文章编号:1005-0523(2022)05-0045-07

基于卫星重力时变重力场的陆地水储量变化研究

黄征凯[1],赵泽惠[1],温志强[2],聂启祥[1],王海城[3]

(1. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013; 2. 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049;
3. 河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司,天津 300250)

摘要:利用卫星重力技术监测全球陆地水储量变化(TWSC)兼具重要的实用价值和科学研究意义。基于GRACE(Gravity recovery and climate experiment)时变重力场模型研究了2002—2020年全球部分流域水储量变化,并探讨了气候和人为因素对区域水储量变化的影响。研究结果显示:地理区域相近流域的水储量时间序列具有相似的周期和振幅,而位于南北半球的临近流域水储量变化则呈现了相反的周期信号;墨累-达令流域内的水储量受到降水和蒸发共同影响,而印度河-恒河流域由于过度抽取地下水造成流域水储量不断下降; 亚马逊流域内的GARCE和GLDAS (Global land data assimilation systems)反演水储量变化的相关性达到0.86,同时发现GRACE在探测区域干旱事件方面有独特的优势。

关键词:重力恢复和气候实验;陆地水储量;等效水高;厄尔尼诺-南方涛动

中图分类号:P228 **文献标志码**:A

本文引用格式:黄征凯,赵泽惠,温志强,等. 基于卫星重力时变重力场的陆地水储量变化研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(5):45-51.

Research on the Terrestrial Water Storage Changes Based on Gravity Time-Varying Gravity Field

Huang Zhengkai[1], Zhao Zehui[1], Wen Zhiqiang[2], Nie Qixiang[1], Wang Haicheng[3]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hebei Research Institute of Investigation and Design of Water Conservancy and Hydropower, Tianjin 300250, China)

Abstract: There are both important practical value and scientific research significance of monitoring the global terrestrial water storage change (TWSC) by satellite gravity technology. Based on the GRACE time-varying gravitational field model, this paper studies the TWSC of global typical river basins from 2002 to 2020, and discusses the influence of climate and human factors on the regional TWSC. The research results show that the TWSC in similar geographic regions have similar cycles and amplitudes, while the TWSC of adjacent watersheds located in the northern and southern hemispheres present opposite periodic signals. The TWSC in the Murray-Darling Basin is affected by precipitation and evaporation, while the Indus-Ganga River Basin has been declining due to excessive groundwater extraction. The correlation between GARCE and GLDAS acquired water storage changes in the Amazon basin reached 0.86. At the same time, it was found that GRACE has a unique advantage in detecting regional drought events.

收稿日期:2021-11-04
基金项目:国家自然科学基金项目(42104023);江西理工大学高层次人才科研启动项目(205200100564)

Key words: gravity recovery and climate experiment; terrestrial water storage; equivalent water heights(EWH); El Niño-southern Oscillation(ENSO)

Citation format:HUANG Z K,ZHAO Z H,WEN Z Q,et al. Research on the terrestrial water storage changes based on gravity time-varying gravity field[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(5):45-51.

随着全球人口迅速增长,人类对淡水资源的需求不断增加,监测全球水资源的动态变化,已成为应对水资源短缺问题的必要手段[1-2]。GRACE卫星计划的实施为全球水资源监测提供了新的方法,国内外学者陆续将其用于陆地水储量变化研究[3-5]。如李琼等[6]对中国西南地区干旱期间陆地水储量的变化进行研究,分析发现降雨量增加使得研究区域内陆地水储量上升,地表温度对水储量的变化具有负向影响。许民等[7]利用GRACE时变重力场数据结合陆面模型研究了2002—2010年长江流域的陆地水储量变化,且发现水储量与降水具有相同的周期变化信号。在全球气候变化的背景下,极端气候会加剧水储量的异常变化。Wang等[8]研究发现澳大利亚发生的干旱事件与印度洋-太平洋的气候密切相关,Tian等[9]研究了亚马逊流域的水储量受到气候驱动的影响,1998年和2016年发生的两次干旱事件均与厄尔尼诺现象有关。

