DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.06.13

基于卫星遥感数据和SPA的淮河流域陆地水储量变化研究

吴淑君, 李晓英, 郑浩然, 王 颖
(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 为研究流域陆地水储量多年变化情况,以淮河流域为例,利用2003-2016年GRACE重力卫星数据反演流域陆地水储量变化,分析其多年时空变化规律;利用MODIS遥感数据生成归一化植被指数*NDVI*,通过皮尔逊相关系数和SPA集对分析,结合降雨、温度、径流、*NDVI*和环流数据分析陆地水储量变化的主要影响因子。结果表明:GRACE反演的淮河流域陆地水储量整体呈现微弱下降趋势,具有年周期性,秋季初期达到峰值;流域南部桐柏山和大别山区域陆地水储量上升,北部流域内的郑州区域陆地水储量显著下降;陆地水储量变化与温度相关度较低,主要受降雨、径流变化影响,呈正相关,受当地植被归一化指数和环流指数影响相对较小,呈负相关。

关键词: 陆地水储量变化; GRACE重力卫星; 归一化植被指数(*NDVI*); 集对分析; 影响因子; 淮河流域
中图分类号:P228; P332 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2019)06-0081-05

Research on terrestrial water storage anomaly based on satellite remote sensing data and set pair analysis in Huaihe River Basin

WU Shujun, LI Xiaoying, ZHENG Haoran, WANG Ying
(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: The GRACE satellites data from 2003-2016 in the Huaihe River basin were used to study the long-term spatiotemporal changes of terrestrial water storage anomaly (TWSA). The normalized difference vegetation index (*NDVI*) generated from MODIS remote sensing satellite was used to analyze the main influencing factors of TWSA, including precipitation, temperature, runoff, vegetation coverage and circumfluence, using the Pearson analysis and set pair analysis (SPA). The results showed that the TWSA in the Huaihe River basin has a clear annual periodicity, and reaches its peak in the early autumn. The TWSA over the south of the basin, especially in Tongbai and Dabie Mountain area increased in 2016, while in the north of the basin, such as Zhengzhou area decreased significantly. The TWSA in Huaihe basin is positively affected by precipitation and runoff and has a low correlation with temperature. Additionally, the influence of local *NDVI* and circumfluence index on TWSA is relatively small, showing a negative correlation.

Key words: terrestrial water storage anomaly; gravity recovery and climate experiment(GRACE) gravity satellites; normalized difference vegetation index (*NDVI*); set pair analysis; influence factor; Huaihe River Basin

1 研究背景

水资源以土壤水、地表水和地下水等不同形式存在,对于生物的生存与发展至关重要。陆地水储量变化(TWSA,Terrestrial Water Storage Anomaly)是陆地水量平衡的基本分量之一,是地表水、地下水、土壤含水量及冰雪和生物体含水量综合变化的结果[1]。研究陆地水储量的变化对进一步掌握地区水文循环现状,规

收稿日期:2019-05-13; **修回日期**:2019-07-08
基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2019B71314); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJKY19_0499); 国家重点计划研发课题(2016YFC0400909)
作者简介:吴淑君(1994-),女,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为水利水电系统规划与工程经济。
通讯作者:李晓英(1978-),女,江苏徐州人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水利水电系统规划与动能经济。

划区域未来水资源发展具有重要意义。实现全球范围陆地水储量变化的监测十分困难,GRACE 重力卫星的发射为研究陆地水储量变化提供了新手段。GRACE 重力卫星能够直接应用于地表质量变化监测,而陆地时变重力场主要由陆地水质量变化引起[2-3]。

