

基于 GRACE 重力数据反演黄河流域陆地水储量变化

丁皓, 史晓亮, 吴梦月

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于 GRACE 重力卫星数据反演黄河流域 2002 - 2013 年陆地水储量变化, 并通过 GLDAS 验证 GRACE 反演结果。在此基础上采用皮尔逊相关系数法进一步探究陆地水储量与降水、气温、蒸散和植被 *NDVI* 的关系。结果表明: 基于 GRACE 数据能够较好地反演陆地水储量; 2002 - 2013 年间黄河流域的水储量以 0.56 cm/a 的速度减少, 且具有明显的季节特征, 水储量在 1 - 6 月呈亏损状态, 7 - 12 月呈盈余状态; 对黄河流域水储量变化与降水、气温、蒸散和 *NDVI* 进行滞后性分析, 表明其与降水、蒸散、*NDVI* 有两个月的滞后效应, 与气温为 3 个月。

关键词: 陆地水储量; GRACE; GLDAS; 影响因子; 黄河流域

中图分类号: TV211.1⁺2; P641.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0109-07

Terrestrial water storage anomaly in the Yellow River Basin based on GRACE gravity satellite data

DING Hao, SHI Xiaoliang, WU Mengyue

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The changes of terrestrial water storage in the Yellow River Basin from 2002 - 2013 were inverted using GRACE Gravity Satellite data in this study. The inversion results were then verified by GLDAS, based on which, the relationships between terrestrial water storage and precipitation, temperature and vegetation *NDVI* were explored using Pearson correlation coefficient analysis. The results show that the terrestrial water storage data can be better retrieved using GRACE Gravity Satellite data. The water storage of the Yellow River Basin decreased at a rate of 0.56 cm/a from 2002 to 2013 with obvious seasonal characteristics, and it was in deficit status from January to June, but in a surplus status from July to December. The water storage change of the Yellow River Basin lagged behind for two months compared with precipitation, evapotranspiration and *NDVI*, and three months compared with temperature based on the results of the lagging effect analysis.

Key words: terrestrial water storage; GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment); GLDAS (Global Land Data Assimilation System); influencing factor; the Yellow River Basin

1 研究背景

陆地水储量 (terrestrial water storage, TWS) 指沿地表剖面一定范围内的水资源, 主要包括地表径流、土壤水、地下水及冰川、积雪等固态水^[1], 其变化对区域内自然和人文活动具有深刻影响, 是气候变化的综合反映^[2]。精确获取陆地水储量并分析水储量变化与气象因素之间的响应规律, 对于区域水资源规划与管理具有重要意义。

目前陆地水储量监测方法大致可分为 4 类: (1) 基于单个站点土壤水、地下水和地表径流的监测结果; (2) 基于成像卫星技术和卫星测高监测地表水; (3) 通过气象资料结合 GLDAS、SCS 等水文模型模拟; (4) 通过 GRACE 重力数据反演陆地水储量变化^[3]。前 3 种方法对陆地水储量的时空变化特征反映不全面, 而 GRACE 重力卫星观测分布均匀, 尺度统一, 有效解决了探测尺度小、空间尺度不一的问题, 从而为大、中尺度的陆地水储量探测提供了全新方法^[4]。Schmidt

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2021-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52079103)

作者简介: 丁皓 (1995 -), 男, 陕西延安人, 博士研究生, 主要从事水文与水资源方面的研究。

通讯作者: 史晓亮 (1985 -), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事资源环境遥感研究。

等^[5]利用 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 重力卫星资料监测了全球陆地水储量变化,并分析了其时空分布特征;Crowley 等^[6]研究了刚果盆地陆地水储量变化,并讨论了降水对特定季节 TWS 的补给状况;苏晓莉等^[7]采用 2002 - 2010 年的 GRACE 重力卫星数据,分析了华北地区陆地水储量的月变化,研究表明该区域的陆地水储量以 -1.1 cm/a 的趋势减少;尼胜楠等^[8]通过 GRACE 模型反演得到长江、黄河流域水储量变化;李婉秋等^[9]基于 GRACE 卫星时变重力场数据,采用组合滤波及单一尺度因子方法监测关中地区陆地水储量以及地下水储量的变化。相关研究表明,基于 GRACE 重力数据监测陆地水储量变化趋势是可行的。