论文基于GRACE时变重力场模型反演了全球部分典型流域的水储量变化信息,并以墨累-达令流域和印度河-恒河流域为例探讨了影响水储量变化的因素,最后通过GLDAS水文模型验证GRACE反演结果的可靠性。

1 基于GRACE数据反演陆地水储量

1.1 研究数据

GRACE重力卫星计划于2002年成功发射,轨道倾角约为89°,轨道高度大致为500 km。GRACE卫星系统是由距离220 km的两颗卫星组成,采用"低-低"卫星跟踪技术[10],即通过连续地监测卫星之间的距离变化进而反演得到重力场的时变部分。该研究使用了美国CSR(Center for Space Research)发布的最新GRACE和GRACEFollow-On数据集,此外还使用了国际权威研究机构发布的NCEP (national centers for environmental prediction),GLEAM [11](global land evaporation amsterdam model) 和GLDAS等水文模型数据,以及PDSI[12](palmer drought severity index)干旱指数和ENSO[13]气候指数,如表1所示。

表1 研究数据概况

Tab.1 The overview of study data

Data type	Resolution	Unit	Period
GRACE	0.25°×0.25°	cm	2002—2020
NCEP	0.5°×0.5°	mm	1979—Now
GLEAM	0.25°×0.25°	mm	1980—2020
GLDAS	0.25°×0.25°	mm	1979—Now
PDSI	0.5°×0.5°	\	1900—Now
ENSO index	\	\	1980—Now

1.2 GRACE反演陆地水储量变化原理

利用GRACE时变重力场解算的陆地重力变化在较短时间尺度上被认为是水重新分布引起的,基于GRACE数据解算等效水高 (equivalent water heights,EWH)的公式如下[14-15]

$$\Delta h(\theta,\varphi)=\frac{\alpha\rho_{ave}}{3\rho_{water}}\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{l}\bar{P}_l^m\cos\theta\,\frac{2l+1}{1+k_l}(\Delta C_l^m\cos m\varphi+\Delta S_l^m\sin m\varphi) \tag{1}$$

式中:Δh为等效水高,mm;θ和φ分别为待求点的经度和纬度;α为地球半径,km;ρ_{ave}和ρ_{water}分别为地球平均密度 (约5 517 kg/m^3) 和水的密度(1 000 kg/m^3);l和m分别为地球重力场的阶数和次数;$\bar{P}_l^m$为归一正则化缔合勒让德系数;k_l为负荷勒夫数;ΔC_l^m和ΔS_l^m分别为一组无量纲球谐系数变化量,等效水高乘以面积即得到水储量。

2 结果分析

2.1 全球典型流域的水储量变化

综合考虑纬度、海拔和气候等因素,选取全球分布的16个典型流域作为研究区域,依次为北美洲的麦肯齐河、密西西比河,南美洲的奥里诺科河、亚马逊河和巴拉那河,非洲的刚果河和尼罗河,亚

洲的伏尔加河、鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河、印度河、恒河、长江和湄公河,以及大洋洲的墨累-达令河。反演各流域的陆地水储量时间序列，再结合全球水文模型分析，其水储量变化特征及其与气候变化的联系。图 1 为上述流域的等效水高时间序列,其中位于亚欧大陆高纬度地区的鄂毕河、勒拿河、伏尔加河和叶尼塞河等 4 大流域的水储量时间序列具有相似的变化趋势，并且时序信号的振幅相近;这些流域的地理纬度和气候类型相近,可视为受到相似气候带的影响。巴拉那河和奥里诺科河是南美洲的两个临近流域,分别位于赤道两侧,受到不同的太平洋环流影响，其水储量变化呈现完全相反的周期信号,这与杨元德等[16]研究结果一致。湄公河流域、亚马逊流域、恒河流域、鄂毕河流域、勒拿河流域、伏尔加河流域和叶尼塞河流域等流域的水储量变化具有明显的周年变化信号。其中,湄公河流域处于 3 种季风的交会区域,由于季风气候的年际干湿季分明，湿季陆地水储量因降水增加而上升,旱季降水会减少,因而流域周期信号非常明显，位于热带地区的刚果河流域则完全相反。