GRACE 重力卫星数据在估算各种尺度的陆地水储量变化上具有极高的敏感度和广泛的适用性,可探测厘米级陆地水储量变化[4-5]。陆地水储量变化具有周期性[6],环境变化对陆地水储量的影响主要为气候变化和人类活动影响。Hu 等[7]发现中亚山麓地区陆地水储量变化主要受到降雨的影响,与气温间存在 3 个月的迟滞关系,而陆地水储量受土地利用等人类活动影响的程度还不明确。王文等[1]利用 GRACE 估算长江上、中游的陆地水储量并结合多源水文数据分析,显示长江上游陆地水储量与降雨、径流和土壤水蓄量无明显变化,中游水库蓄量与陆地水储量都有显著性增加,反映出人类活动影响中游地区陆地水储量变化。经研究 2003 – 2012 年长江流域三峡库区、洞庭湖、鄱阳湖 3 个典型地区的陆地水储量对气候因素的响应较为敏感[8]。我国几大主要流域陆地水储量与环流指数的相关性研究也进一步验证了气候变化是造成水储量变化的一大主要因素[9]。

目前针对淮河流域陆地水储量的研究主要集中在流域水储量的趋势和分布状况,对于淮河流域水储量变化驱动因子的研究较少。周志才等[10]利用逐月 GRACE 时变重力场模型获得了淮河流域陆地水储量的时空变化,采用同期 GLDAS 模型中土壤水和实测地下水埋深数据推算了淮河流域地下水储量的时空变化,借助观测井数据对结果进行检验,结果表明淮河流域地下水储量呈递增趋势。束美珍等[11]研究 2003 – 2014 年黄淮海地区陆地水储量,发现淮河流域陆地水储量呈下降趋势,水储量整体变化由南向北递减,水储量的空间变化主要受降雨影响,同时还受区域农业布局和作物灌溉影响。

面向关系结构的集对分析(SPA)能够从确定性与不确定性的联系和转换角度分析水资源复杂系统,在水资源分析与评价中发挥了重要作用[12]。与传统水文相关分析相比,集对分析能从微观层次上反映出两者的关系[13],可以得出陆地水储量分布与各影响因素间的更多关系信息。本文以淮河流域洪泽湖以上范围为研究对象,通过 GRACE 卫星数据计算 2003 – 2016 年期间淮河流域陆地水储量,分析其时序和空间变化,基于皮尔逊相关系数和 SPA 集对分析,研究降水、温度、环流及植被覆盖率对流域陆地水储量变化的影响。

2 研究区域与数据

2.1 研究区域

淮河流域地处我国东部,位于长江和黄河之间。流域总地形为由西北向东南倾斜,淮南山丘区向北倾斜。流域西、南、东北部为山区,其余为平原、湖泊和洼地,自然植被分布具有明显的地带性特点。淮河流域具有独特的地理位置,地处我国南北气候的过渡带,四季分明。流域北部属于暖温带半湿润季风气候区,为典型的北方气候,冬半年比夏半年长,过渡季节短,年内气温变化大;流域南部属于亚热带湿润季风气候区,夏半年比冬半年长,降水丰沛,气候温和。

2.2 研究数据

2.2.1 *GRACE 数据* GRACE 卫星能够监测时变重力场变化,从而推求地球表面质量的变化,进一步转化为等效水高变化。本文采用 2003 – 2016 年 CSR、JPL、GFZ 3 家研究机构发布的全球空间分辨率为 1° × 1°的逐月等效水高变化的均值,陆地水储量变化值 TWSA 为相对 2004 年 1 月至 2009 年 12 月陆地水储量均值的距平值。根据流域地形图进行面积加权平均,得到流域各月平均陆地水储量变化。

2.2.2 *降雨、温度、径流、环流数据* 降雨、气温数据来源于国家气象信息中心,数据系列为 2003 – 2016 年的分辨率为 0.25° × 0.25°的月值格点数据,个别缺损数据采用样条法插值。径流选用吴家渡水文站的月径流资料,来自《淮河流域片水资源公报》。环流数据来源于中国气象局国家气候中心逐月大气环流指标数据。

2.2.3 *MODIS 数据* 本文选用空间分辨率为 1 km 的 MOD13A3 月数据生成归一化植被指数 *NDVI*(Normalized Difference Vegetation Index)。*NDVI* 能够很好地反映地表植被覆盖情况,*NDVI* 值与地表覆盖率呈正相关。

