

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200314

基于GRACE重力卫星的珠江流域陆地水储量 时空变化研究

熊景华^{1,2}, 王兆礼¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510360;

2. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:在气候变化及人类活动日益剧烈的背景下,研究流域陆地水资源变化对理解水文循环过程和管理水资源具有重要意义。基于GRACE重力卫星数据研究了珠江流域2002~2017年陆地水储量异常(TWSA)的时空变化特征。结果表明:五套官方GRACE数据在珠江流域的相关性极强,且与GLDAS模拟值及各水文通量变化一致;珠江流域的TWSA呈现显著上升趋势,中游和下游北部增长速度最快,达7.9~10.2mm/a;空间上,各栅格的TWSA均表现出明显的季节性特征,且振幅从南到北、从西到东逐渐下降,除了个别年份,TWSA与实测降雨的空间质心体现了一致的分布和运动特点。GRACE数据在珠江流域具有较高适用性。

关键词:GRACE;陆地水储量;时空变化;珠江流域

中图分类号:P343

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)06-0033-007

0 引言

作为全球水循环的重要组成部分,陆地水储量变化(TWSA)是降雨、蒸发和径流等水文过程的综合反映。研究流域的陆地水储量变化有助于理解水文过程和管理水资源,对气候变化和人类活动不断加剧背景下的城市群水资源补给具有重要意义^[1]。

监测陆地水储量的主要方式包括水文站点、水文模型或陆面模式以及遥感卫星等。水文站点可以测量降水、径流和气温等水文气象通量,在水资源监测和水文模拟中发挥重要作用,但其只能提供点尺度的水文信息,无法分析整个流域的储水情况,此外,跨国界地区缺乏有效的水文记录,且监测标准的差异性和数据透明性的缺乏使得基于水文站点估算流域水资源变化更加困难^[2]。全球陆地表面模型和全球水文模型对包括流量和土壤水在内的水文要素进行模拟,但对于地形地质条件较复杂的地区,模型不确定性较

大,且无法考虑水库水资源调度的影响^[3]。遥感卫星为监测陆地水资源变化提供了另一种选择,通过光学遥感图像,不同深度的地表水资源量得以测量,而微波传感器可不受天气条件影响测量降雨强度和土壤水含量,遥感产品已广泛用于极端水文事件的监测^[4]。然而,光学或微波传感器难以测量完整的土壤水储量或地下水含量,导致无法获得流域陆地储水量的真实情况(TWS),即地表水、融雪水,冠层水,土壤和地下水储量的总和。

2002年发射的重力恢复和气候实验(GRACE)重力卫星监测TWSA时空分布的方法得到了发展。Syed等在全球尺度^[5]通过将GLDAS模拟的TWSA划分为积雪水,冠层水和土壤水分别与GRACE TWSA比较,验证了GRACE反演数据的精确度。国内方面,胡小工^[6]发现GRACE与GLDAS模拟的TWSA在长江流域呈现极高的一致性;海河流域的GRACE/GLDAS TWSA也保持了良好的相关关系^[7]。然而,很少有学者对TWSA

收稿日期:2020-08-11

基金项目:广东省科技计划项目(2020A0505100009),广东省水利科技创新项目(2020-29)

作者简介:熊景华(1998—),男,江西南昌人,硕士,主要研究方向为GRACE重力卫星。E-mail:xiongjh8_scut@163.com

通信作者:王兆礼(1979—),男,江苏徐州人,教授,主要研究方向为城市水文和水利信息化。E-mail:wangzhl@scut.edu.cn

与气候及水文因子之间的关系进行研究,从而分析引起TWSA变化的可能原因,且未考虑流域下垫面和气候条件的空间变异性。

本文基于GRACE数据反演珠江流域及其子流域2002~2017年的陆地水储量异常值,经过与GLDAS数据及各水文通量的对比分析后,基于时间序列分解和加权空间质心方法研究其时空变化特征。

1 数据和方法

1.1 GRACE数据

月尺度GRACE RL06重力场数据由美国德克萨斯大学空间研究中心(CSR)、德国波茨坦地球科学中心(GFZ)和美国宇航局喷气动力实验室(JPL)解算,空间分辨率为400km,本文使用的GRACE数据时间段为2002年4月~2017年6月,2010年开始设计寿命为5年的GRACE重力卫星进入运行末期,出现电池及设备老化问题,导致部分月份数据缺失,研究时段内有效数据共计163个月,为了还原数据缺失期间的陆地水储量,使用K最近邻方法对原始GRACE TWSA序列插补^[8]。本文将各GRACE产品的球谐系数截取到60阶,并扣除了非潮汐大气、非潮汐高频海洋信号、海潮、固体潮和固体极潮信号及冰后回弹效应等影响,半径为300 km的高斯滤波器和去相关滤波器应用以消除相关误差和噪声,信号泄露则通过尺度因子法还原^[9]。本研究共对比了五套不同的GRACE产品,包括由三个不同机构(CSR, GFZ, JPL)反演的球谐系数方案(RL 06),而基于集中质量瘤解算的mascon数据则来自CSR和JPL,不同机构处理的产品在背景模型校正及空间滤波器的选择上存在差异^[10]。