表 2 统计了研究区域中各流域 2002—2020年的等效水高变化率,从表中可看出半数流域水储量呈减少趋势,其中恒河流域下降速率最大,以(14.9±3.1)mm/a 的速率下降;而伏尔加河、密西西比河、巴拉那河、长江等流域水储量有上升趋势,其中水储量增加最快的流域为密西西比河流域，达到(3.8±1.3)mm/a。

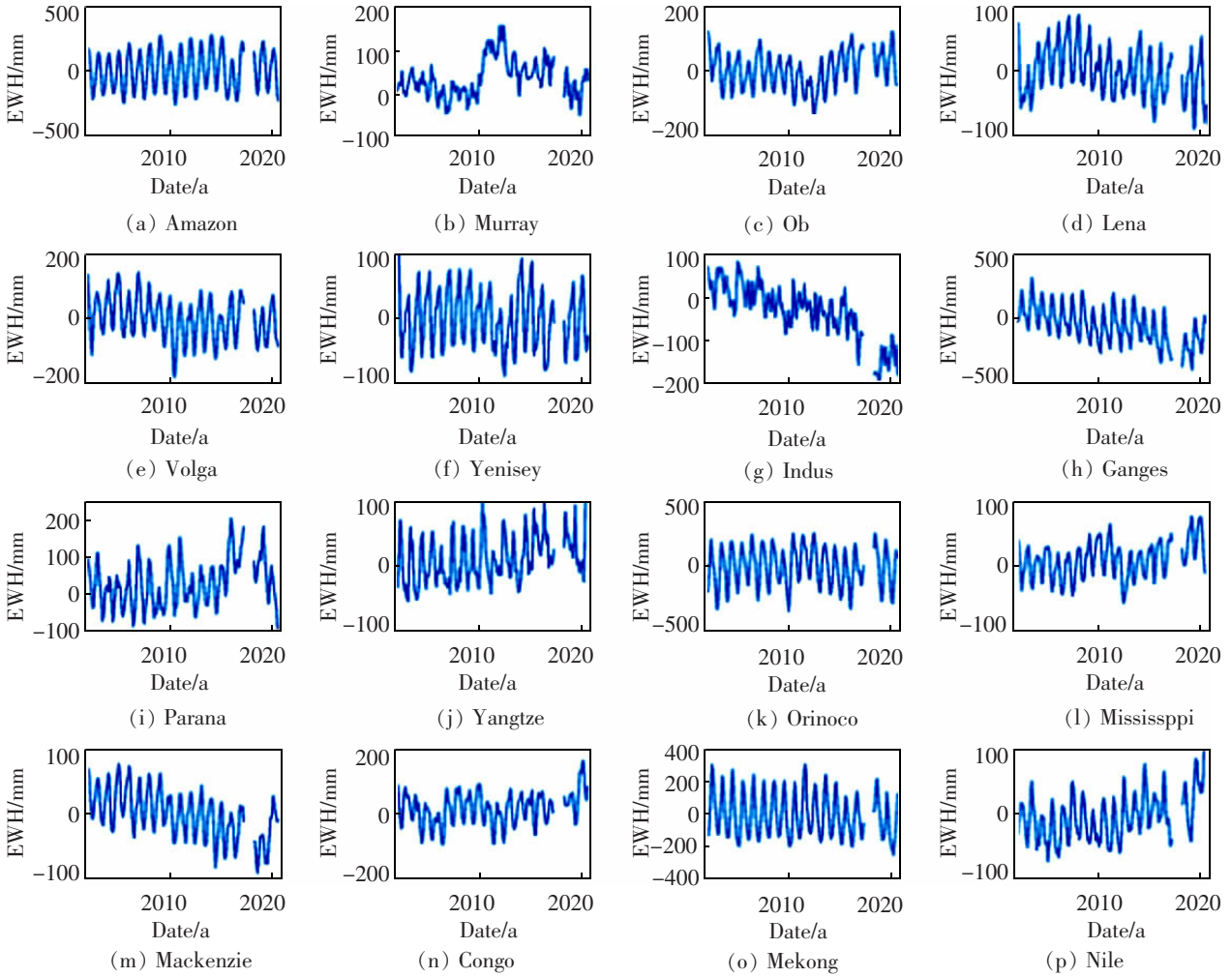


图 1　全球典型流域等效水高变化

Fig.1　Time series of EWH in typical global basin

表2 全球典型流域等效水高变化速率

Tab.2 The EWH rate of global typical basins mm/a

Basin	EWH rate	Basin	EWH rate
Volga	−3.2±1.7	Ganges	−14.9 ±3.1
Mississppi	3.8 ±1.3	Yangtze	2.6 ±0.8
Mackenzie	−4.9 ±1.0	Yenisey	−0.9 ±1.2
Amazon	0.2 ±0.4	Ob	1.4 ±1.4
Parana	3.5 ±1.6	Lena	−1.9 ±1.0
Orinoco	−0.8 ±4.0	Mekong	−4.0 ±3.5