3 研究方法

3.1 集对分析原理

集对分析是对不确定系统中的两个有关联的集体构造集对,对集对的某特性进行分析,建立同、异、反联系度[14]。将因变量 Y 与各影响因子 X_i 对应的类别符号进行对照,X、Y 各有 n 项,符号相同则称为同一,统计其个数 S;相差一级,称为差异,统计其个数 F;相差两级,称为对立,统计其个数 P。由公式

(1) 得到各集对的联系度:

$$\mu_{X-Y} = \frac{S}{n} + \frac{F}{n}I + \frac{P}{n}J = a + bI + cJ \qquad (1)$$

式中:μ_{X-Y} 为集合 X 和 Y 的联系度;$S + F + P = n$;I 为差异不确定系数,在(-1,1)区间取值;J 为对立系数,$J = -1$;a、b、c 分别为集对的同一度、差异度和对立度。当 a 越接近 1,表明集合 X 与 Y 关系越倾向于同一;当 c 越接近 1,表明两个集合越倾向于对立;当 b 越接近 1,表明两个集合越倾向于差异,当 $b > 0.5$ 时,在多元回归分析中可以排除该因子。

3.2　Pearson 相关分析

皮尔逊相关系数法是一种能够准确度量两个计算变量间关系密切程度的统计学方法。变量 x、y 通过实验可获得若干组数据,记为(x_i, x_j) $(i = 1,2,\cdots,n)$,则相关系数的数学表达式为:

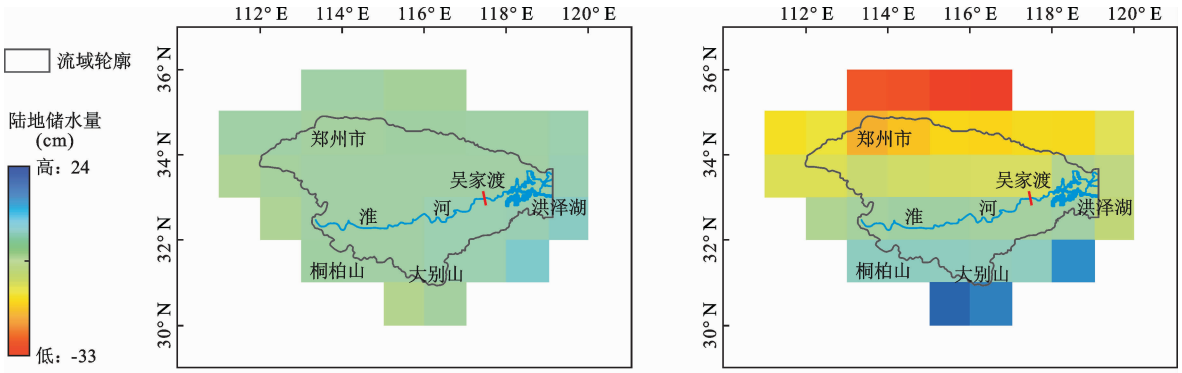
$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \qquad (2)$$

式中:$\bar{x}$、$\bar{y}$ 分别为 n 个试验值的均值。相关系数 r 的取值范围在 $-1 \sim 1$ 之间,即 $|r| \leqslant 1$。$|r|$ 越逼近于 1,则表明 x 与 y 线性相关程度越高[15]。

4　结果分析与讨论

4.1　流域陆地水储量变化研究

利用 GRACE 月重力场数据,反演淮河流域洪泽湖以上地区多年陆地水储量变化。流域 2003 与 2016 年陆地水储量变化空间分布对比如图 1 所示。由图 1 可见,2003 年 GRACE 反演的淮河流域年均陆地水储量分布较为均匀,整体处于较丰状态。南部地区比北部略丰,但整体差异不大。2016 年淮河流域年均陆地水储量分布不均,南北差异较大,南部陆地水储量明显丰于北部。主要原因是流域南部多为山区,经济社会发展落后于北部平原地区,北部经济快速发展带来的用水增加,加剧了南北陆地水储量的差异。相比 2003 年,2016 年流域南部陆地水储量增加,北部陆地水储量减小,陆地水储量增减面积大致相等。桐柏山和大别山区域相较于 2003 年陆地水储量上升幅度最大,流域内郑州市区域陆地水储量下降幅度最大。郑州市区域社会经济水平上升较快,水资源量消耗增大,陆地水储量下降与实际情况相吻合。