黄河流域为中国重要的生态屏障^[10],近年来在全球变暖和人类活动加剧的影响下,黄河流域面临水资源短缺等严重挑战^[11]。因此,在黄河流域深入开展陆地水储量变化研究具有重要意义。尽管已有研究利用 GRACE 在黄河流域开展了水储量反演,但是未充分考虑水储量变化与植被 NDVI 的关系^[12-13]。基于此,本文基于 2002 - 2013 年 GRACE 重力数据反演黄河流域水储量变化,分析其时空变化特征,并进一步探讨陆地水储量和主要气象因子、植被 NDVI (normalized difference vegetation index) 的滞后效应和相关性,旨在为黄河流域水资源规划管理和生态保护治理提供科学依据和支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河流域东西横跨约 1 900 km,南北宽约 1 100 km,面积约为 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域内(山脉众多,东西落差大,海拔高度 0 ~ 6 255 m)。气候类型多样,上游主要为高原气候,中游以温带大陆性干旱 - 半干旱气候为主,中下游为温带大陆性半干旱 - 半湿润气候。流域内水量占全国河流总量的 2%,主要支流有渭河、白河、黑河、洮河、湟水、等。流域降水年际变化大,分布不均,夏秋多雨,春冬干旱,其中 6 - 9 月降水量占全年 70% 左右。受气候因素的影响,黄河流域呈先天性干旱,且年蒸发量达 1 200 mm^[14],远大于降水量。黄河流域范围及气象站点分布见图 1。

2.2 数据来源

采用美国德克萨斯大学空间研究中心 (Center for Space Research, CSR) 提供的 GRACE Level - 2 月重力场模型数据,时间尺度为 2002 - 2013 年,共计 141 个月,时间分辨率为 1 个月,空间分辨率为

$1^\circ \times 1^\circ$ 。该数据已去除各类潮汐引起的扰动和海洋质量影响,以及地外天体引起的重力扰动^[15]。

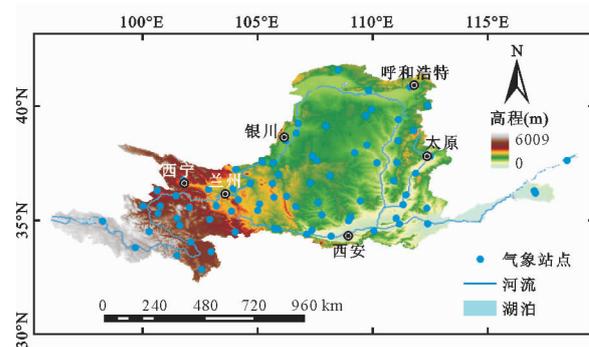


图 1 黄河流域范围及气象站点分布

全球陆面数据同化系统 (Global Land Data Assimilation System, GLDAS) 是目前应用最广泛的陆面水文模型,包含 CLM、NOVH、MOS 和 VIC 四种子模型^[16]。基于 GLDAS 的四种子模型估算黄河流域的水储量变化,并以此来验证 GRACE 反演黄河流域水储量的可行性。为了保证 GLDAS 与 GRACE 反演结果的一致性,需要对 GLDAS 数据进行 60 阶截断,并完成与 GRACE 相同半径的高斯平滑处理,但不做去相关处理,最后通过加权处理,得到黄河流域的长时间序列水储量。

