, China; 6)School of Surveying and Remote Sensing Information Engineering, Guangdong College of Industry and Commerce, Guangzhou, Guangdong, China)

**Abstract** Water resource is the core element for maintaining ecosystems and economic development. In recent years, China has actively carried out fundamental surveys of water resources to collect baseline hydrological data for regional water management. In this context, this study integrates GRACE/GRACE-FO, GLDAS and measured groundwater data to investigate spatio-temporal changes in terrestrial water storage (TWSA), surface water storage (SWSA), and groundwater storage (GWSA) in Guangdong province from April 2002 to December 2024. This study analyzes driving factors for changes in regional water storage using precipitation, temperature, potential evapotranspiration, and water consumption data. In Guangdong province, TWSA shows surpluses in eastern and northern regions, with an overall rate of change at  $(0.19 \pm 0.09) \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$  and a consistency of 72.4% in relative change rates compared to water resource bulletin data. GWSA saving function in central and western regions was limited by exploitation, and correlation coefficient between GWSA and measured groundwater changes reached 0.73. Driver analysis revealed that changes in terrestrial water storage correlated with meteorological factors in descending order of correlation strength: precipitation, potential evapotranspiration, and temperature, but exhibiting a negative correlation with water consumption. Regarding extreme drought and flood events monitoring, drought index GRACE-DSI and standardized precipitation index (SPI) reach 51.9% and 62.5% agreements respectively for identifying regional drought and flood events, and effectively reflected types of wet and dry years recorded in the water resource bulletin. These findings provide large-scale data references for fundamental surveys of water resources in Guangdong province.

**Keywords** GRACE; Guangdong province; terrestrial water storage; precipitation; drought index

【责任编辑:武 佳】