(a) 2003年淮河流域平均陆地储水量　　(b) 2016年淮河流域平均陆地储水量

图 1　2003、2016 年淮河流域平均陆地水储量变化空间分布图

2003 – 2016 年淮河流域 GRACE 反演逐月陆地水储量变化见图 2。由图 2 可见,通过陆地水储量长系列趋势研究,淮河流域陆地水储量整体呈现下降趋势,下降幅度较小。陆地水储量变化具有明显的年周期性,多在秋初达到年内峰值。图 2 中线性拟合陆地水储量变化的下降趋势为 -0.043 cm/a,多年均值为 -1.918 cm。2003、2007 年夏季淮河流域遭遇强降水,陆地水储量增加。2005 年淮河流域处在丰水年,年内陆地水储量整体盈余。2011 年陆地水储量值处在明显的低位,水储量亏损,与同年山东、安徽和河南地区发生重大旱情相吻合。2015 年起流域陆地水储量变化均为负值,呈现下降趋势。

4.2　流域陆地水储量变化影响因素研究

陆地水储量受到流域降雨、气温、径流的影响,与当地植被覆盖率和大气环流密切相关。本文选取研究区域降雨、气温、径流和植被覆盖率数据,筛选对淮河流域所研究区域陆地水储量影响较大的 8 个气候环流指数,分别与陆地水储量变化进行相关性分析。结果如表 1 所示,所选指标均通过 0.05 显著性检验。

利用集对进行进一步相关分析,计算陆地水储量与各影响因素的均值和均方差,采用均值标准差法根据经验取值法[14]进行分类,分类标准与计算结果如表 2 所示。

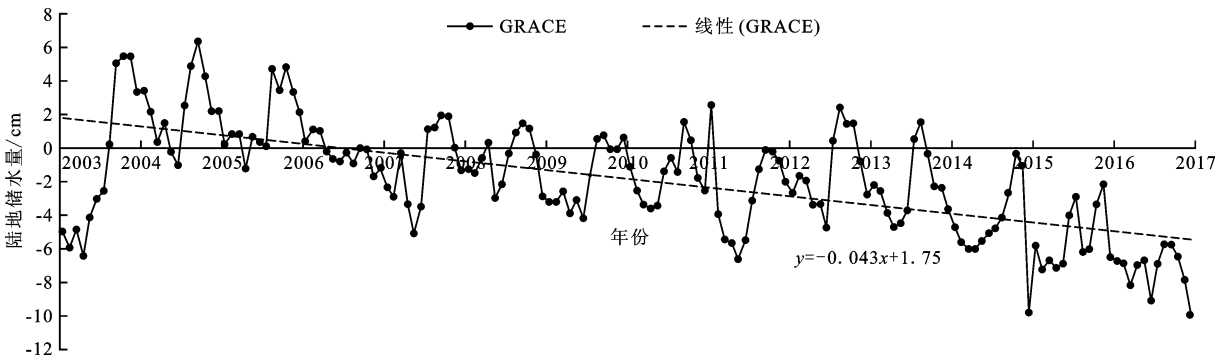


图 2 2003 – 2016 年淮河流域 GRACE 反演逐月陆地水储量变化图

表 1 陆地水储量与各影响因子间最大相关系数

影响因素	最大相关系数	影响因素	最大相关系数
降雨量 X_1	0.46**	亚洲区极涡强度指数 X_7	-0.50**
气温 X_2	0.39**	北半球极涡强度指数 X_8	-0.48**
径流量 X_3	0.43**	欧亚纬向环流指数 X_9	-0.24**
植被覆盖指数 X_4	-0.44**	欧亚经向环流指数 X_{10}	-0.28**
亚洲区极涡面积指数 X_5	-0.43**	亚洲纬向环流指数 X_{11}	-0.22**
北半球极涡面积指数 X_6	-0.38**	亚洲经向环流指数 X_{12}	-0.19**