1.2 GLDAS数据

全球陆面数据同化系统(GLDAS-2.1)包含Noah、CLM、VIC三种水文模型和陆面模式,利用遥感卫星及地面观测站产品提供全球的水文和气象通量数据,GLDAS-2.1被广泛应用于GRACE数据的验证和分析,且取得了较好的效果,此外,Noah表现出相对其它三个模型与GRACE TWSA更强的相关性^[11]。本文选取时空分辨率分别为月和 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的水文模型Noah,数据时段与GRACE统一,通过Noah模拟的土壤水、冠层水、融雪水等效高度数据计算珠江流域陆地水储量等效水高,其计算见式(1)。

$$TWS = SnWS + CWS + SWS + SMS + GWS \quad (1)$$

式中: TWS为陆地水储量; SnWS为雪水存储量; CWS

为冠层水存储量; SWS为地表水存储; SMS为土壤水分存储量; GWS为地下水存储量。GLDAS TWS时间序列中减去2002~2017年的平均值得到GLDAS TWSA数据,计算见式(2)。

$$TWSA_i = TWS_i - \overline{TWS} \quad (2)$$

式中: $TWSA_i$ 为第*i*个月的GLDAS TWSA; TWS_i 为第*i*个月的GLDAS TWS; $\overline{TWS}$ 为2002年4月~2017年6月的GLDAS TWS平均值。此外径流和蒸发数据也参与了GRACE数据的对比研究。

1.3 时空分析方法

为了消除TWSA的季节性,估计其去季节项和趋势项的年际变化,使用基于局部回归的季节性趋势分解方法分解TWSA时间序列^[12]。采用加权空间质心方法研究珠江流域2002~2017年TWSA的空间分布和变化特征^[13]。首先将珠江流域的年度TWSA标准化:

$$STWSA_i = \frac{(TWSA_i - TWSA_{\min})}{(TWSA_{\max} - TWSA_{\min})} \quad (3)$$

式中: $STWSA_i$ 和 $TWSA_i$ 分别为珠江流域内某栅格归一化后的和原始的第*i*个TWSA时间序列值; $TWSA_{\max}$ 和 $TWSA_{\min}$ 分别是时间序列的最小值和最大值。基于归一化后的TWSA序列,某年珠江流域TWSA的加权空间质心的经纬度计算见式(4)。

$$C = \left\{ \frac{\sum_i^k W_i \cdot lon_i}{\sum_i^k W_i}, \frac{\sum_i^k W_i \cdot lat_i}{\sum_i^k W_i} \right\} \quad (4)$$

式中: C 为加权质心的坐标; lon_i 和 lat_i 分别为第*i*个栅格的经度和纬度; W_i 为该栅格对应的 $STWSA$; k 为珠江流域中栅格的总数。为了量化珠江流域TWSA加权空间质心的位移,分别计算其距离和方位的改变量,如下所示:

$$D_y = 2 \cdot R \cdot \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{lat_y - lat_{y-1}}{2} \right) + \cos(lat_{y-1}) \cdot \cos(lat_y) \cdot \sin^2 \left(\frac{lon_y - lon_{y-1}}{2} \right)} \right) \quad (5)$$

$$\theta_y = a \tan^2 \left(\frac{\sin(lon_y - lon_{y-1}) \cdot \cos(lat_{y-1}), \cos(lat_{y-1}) \cdot \sin(lon_y - lon_{y-1})}{\sin(lat_y) - \sin(lat_{y-1}) \cdot \cos(lon_y - lon_{y-1})} \right) \quad (6)$$

式中: D_y 和 θ_y 分别为第*y*年相对第(*y*-1)年的距离和方向改变; lat_y 和 lon_y 分别为第*y*年珠江流域TWSA质心的纬度和经度; lat_{y-1} 和 lon_{y-1} 分别为第(*y*-1)年珠江流域TWSA质心的经度和纬度;此时*y*=2003, 2004, 2005, ..., 2017。