Congo	2.6 ±1.2	Murray	0.2 ±0.1
Nile	3.8 ±1.1	Indus	−9.6 ±1.0

2.2 陆地水储量变化的影响因素

2.2.1 自然因素

为了更好的研究气候因子驱动下的水储量变化,选取澳大利亚东南部的墨累−达令流域作为研究对象,该流域可分为干湿两季,东西部降水差异显著。图2为墨累−达令流域的水储量变化与降水、蒸发的对比关系,其中红色线为该流域的等效水高变化,呈现下降、上升后下降的3个显著差异的阶段。

将NCEP的降水距平值与等效水高和降水数据进行十三点滑动平均处理(图3),可明显发现平滑处理后两者的变化趋势高度一致,并且降水变化早于水储量变化,表明降水是影响区域水储量变化的主要因素。其次,蒸发量也会对流域水储量产生影响,如2011—2012年降水量快速增加,由于蒸发量的增长,本应该是持续上升的水储量出现小幅下降。此外,图2中还包含2002—2020年MEI(Multivariate ENSO index)指数的变化趋势,从中可发现2010—2012年期间发生了强烈的拉尼娜事件,这段时间内降水量增加,同时出现陆地水储量迅速增加的现象;而在2015—2016年为厄尔尼诺盛行期间,降水量和陆地水储量也同步下降。这表明流域内降水受到ENSO气候因子的长期驱动,这与Risbey等的研究结果一致[17−18]。