降水、气温数据来源于国家气象科学数据中心 (<https://data.cma.cn>),包括 2002 年 04 月至 2013 年 12 月流域内 80 个气象站点的逐月降水和气温数据,并采用三次样条插值法对缺失数据进行空间化处理。蒸散发数据采用 NTSG (Numerical Terradynamic Simulation Group) (<http://www.ntsg.umt.edu/project/modis/default.php>) 提供的月尺度 MOD16/ET 数据,空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。逐月 NDVI 序列数据采用美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>) 提供的 MOD13A3 数据集,空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。

2.3 GRACE 数据处理

利用 GRACE 重力卫星提供地球重力场中长波成分进而反演全球时变重力场。将水储量以等效水高 ΔH 形式表达:

$$\Delta H = \frac{a\rho_{ave}}{3\rho_{water}} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos \theta) \frac{2l+1}{1+k_l} \cdot (\Delta C_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{lm} \sin(m\lambda)) \quad (1)$$

式中: a 为赤道半径; ρ_{ave} 为地球平均密度; l, m 为地球重力场的阶数和次数; $\tilde{P}_{lm}(\cos \theta)$ 为完全规格

化缔合勒让德函数; k_l 为 l 阶对应的负荷勒夫数; ΔC_{lm} 、 ΔS_{lm} 为规格化球谐系数变量; θ 为计算点余纬; λ 为计算点经度。

通过公式(1),利用地球重力场变化量求取地表质量的变化值,需对 60 阶以上高阶球谐系数进行截断,消除其产生的高频误差^[17],本文中用 60 阶重力场模型进行计算。采用 SLR 获取的 C_{20} 系数替换 GRACE 的 C_{20} 系数,解决极地轨道对卫星的干扰及低阶项不敏感的问题。靠近 60 阶的球谐系数会存在一定的噪声,本文选择半径为 350 km 的高斯平滑来降低高阶噪声的影响。GRACE 数据受测量误差、混频误差等影响,会出现明显的“南-北”条带,本文采取 Swenson 等^[18]提出的利用滑动多项式来去除南北条带误差。

2.4 研究方法

采用一元回归模型对水储量变化趋势进行分析。首先利用最大值合成法将每月的水储量变化合成为年最大化水储量变化,通过模拟某个像元在研究年限的变化趋势,进而计算整个黄河流域的水储量变化趋势,其计算公式为:

$$slope = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (i \cdot TWSA_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n TWSA_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: i 为年序列; n 为年数; $TWSA_i$ 为第 i 年的水储量变化值, cm。 $Slope > 0$ 表示像元的水储量变化值呈增加趋势, $Slope < 0$ 表示呈下降趋势。

采用皮尔逊相关系数法探究降水、径流、蒸散、气温和水储量之间的关系,计算方法如下:

$$r = \frac{\sum (XY) - \frac{\sum X \sum Y}{N}}{\sqrt{(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}) - (\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N})}} \quad (3)$$

式中: X 为 GRACE 月水储量值; Y 为各相关要素月值; N 为总月份。相关系数 $r \in [-1, +1]$, r 绝对值越接近 1, 说明两者的相关性越高。

3 结果与分析

3.1 黄河流域陆地水储量随时间变化趋势

图 2 为 GLDAS 和 GRACE 反演的陆地水储量变化的结果对比,二者年际变化特征基本上一致。GRACE 和 GLDAS 反演结果在趋势变化上保持较高相似性,分别为 -0.56 cm/a 、 -0.12 cm/a ,均表现

为减少趋势,GRACE 减少速率大于 GLDAS,原因在于 GRACE 反演过程中包含多重要素,而 GLDAS 只包括了降水、蒸散、表层土壤水、深层土壤水,对地表径流湖泊、地下水、雪水当量并未计算^[19]。GLDAS 模拟结果与 GRACE 反演结果存在滞后,时间上为一月的滞后,滞后系数为 0.368。对比两种数据反演结果,GRACE 数据更为敏感,故本文将基于 GRACE 数据反演分析黄河流域陆地水储量的变化与降水、气温、蒸散和 $NDVI$ 之间的作用关系。