2 结果分析与讨论

2.1 GRACE 数据精度验证

珠江流域 2002~2017 年 GRACE 产品之间的皮尔逊相关系数(r)均在 0.96 以上,CSR、GFZ 和 JPL 发布的 RL06 数据之间的相关系数均为 0.99,而 JPL mascon 产品 JPL mascon 产品与其它 GRACE 数据的差异性较大,反演方法、背景模型校准和空间滤波方法的差异共同造成 GRACE 产品的不确定度。图 1 显示了珠江流域及其子流域 2002~2017 年的 GRACE TWSA 和 GLDAS TWSA 变化情况和线性趋势。GRACE TWSA 和 GLDAS TWSA 均呈现上升趋势,而由于 GLDAS 仅模拟地表以下 0~200cm 的土壤水含量,GLDAS TWSA 的增长速率仅为 1.63mm/a 且未通过 0.05 的显著性水平检验,两者之间的 r 和纳西效率指数(NSE)分别为 0.70 和 0.48,一致性较高。除了蒸散发具有显著上升趋势,降雨、径流和气温均未体现显著上升趋势,可推测 TWSA 的增长可能与降雨和径流的快速上升有关。对于珠江子流域,上游 GLDAS TWSA 仅发现了不显著的 -0.42mm/a 的年际变化趋势,这可能是珠江上游复杂的地形、地质和气候条件导致的水文模型输出误差(见表 1);中游和下游 GLDAS TWSA 均体现了显著上升趋势,但仍低估了 GRACE TWSA 的增长速率。GRACE 和 GLDAS 估计的 TWSA 在子流域显示出更强的相关性($r/NSE=0.80/0.60, 0.82/0.67, 0.77/0.57$)。

2.2 GRACE TWSA 趋势分析

由图 2 可知,CSR mascon 和 JPL mascon 产品变化一致,两者相对 RL06 产品存在整体上 20mm 左右的高估偏差,其可能源于 mascon 方案对地下水储量的高估^[14]。由于 GRACE 服役初期轨道校准和末期电池老化造成的数据误差,GRACE TWSA 的不确定性除了在 2002 年初和 2016 年底小幅度上升,其它时间均稳定在 30mm 左右。

由表 2 可知,五种 GRACE 方案的线性回归和 MK 检验结果均通过 95% 显著性检验,证明经过时间序列分解的 GRACE TWSA 计算的线性变化率可靠。由于陈智伟等^[15]扣除了 GRACE 信号中的周年期信号和半年期信号,且仅对珠江流域 2005~2012 年的数据进行分析,其得出的变化速率(4mm/a)与本文具有一定差距。

由图 3 可知,使用 CSR、GFZ 和 JPL RL06 数据计算的变化率的空间分布基本相同,结合 MK 检验结果发现空间尺度上珠江流域 2002~2017 年的 TWSA 全面增

长,上游 TWSA 上升速度最慢,仅为 3.4~5.7mm/a,中游和下游呈现由北向南 TWSA 增长速率逐渐下降的情况,变化范围为 5.7~7.9mm/a,最大值出现在中游北部,