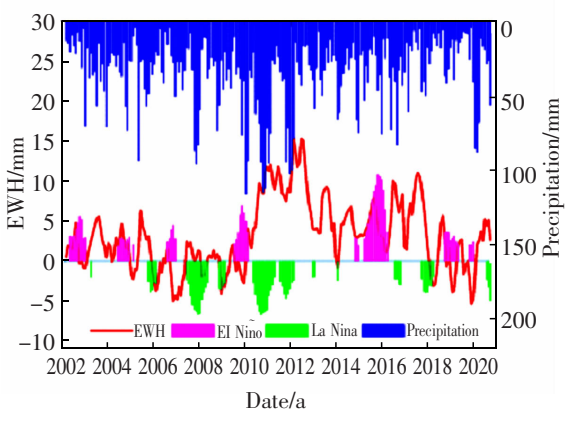


图2 墨累−达令流域等效水高与气候因素的对比

Fig.2 Comparison of EWH and climatic factors in the Murray−Darling basin

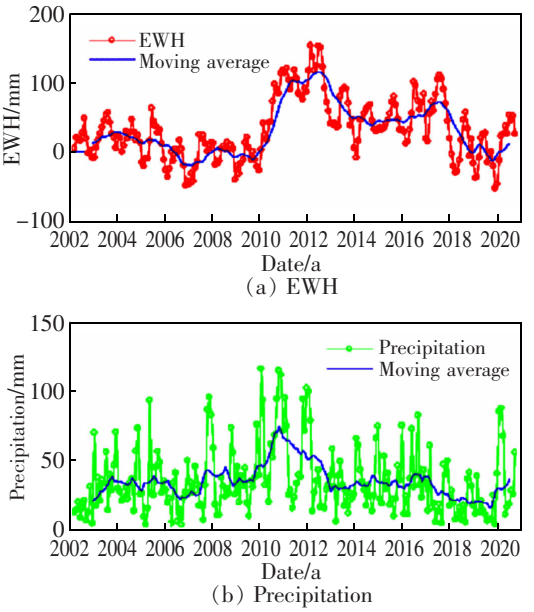


图3 墨累−达令流域等效水高和降水距平值的对比

Fig.3 Comparison of EWH and precipitation anomaly in the Murray−Darling basin

2.2.2 人为因素

印度河−恒河流域地区是南亚人口最集中的区域,也是重要的农作物产区,近年来水资源短缺问题日益严重。图4为印度河和恒河流域的等效水高变化时间序列,两个流域的水储量均快速下降。印度河流域的等效水高下降速率为9.57 mm/a(图4(a)),而恒河流域的等效水高下降速率达到惊人的15.1 mm/a(图4(b)),为本文研究区域中水储量下降速率最快的流域。

该区域陆地水储量下降最快的区域位于新德里及周边区域,是印度和巴基斯坦重要的工业区和粮食主产区。该地区的地下水等效水高下降速率(约−27 mm/a)显著快于整体等效水高下降速率(−21 mm/a),表明地下水快速下降是该区域水储量流失的主要因素,与该区域的相关研究结论基本一致[19−20]。上述研究验证了人类活动对区域水储量变化的影响。

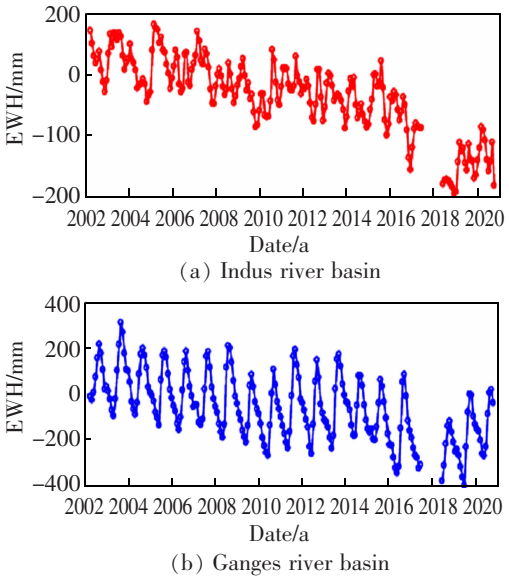


图 4　印度河–恒河流域等效水高时间序列

Fig.4　Time series of EWH in the Indus–Ganges basin

2.3　水文模型验证 GRACE 反演结果

GRACE 反演结果的准确性难以通过大范围实测水文数据来评估其精度,通常采用水文模型对结果进行验证[21-23]。以亚马逊流域为例,采用 GLDAS 全球水文模型验证 GRACE 反演的水储量变化。亚马逊流域位于南美洲,流域范围是 49°W~79°W,20°S~6°N,流域面积 6.15×10^6 km^2,主要的气候类型是热带雨林气候和和热带草原气候,全年雨量充足,年平均温度为 25~27 ℃,年降水量在 1 500~2 500 mm。