注：** 表示通过 0.05 显著性检验。

表 2 评价指标分类标准

类别	均值	均方差	分类标准		
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
X_1 /mm	77.07	70.66	<6.41	[6.41, 147.73)	≥147.73
X_2 /℃	15.29	9.00	<6.29	[6.29, 24.29)	≥24.29
X_3 /($m^3 \cdot s^{-1}$)	824.95	1085.26	< -260.31	[-260.31,1910.21)	≥1910.21
X_4	0.52	0.14	< 0.38	[0.38, 0.66)	≥ 0.66
X_5	17.43	2.03	< 15.40	[15.40, 19.46)	≥ 19.46
X_6	65.96	6.06	< 59.90	[59.90, 72.02)	≥ 72.02
X_7	3708.37	1556.34	< 2152.03	[2152.03,5264.71)	≥ 5264.71
X_8	13381.38	4766.16	< 8615.22	[8615.22,18147.54)	≥ 18147.54
X_9	11.26	2.93	< 8.33	[8.33, 14.19)	≥ 14.19
X_{10}	3.32	1.13	< 2.19	[2.19, 4.45)	≥ 4.45
X_{11}	11.23	3.56	< 7.67	[7.67, 14.79)	≥ 14.79
X_{12}	3.15	1.33	<1.82	[1.82, 4.48)	≥4.48
TWSA Y/cm	-1.92	3.32	< -5.24	[-5.24, 1.40)	≥1.40

统计 Y 与各影响因子 X_i 的同一数、差异数和对立数，根据公式(1) 得到各评价对象集对分析联系度如下：

$$\mu_{Y\sim X_1} = 0.577 + 0.399I + 0.024J$$
$$\mu_{Y\sim X_2} = 0.423 + 0.518I + 0.220J$$
$$\mu_{Y\sim X_3} = 0.649 + 0.399I + 0.012J$$
$$\mu_{Y\sim X_4} = 0.464 + 0.452I + 0.083J$$
$$\mu_{Y\sim X_5} = 0.464 + 0.500I + 0.036J$$
$$\mu_{Y\sim X_6} = 0.494 + 0.440I + 0.065J$$
$$\mu_{Y\sim X_7} = 0.393 + 0.560I + 0.048J$$
$$\mu_{Y\sim X_8} = 0.399 + 0.518I + 0.083J$$
$$\mu_{Y\sim X_9} = 0.488 + 0.470I + 0.042J$$
$$\mu_{Y\sim X_{10}} = 0.518 + 0.411I + 0.071J$$
$$\mu_{Y\sim X_{11}} = 0.488 + 0.470I + 0.042J$$
$$\mu_{Y\sim X_{12}} = 0.512 + 0.440I + 0.048J$$

根据计算的联系度可知，Y 与 X_2、X_5、X_7、X_8 的不定相关度分别为 0.518、0.500、0.560、0.518。陆地水储量变化与气温、环流指数中的亚洲区极涡面积指数、亚洲区极涡强度指数和北半球极涡强度指数间不定相关度均超过 0.5，对陆地水储量变化的影响

较小,不能作为主要影响因子。

4.3　分析与讨论

降雨、径流对淮河流域陆地水储量变化起到重要影响作用,由陆地水储量与影响因素间相关性分析结果和集对分析联系度结果可以看出:降水量和径流量作为陆地水储量变化的主要影响因子与陆地水储量变化较为一致,呈正相关。陆地水储量与植被覆盖指数间存在负相关,区域植被覆盖率越高,蒸散发越大,导致陆地水储量下降。陆地水储量变化与北半球极涡面积指数及欧亚、亚洲经纬环流指数为负相关,相关性多在 0.2 ~0.4 之间,相关性较弱。淮河流域陆地水储量变化受大尺度气候环流影响,但程度较低,可能是受地表特征复杂与环流指数尺度相对研究区域较大影响。