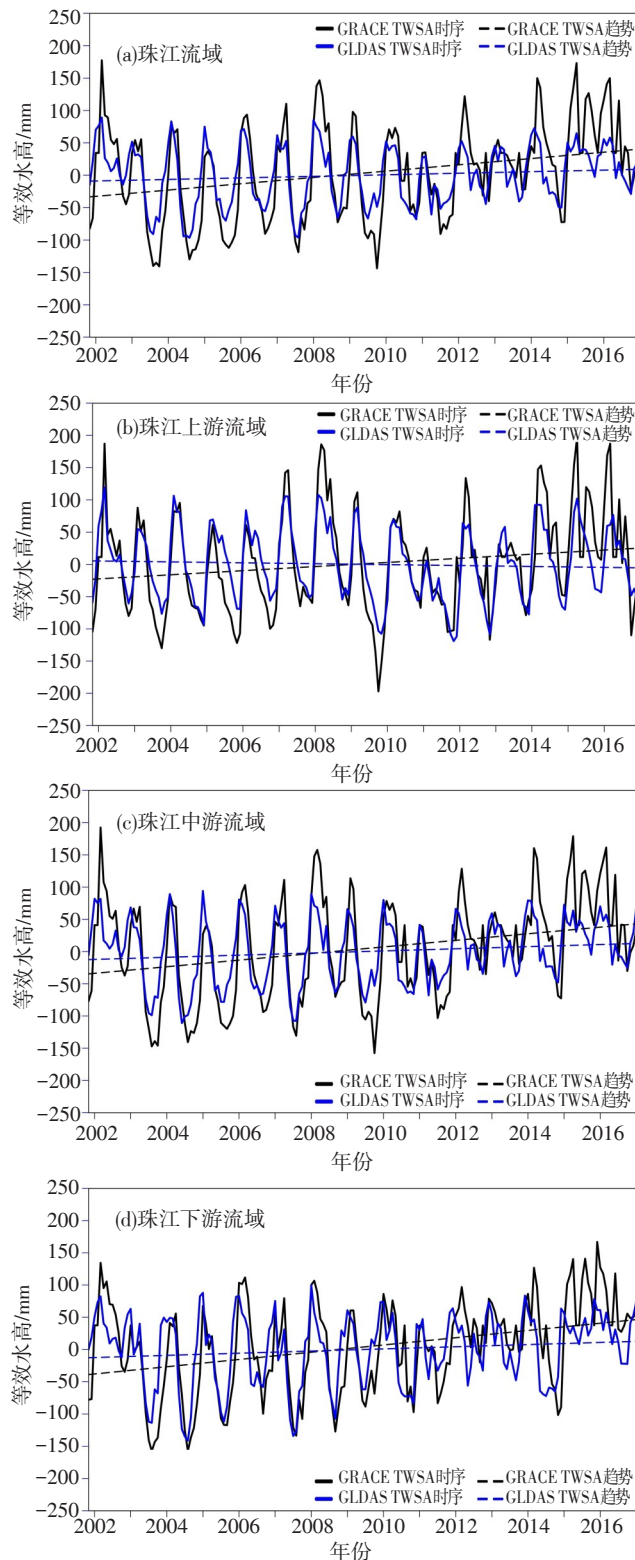


图1 珠江流域及其子流域2002~2017年GRACE TWSA/GLDAS TWSA对比

Fig.1 Comparison of GRACE TWSA/GLDAS TWSA in the Pearl River basin and its sub-basins during 2002–2017

表1 珠江流域及其子流域2002~2017年GRACE/GLDAS
TWSA和水文要素的趋势分析

Table1 Trend analysis of GRACE/GLDAS TWSA and
hydrological factors in the Pearl River basin and its sub-
basins during 2002–2017

流域	参数	单位	变化率	p 值
珠江流域	陆地水储量距平值(GRACE)	mm/a	5.58	0.01
	陆地水储量距平值(GLDAS)	mm/a	1.63	0.12
	土壤水含量	mm/a	1.58	0.12
	径流	mm/a	1.19	0.20
	气温	℃/a	0.03	0.34
	降雨	mm/a	1.33	0.21
	蒸散发	mm/a	0.69	0.00
珠江上游 流域	陆地水储量距平值(GRACE)	mm/a	3.57	0.11
	陆地水储量距平值(GLDAS)	mm/a	-0.42	0.75
	土壤水含量	mm/a	-0.50	0.68
	径流	mm/a	0.58	0.42
	气温	℃/a	0.38	0.13
	降雨	mm/a	0.23	0.75
	蒸散发	mm/a	0.23	0.08
珠江中游 流域	陆地水储量距平值(GRACE)	mm/a	6.18	0.01
	陆地水储量距平值(GLDAS)	mm/a	2.15	0.07
	土壤水含量	mm/a	2.08	0.07
	径流	mm/a	1.15	0.25
	气温	℃/a	0.03	0.39
	降雨	mm/a	1.31	0.23
	蒸散发	mm/a	0.74	0.00
珠江下游 流域	陆地水储量距平值(GRACE)	mm/a	5.74	0.02
	陆地水储量距平值(GLDAS)	mm/a	2.05	0.11
	土壤水含量	mm/a	2.07	0.08
	径流	mm/a	1.79	0.15
	气温	℃/a	0.02	0.53
	降雨	mm/a	26.98	0.20
	蒸散发	mm/a	0.96	0.00

注: 所有水文因子均已减去2002.4~2017.6时段的平均值,表中p值表示
线性回归t检验的统计量,其小于0.05时认为趋势显著。

表2 2002~2017年珠江流域GRACE产品的线性回归和
MK检验结果

Table2 Linear regression and MK test results of GRACE
solutions in the Pearl River basin during 2002–2017

GRACE 方案	趋势(等效水 量)/km ³ /a	变化率(TWSA) /mm/a	p值	M-K统计量	p值
CSR RL06	2.54	6.48	0.00	3.17	0.00
GFZ RL06	2.39	6.08	0.00	3.27	0.00
JPL RL06	2.61	6.63	0.00	3.37	0.00
CSR mascon	1.93	4.90	0.00	2.97	0.00
JPL mascon	2.04	5.19	0.00	2.77	0.01