利用 GRACE 可以反演得到 2002—2020 年的水储量变化,将 GLDAS 水文模型模拟得到的水储量扣除 2002—2020 年的平均值,并与 GRACE 反演的等效水高进行对比(图 5(a)),两者呈现一致的周期性信号;扣除采用周期项后得到水储量的异常值的时间序列,并与 PDSI 指数进行对比(图 5(b))。用 GLDAS 水文模型模拟得到的陆地水储量与 GRACE 反演得到的结果相关性很高,相关系数达到 0.86。GRACE 和 GLDAS 水文模型的结果均表现出了明显的周年变化,且 GRACE 观测得到的结果中的周年振幅大于 GLDAS,原因是 GLDAS 模拟的水储量未包含地下水和地表径流的变化。GRACE 水储量扣除周期项异常值的整体变化趋势与 PDSI 指数的变化趋势一致,根据 PDSI 指数对应的干旱级别也反映出 2010 年间轻微干旱,而 2016 年间发生中等干旱,GRCAE 能够较好地探测到这两次干旱事件。

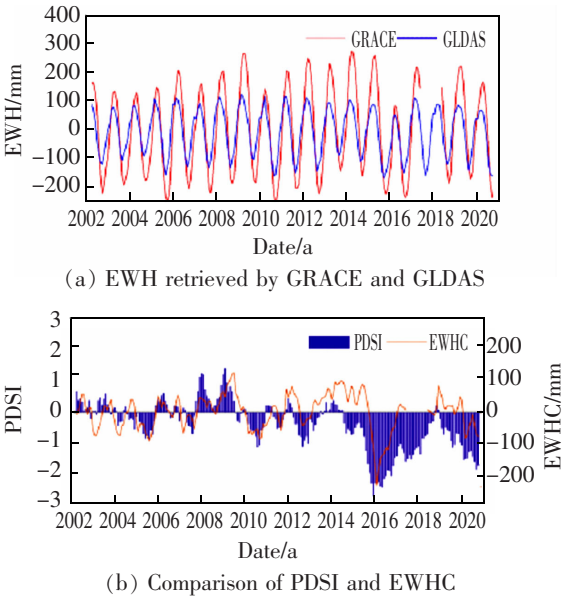


图 5　GARCE 和 GLDAS 反演的亚马逊流域等效水高

Fig.5　EWH in the Amazon basin calculated by GARCE and GLDAS

图 6 和图 7 分别为 GLDAS 和 GRACE 反演的的亚马逊流域等效水高异常的空间分布,对比两张图可发现,GLDAS 模拟的水文信号和 GRACE 反演得到的等效水高空间分布在 2010 年和 2016 年均能够反映出亏损信号,表明流域处于干旱状态。但两者仍然存在差异,比如在 2010 年,GLDAS 模拟的结果显示流域内水储量在流域南部亏损,而 GRACE 显示却是在流域北部,产生差异的原因可能是 GLDAS 模拟的水文信号中深层土壤水、地下水等因素未考虑。