淮河流域陆地水储量与气温的相关性虽然通过了显著性检验,但 SPA 分析两者不定相关度较大,说明淮河流域洪泽湖以上区域的陆地水储量与气温的关系实际并不显著。这种不显著相关性很可能是受淮河流域独特的气候因素影响,淮河以南为亚热带区域,而淮河以北为暖温带区域,南北温度差异较大,对分析结果造成影响。在未来的研究中应进一步考虑流域气候的独特性,分流域以南与流域以北两个子流域进行分析。

5　结　论

本文利用2003 – 2016 年 GRACE 重力卫星数据反演淮河流域洪泽湖以上区域陆地水储量变化,分析流域陆地水储量多年时空变化规律,并结合降雨、温度、径流、植被覆盖率和环流数据分析陆地水储量的主要影响因子,结论如下:

(1)2003 年淮河流域年均陆地水储量分布较为均匀,整体处于较丰状态。2016 年年均陆地水储量分布南北差异较大,南部陆地水储量明显丰于北部。相较 2003 年,2016 年流域南部陆地水储量增加,北部陆地水储量减小,陆地水储量增减面积大致相等。南部桐柏山和大别山区域陆地水储量上升幅度最大,北部流域内郑州市区域陆地水储量下降幅度最大。

(2)对淮河流域陆地水储量作长系列趋势研究,发现流域陆地水储量整体呈现下降趋势,下降幅度较小。陆地水储量变化具有明显的年周期性,多在秋初达到年内峰值。陆地水储量的变化能够较好反映流域极端气候变化的影响,对干旱和极端降水气候的响应度较高。

(3)利用皮尔逊相关系数和集对分析法研究流域陆地水储量变化的主要影响因子,结果表明陆地水储量变化主要受降雨、径流变化影响,呈正相关,受当地植被覆盖率和环流指数影响相对较小,呈负相关,与温度间相关度不高。

参考文献:

[1] 王 文,王 鹏,崔 巍. 长江流域陆地水储量与多源水文数据对比分析[J]. 水科学进展,2015,26(6):759 – 768.

[2] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the Earth system[J]. Science, 2004, 305(5683): 503 – 505.

[3] WAHR J, SWENSON S, ZLOTNICKI V, et al. Time – variable gravity from GRACE: First results[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(11): L11501.

[4] SWENSON S, WAHR J, MILLY P C D. Estimated accuracies of regional water storage variations inferred from the gravity recovery and climate experiment (GRACE)[J]. Water Resource Research, 2003, 39(8): 11-1 – 11-13.

[5] ANDERSEN O B, SENEVIRATNE S I, HINDERER J, et al. GRACE – derived terrestrial water storage depletion associated with the 2003 European Heat Wave [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L18405.

[6] 尼胜楠,陈剑利,李 进,等. 利用 GRACE 卫星时变重力场监测长江、黄河流域水储量变化[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(4):49 – 55.

[7] HU Weijie, LIU Hailong, BAO Anming, et al. Influences of environmental changes on water storage variations in central Asia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(7): 985 – 1000.

[8] 白成恕,马旭辉,武新明,等. 利用 GRACE 数据探测长江流域水储量变化[J]. 测绘与空间地理信息,2013,36(5): 165 – 166 + 169.

[9] 何盘星,胡鹏飞,孟晓于,等. 气候变化与人类活动对陆地水储量的影响[J]. 地球环境学报[J],2019,10(1):38 – 48.

[10] 周志才,王卫平,李冰瑶. 基于 GRACE 卫星时变重力场的淮河流域地下水储量变化规律研究[J]. 水电能源科学,2017, 35(10):37 – 41.

[11] 束美珍,杨传国,李玉龙,等. 黄淮海地区 2003 ~2014 年 GRACE 水储量时空变化[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(1):83 – 88.

[12] 金菊良,沈时兴,崔 毅,等. 面向关系结构的水资源集对分析研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):97 – 111.

[13] 高 申,吴泽宇,胡彩虹,等. 水土保持对降雨 – 径流关系影响的集对分析[J] . 人民黄河,2017,39(4):87 – 90.

[14] 王圣文,李跃清,金菊良,等. 水文水资源集对分析[M]. 北京:科学出版社,2010.

[15] 董永权,王占民. 关于相关系数的几点注释[J]. 大学数学,2008,24(2):182 – 186.