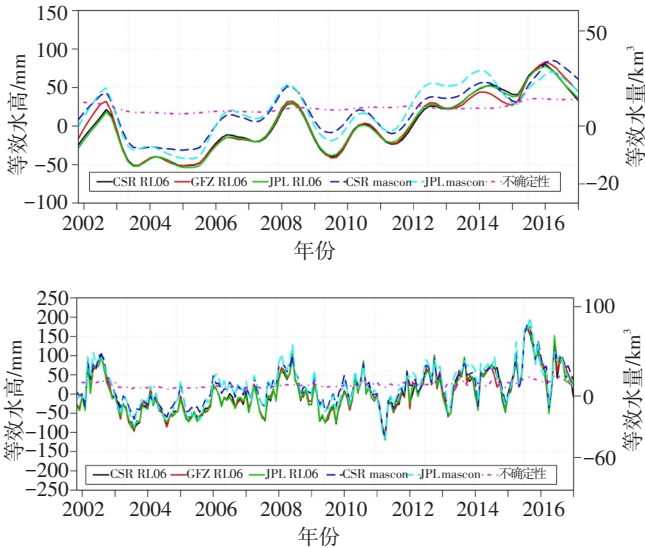


图2 2002~2017年珠江流域GRACE产品的去季节项、趋势项及其不确定性
Fig.2 De-seasonalized tendency items and uncertainty of GRACE
solutions in the Pearl River basin during 2002–2017

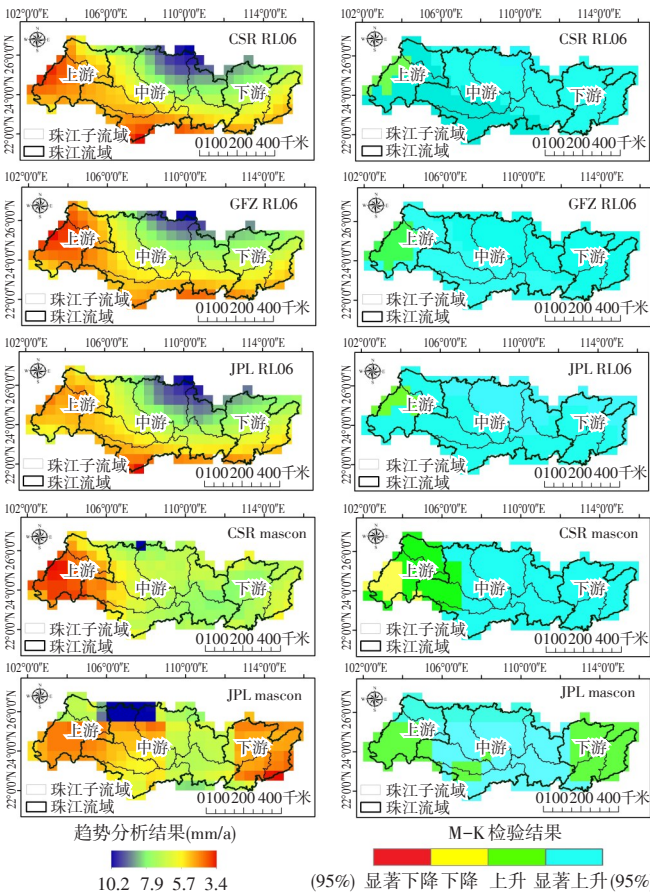


图3 珠江流域不同GRACE数据的线性趋势及M-K检验结果的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of linear trend and M-K value of GRACE TWSA
in the Pearl River basin during 2002–2017

即贺桂江流域和柳江流域,下游北江流域出现了局部的
增长高峰,该空间分布可能与云贵高原2003年、2009年
和2010年的干旱及北江、西江流域2006、2008和2016

年发生的20、50和100年一遇洪灾有关^[16]。纬度方向上, *TWSA* 的增长速度自中游向上下游逐渐减缓, 甚至在北盘江流域出现了下降的趋势, 其由喜马拉雅山的 *TWSA* 下降和印度西北部地下水的严重耗竭导致^[17]; 下游珠江三角洲流域 *TWSA* 增幅较小, 由于该地区剧烈的人类活动: 如疏通洪水、挖掘沙石和修建水利设施等, 改变了当地的水文条件, 从而削弱了河流缓冲洪水的能力, 此外, 过快的城市化进程增加了生活和工业用水需求^[18]。

2.3 GRACE *TWSA* 空间分析

珠江流域各个栅格 2002~2017 年的 GRACE *TWSA* 均体现了明显的季节性特征, 在干季和湿季具有不同的空间分布模式, 且振幅从南到北、从西到东减小(见图4)。 *TWSA* 随每年 5~10 月的降水增加而上升, 并从 11 月至来年 4 月逐渐减少, 在空间上与珠江流域 2003 年全年、2009 年 9 月~2010 年 5 月和 2011 年 8 月发生的极端干旱, 及 2006 年 4~9 月、2008 年 4 月~12 月和 2016 年 6 月的严重洪涝事件相符合。