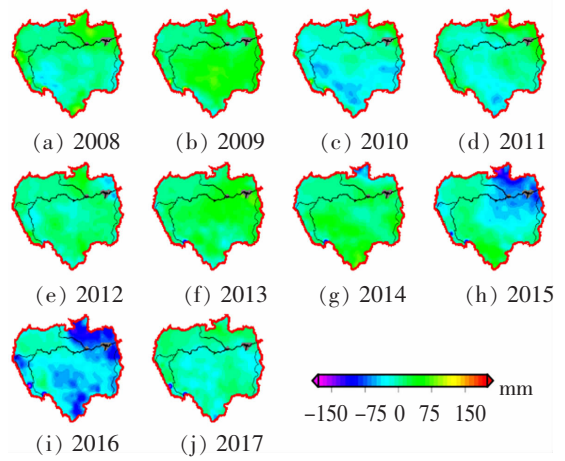


图 6　GLDAS 反演亚马逊流域等效水高异常分布

Fig.6　Abnormal distribution of EWH in the Amazon basin by GLDAS

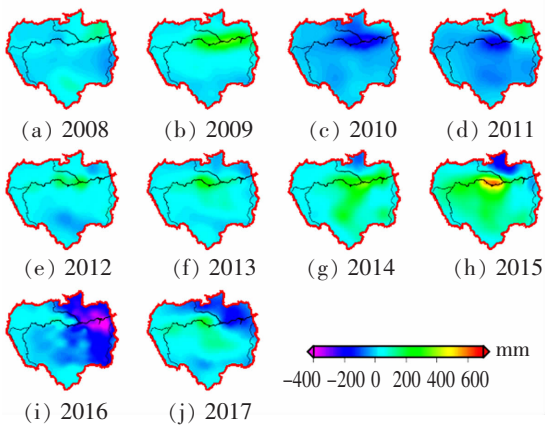


图7 GRACE反演亚马逊流域EWH异常空间分布
Fig.7 Abnormal distribution of EWH in the Amazon basin by GRACE

3 结论

利用CSR发布的GRACE时变重力场模型解算16个全球典型流域的2002—2020年水储量变化,并联合多源水文和气象数据分析影响水储量变化的因素,得到了以下的结论。

1)在全球尺度下,相邻流域的水储量变化的周期和振幅较为接近,而位于南北半球两个临近流域的水储量时间序列出现相反的周期信号,表明水储量变化与所处地理位置和气候带存在一定的关系。

2)墨累-达令流域的水储量受到降水蒸发的共同影响,极端气候变化通过影响降水来造成水储量的变化,而地下水的过度开采等人为因素是印度河-恒河流域的水储量迅速下降的主要原因,由此表明自然因素和人为因素均会对区域水储量变化产生影响。

3)利用GLDAS水文模型模拟水储量与GRACE反演结果在亚马逊流域的相关性达到0.86,验证了GRACE模型反演水储量变化结果的可靠性,研究还发现GRACE在探测区域干旱事件方面有独特的优势。

参考文献:

[1] 张年,张诚. 新农村经济-交通运输-弄错生态环境耦合协调发展研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(2):46-55.
ZHANG N,ZHANG C. Research on coupling coordination development of new rural economy transportation rural ecological environment[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(2):46-55.

[2] 李奥典,唐德善,石蓝星,等. 基于图论的丽水市多水源供水配置模型研究[J]. 华东交通大学学报,2016,33(1):107-113.
LI A D,TANG D S,SHI L X,et al. Evaluation on multi-source water supply allocation model of Lishui City based on graph theory[J]. Journal of East China Jiaotong University,2016,33(1):107-113.

[3] CHEN J L,WILSON C,FAMIGLIETTI J,et al. Attenuation effect on seasonal basin-scale water storage changes from GRACE time-variable gravity[J]. Journal of Geodesy,2007,81(4):237-245.

[4] HUANG Z,PAN Y,GONG H,et al. Subregional scale groundwater depletion detected by GRACE for both shallow and deep aquifers in North China Plain[J]. Geophysical Research Letters,2015,42(6):1791-1799.

[5] SEAN S,JOHN W. Multi-sensor analysis of water storage variation of the Caspian Sea[J]. Geophysical Research Letters,2007,34(16):L16401.

[6] 李琼,罗志才,钟波,等. 利用GRACE时变重力场探测2010年中国西南干旱水储量变化[J]. 地球物理学报,2013,56(6):1843-1849.
LI Q,LUO Z C,ZHONG B,et al. Terrestrial water storage changes of the 2010 Southwest China drought by GRACE temporal gravity field[J]. Chinese Journal of Geophysics,2013,56(6):1843-1849.

[7] 许民, 叶柏生, 赵求东. 2002—2010年长江流域GRACE水储量时空变化特征[J]. 地理科学进展,2013,32(1):68-77.
XU M,YE B S,ZHAO Q D. Temporal and spatial pattern of water storage changes over the Yangtze river basin during 2002—2010 based on GRACE satellite data[J]. Progress in Geography,2013,32(1):68-77.

[8] WANG W,SHEN Y. Two severe prolonged hydrological droughts analysis over mainland australia using GRACE satellite data[J]. Remote Sensing,2021,13(8):1432.

[9] TIAN K J,WANG Z T,LI F P,et al. Events over the Amazon river basin(1993—2019) as detected by the climate-driven total water storage change[J]. Remote Sensing,2021,13(6):1124.

[10] MIRALLES D G,HOLMES T,DEJEU R,et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15:453-469.

[11] MARTENS B,MIRALLES D,LIEVENS H,et al. GLEAM v3:Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. Geoscientific Model Development,2017,10:

1903–1925.

[12] VAN D,BARICHIVICH J,BRIFFA K,et al. A scPDSI–based global data set of dry and wet spells for 1901—2009 [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2013,10(118):4025–4048.

[13] POWER S,HAYLOCK M,COLOMAN R,et al. The predictablity of interdecadal changes in ENSO activity and enso teleconnections[J]. Journal of Climate,2006,19(19):4755–4771.

[14] 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,1998,103(B12):30205–30229.

[15] BLEWITT G,CLARKE P. Inversion of earth′s changing shape to weigh sea level in static equilibrium with surface mass redistribution[J]. Journal of Geophysical Research,2006,108 (B6):2311.

[16] 杨元德,鄂栋臣,晁定波,等. GRACE 估算陆地水储量季节和年际变化[J]. 地球物理学报,2009,52(12):2987–2992.
YANG Y D,E D C,CHAO D B,et al. Seasonal and interannual change in land water storage from GRACE[J]. Chinese Journal of Geophysics,2009,52(12):2987–2992.

[17] MARC J,PAUL L,GUILLAUME R,et al. Basin–scale,intergrated observations of early 21st century multiyear drought in southeast Australia[J]. Water Resources Research,2009,45(4):W04408.

[18] RISBEY J,POOK M,MCINTOSH P. On the remote drivers of rainfall variability in Australia[J]. American Meteorological Society,2009,137(10):3233–3253.

[19] 温志强,黄征凯. 基于 GRACE 时变重力场模型研究印度河–恒河流域水储量变化[J]. 全球定位系统,2020,45(5):103–107.
WEN Z Q,HUANG Z K. A research on water storage changes in Indus–Ganges river basin based on GRACE time–varying gravity field[J]. GNSS World of China,2020,45(5):103–107.

[20] TIWARI V,WAHR J,SWENSON S. Dwindling groundwater resources in northern India,from satellite gravity obser vations[J]. Geophysical Research Letter,2009,36(18):184–201.

[21] 徐永明. 利用 GRACE RL06 时变重力场的水储量变化反演研究与应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
XU Y M. Research on recovery method of water storage variations and application using GRACE RL06 temporal gravity field[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2020.

[22] SANAZ M. Assessment of water storage changes using GRACE and GLDAS[J]. Water Resources Management,2020,34:685–697.

[23] CORNERO C,PEREIRA A,MATOS A,et al. Monitoring water storage changes in middle and low Paraná river basin using GRACE,GRACE FO,TRMM and GLDAS data [J]. Revista de Teledetección,2021,58:53–70.



第一作者:黄征凯(1988—),男,讲师,博士,研究方向为卫星测高数据处理及应用;2010 年本科毕业于桂林理工大学,2013 年硕士毕业于桂林理工大学,2018 年博士毕业于武汉大学测绘学院。E–mail:hzkai202@163.com。

(责任编辑:吴海燕　刘棉玲)