珠江流域 2002~2016 年的 GRACE/GLDAS *TWSA* 和降雨的加权空间质心分布如图 5 所示。CSR、GFZ、JPL RL06 和 CSR mascon 数据的加权质心空间分布一致, 而 JPL mascon 数据的质心运动范围相对其它 GRACE 产品更小, 存在一定的差异性, 与趋势分析结论一致。基于 GRACE *TWSA* 计算的质心说明位置珠江流域内的陆地水储量主要集中于中游珠江流域部分, 且沿东西方向运动, 其分布与当年发生的极端水文事件相对应, 如 2003~2004 年珠江流域上游云贵高原地区历史最严重干旱和 2005、2006、2016 年珠江中游流域性大洪水等。除了 2006 年、2007 年等个别年份偏差较大, GLDAS *TWSA* 质心的空间坐标及运动模式和 GRACE 方案具有良好的一致性, 而作为 GLDAS 陆面模式的降雨驱动数据, TRMM 3B43 产品的质心分布与 GLDAS 具有类似的空间分布特点, 即质心波动范围相对 GRACE 数据更为集中且主要分布在珠江流域中游地区, 总体而言降雨与 *TWSA* 数据具有一定的空间相似性, 而前者的时空变异性与全球海温场内外强迫波动有关, 学者已经证明了 ENSO、NAO 和 PDO 等多种气候指标对珠江流域降水的时空特征演变具有重要作用^[19]。以方向和距离的变化量化 *TWSA* 和降雨质心的运动过程(见图6), 发现除了 2004 年, *TWSA* 与降雨数据质心在珠江流域内东南方向(20°~30°)以 50~400km 的距离来回运动, 体现了水文要素的周期性, 在 2009 年和 2014 年降雨相对 *TWSA* 出现滞后现象, 与当年发生的极端水文事件有关。

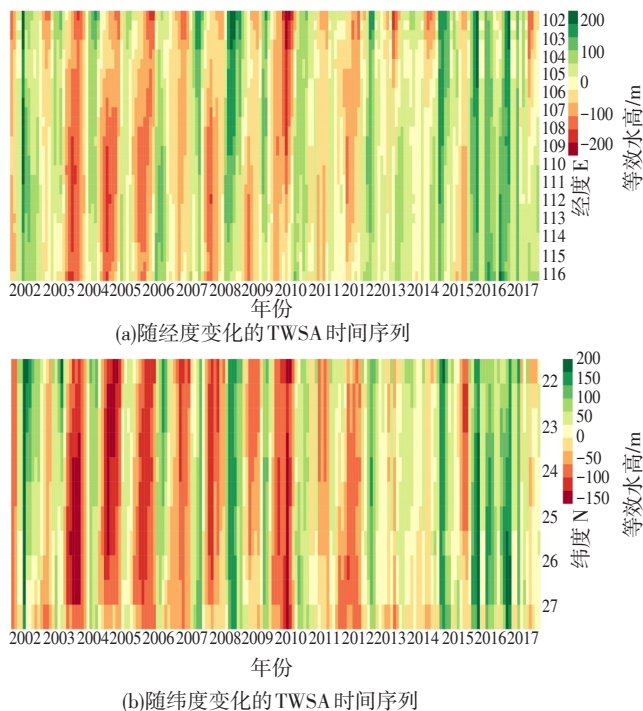


图4 2002~2017年珠江流域GRACE *TWSA* 各经纬度均值时间序列

Fig.4 The time series of averaged longitudes and latitudes of GRACE *TWSA* in the Pearl River basin during 2002–2017

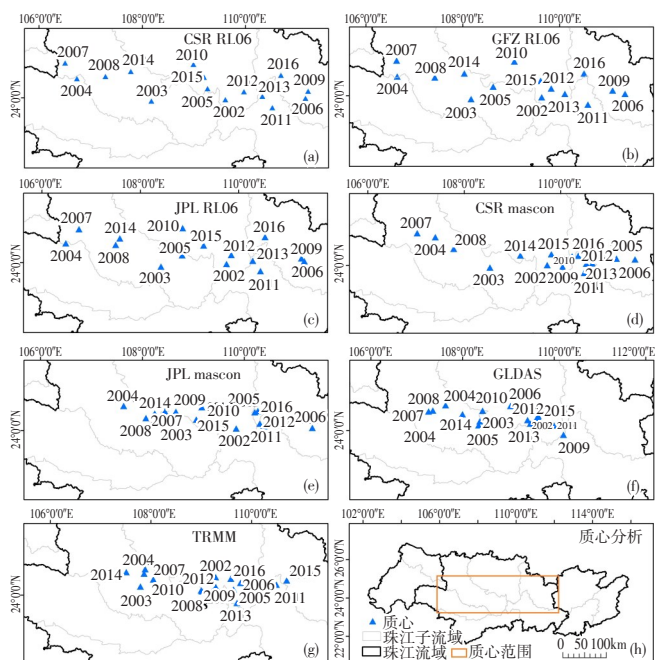


图5 珠江流域及其子流域2002~2016年GRACE/GLDAS *TWSA* 和降雨 (TRMM 3B43) 的空间质心分布

Fig.5 Spatial centroid of GRACE/GLDAS *TWSA* and rainfall (TRMM 3B43) in the Pearl River basin and its sub-basins during 2002–2016

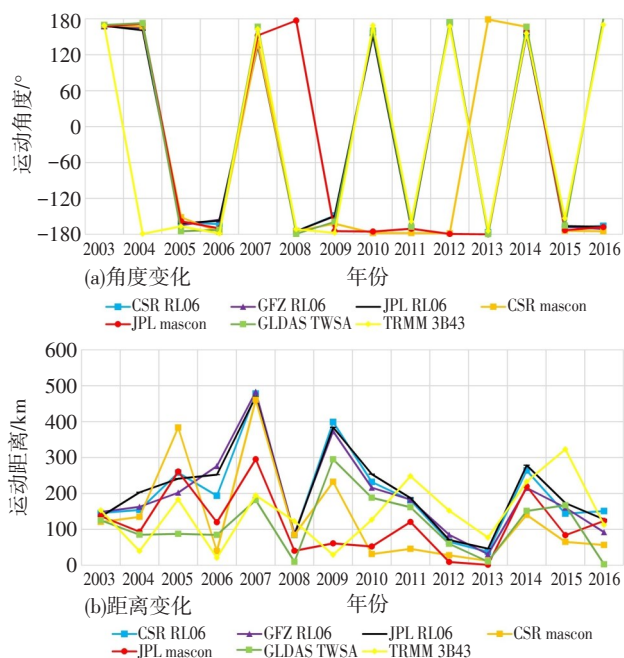


图6 珠江流域2002~2016年GRACE/GLDAS TWSA及降水 (TRMM 3B43)空间质心变化

Fig.6 Changes in the spatial centroid of GRACE/GLDAS TWSA and precipitation (TRMM 3B43) during 2002–2016 in the Pearl River basin

2.4 与之前研究结果对比

陈智伟等^[15]利用8种不同的GRACE时变重力场模型反演珠江流域2005年1月~2012年12月的陆地水储量变化,发现珠江流域陆地水储量经历了先增长(2005-01~2008-12)、后下降(2009-01~2009-12)、再回升(2010-01~2012-12)3个状态,与本文发现的结果一致。陈智伟等发现在2005~2012年珠江流域陆地水储量以4.0 mm/a的速度增长,小于本文得到的结果(4.90~6.63mm/a),原因是其将GRACE TWSA拟合为谐波信号并且扣除了一年振幅和半年振幅后的时间序列后进行直线拟合,从而造成了信号的损失。罗志才等^[20]也在珠江流域做了相关研究,其发现珠江流域内大部分区域的TWSA以2~12mm/a的速率上升,但在上游区域出现了-2.5mm/a的下降趋势,与本文趋势分析和MK检验的结果一致。龙笛^[21]使用滑动平均法在发现珠江流域在2000~2005年、2005~2008年和2008~2010年的变化趋势分别为-18.1mm/a、31.0mm/a和-45.1mm/a,与本文图1中观察到的变化规律类似。

3 结论

(1)GRACWTWSA与GLDASTWSA($r/NSE=0.70/0.48$)

及各水文通量之间体现了较强的相关性,珠江流域的GRACE数据具有一定适用性。

(2)珠江流域内不同的GRACE产品呈现了4.90~6.63mm/a的显著上升趋势,且TWSA的增加速度由北至南逐渐下降,速率在3.4~10.2mm/a之间变化。

(3)珠江流域各栅格的TWSA均表现了明显的季节性特征,并且振幅从南到北、从西到东减小。除了2004年、2009年和2014年等个别年份偏差较大,TWSA与降雨的空间质心分布具有良好的一致性,且在珠江流域东南方向(20°~30°)以50~400km的距离反复运动。

参考文献:

- [1] 王兆礼,陈晓宏,张灵,等. 近40年来珠江流域降水量的时空演变特征[J]. 水文, 2006(6):71-75. (WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, ZHANG Ling, et al. Spatiotemporal evolution of precipitation in the Pearl River Basin in the past 40 years [J]. Journal of China Hydrology, 2006(6):71-75. (in Chinese))
- [2] Feng Yan, Wang Wenling, Suman Danie, et al. Water cooperation priorities in the Lancang-Mekong River basin based on cooperative events since the Mekong River commission establishment [J]. Chinese Geographical Science, 2019,29(1):58-69.
- [3] Scanlon B R, Zhang Z, Save H, et al. Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,115(6):1080-1089.
- [4] 许厚泽. 卫星重力研究:21世纪大地测量研究的新热点[J]. 测绘科学, 2001,26(3):1-3. (XU Houze. Satellite gravity research: a new hot spot in geodetic research in the 21st century [J]. Science of Surveying and Mapping, 2001,26(3):1-3. (in Chinese))
- [5] Syed T H, Famiglietti J S, Rodell M, et al. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS [J]. Water Resources Research, 2008,44(2):W02433.
- [6] 胡小工,陈剑利,周永宏,等. 利用GRACE空间重力测量监测长江流域水储量的季节性变化[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2006(3):225-232. (HU Xiaogong, CHEN Jianli, ZHOU Yonghong, et al. Using GRACE space gravity measurement to monitor seasonal changes of water reserves in the Yangtze River basin [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2006(3):225-232. (in Chinese))
- [7] 冉全,潘云,王一如,等. GRACE卫星数据在海河流域地下水年开采量估算中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2013,33(2):42-46+67. (RAN Quan, PAN Yun, WANG Yiru, et al. Application of GRACE satellite data in the estimation of annual groundwater exploitation in the Haihe River basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013,33(2):42-46+67. (in Chinese))
- [8] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results [J]. Geophysical Research Letters, 2004,31(9):L09607.

- [9] Long D, Longuevergne L, Scanlon B R. Global analysis of approaches for deriving total water storage changes from GRACE satellites [J]. *Water Resources Research*, 2015,51(4):2574–2594.
- [10] Watkins M M, Wiese D N, Yuan D N, et al. Improved methods for observing earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2015,120(4):2648–2671.
- [11] Gu X, Zhang Q, Li J, et al. Attribution of global soil moisture drying to human activities: a quantitative viewpoint [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019,46(5):2573–2582.
- [12] 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.
- [13] BRACKEN I, MARTIN D. The generation of spatial population distributions from census centroid data [J]. *Environ Plan A*, 1989,21(4):537–543.
- [14] Nie W, Zaitchik B F, Rodell M, et al. Assimilating GRACE into a land surface model in the presence of an irrigation-induced groundwater trend [J]. *Water Resources Research*, 2019,55(12):11274–11294.
- [15] 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):305–310. (CHEN Zhiwei, ZHANG Xingfu, RAN Jiangjun, et al. Inversion of changes in land water reserves in the Pearl River basin using the new GRACE time-varying model [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020,40(3):305–310. (in Chinese))
- [16] Huang Y, Wang H, Xiao W, et al. Spatiotemporal characteristics of precipitation concentration and the possible links of precipitation to monsoons in China from 1960 to 2015 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019,138(1-2):135–152.
- [17] Lapworth D J, Macdonald A M, Krishan G, et al. Groundwater recharge and age-depth profiles of intensively exploited groundwater resources in northwest India [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015,42(18):7554–7562.
- [18] Zhang H, Wei-chun M, Xiang-rong W. Rapid urbanization and implications for flood risk management in Hinterland of the Pearl River Delta, China: The Foshan study [J]. *Sensors*, 2008,8(4):2223–2239.
- [19] 黄翀,张强,陈晓宏,等. 珠江流域降水干湿时空特征及气候因子影响研究[J]. *水文*, 2017(37):12–20+59. (HUANG Chong, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Spatio-temporal variations of dryness/wetness and influence from climate factors in Pearl River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2017(37):12–20+59. (in Chinese))
- [20] Luo Z, Yao C, Li Q, et al. Terrestrial water storage changes over the Pearl River basin from GRACE and connections with Pacific climate variability [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2016,7(3):171–179.
- [21] Long D, Shen Y, Sun A, et al. Drought and flood monitoring for a large karst plateau in Southwest China using extended GRACE data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014,155(1):145–160.

Spatiotemporal Changes of Terrestrial Water Storage in the Pearl River Basin Based on GRACE Data

XIONG Jinghua^{1,2}, WANG Zhaoli¹

(1. *School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510360, China;*

2. *School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: With intensifying climate change and human activities, detecting the spatial and temporal variation of terrestrial water storage in basin scale is of great significance for understanding the hydrological cycle and managing water resources. Based on GRACE data, this paper studied the temporal and spatial change characteristics of terrestrial water storage anomaly (*TWSA*) in the Pearl River basin from 2002 to 2017. The results show that: five GRACE products present strong correlation in the basin, and are consistent with GLDAS-simulated multiply hydrological fluxes; *TWSA* shows a significant upward trend. The middle reaches and the northern part of the lower reaches have the fastest growth rate of 7.9–10.2mm/a; Spatially, *TWSA* of each grid illustrates obvious seasonal characteristics, and the amplitude gradually decreases from south to north and west to east, respectively. The centroids of *TWSA* and in-situ rainfall reflect similar spatial distribution and movement characteristics. GRACE data show high applicability in the basin.

Key words: GRACE; terrestrial water storage; spatiotemporal change; Pearl River basin