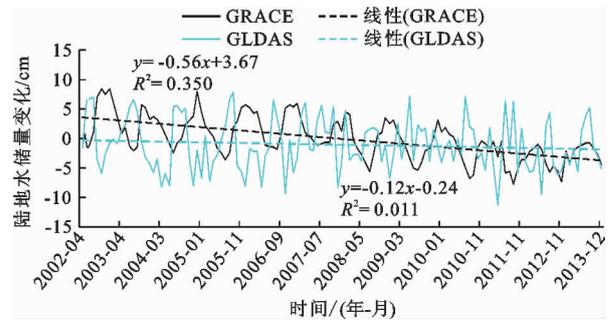


图 2 黄河流域 GRACE 反演结果与 GLDAS 模拟结果对比

黄河流域陆地水储量各年同月变化量均值如图 3 所示,其具有明显的季节周期特征,峰值出现在秋季,谷值出现在冬季。8-10 月黄河流域进入雨季,在 9 月份达到最大值(3.12 cm),此时黄河流域的陆地水储量处于盈余状态;1-6 月,流域陆地水储量全都为负值,在 4 月份达到最低值(-3.39 cm),在此阶段黄河流域的陆地水储量处于亏损状态。降水补给是陆地水储量的重要来源,降水丰沛,陆地水储量盈余,反之则亏损,黄河流域春冬干旱少雨,夏秋雨水较为充沛,6-9 月降水约占全年的 70%,研究结果与黄河流域的气候条件整体上吻合。

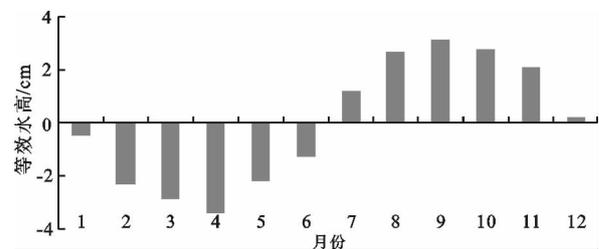


图 3 黄河流域水储量年内变化

3.2 黄河流域陆地水储量空间变化特征

黄河流域陆地水储量变化具有明显的地域差异(图 4),表现为西部增加东部减少。从西向东随着人口密度增加和工农业发展状况,其水储量减少幅度逐渐增大。水储量减少区域主要集中于河南、山东、山西、陕北和内蒙古南部等地,其中山东最为严

重,水储量以 -2.97 cm/a 的速度减少。而青海、甘肃南部、宁夏南部和关中地区水储量略有增加,其中青海地区水储量增加最为明显,增加速率最大达到 0.65 cm/a 。

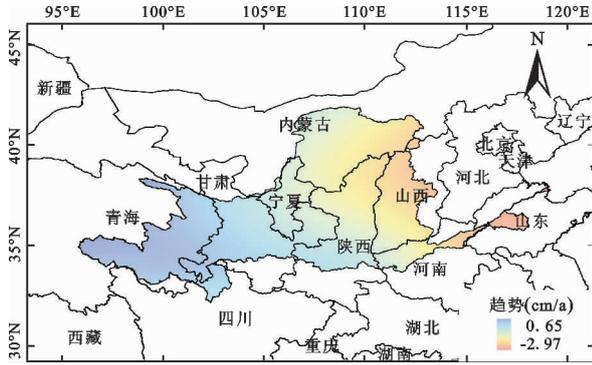


图4 黄河流域水储量空间变化趋势

为了探讨黄河流域水储量变化在不同季节的空间分布特征,将进一步对水储量季节变化的空间特

征进行分析(图5)。受气候影响,黄河流域春季降水少,因此水储量皆为负值,整个流域水储量为亏损状态,变化范围为 $-5.15 \sim -0.63 \text{ cm}$ 。青海、山东、甘肃西南、四川东北亏损量较其他区域相对较少,而山西、陕西、宁夏、内蒙古等地亏损量很大。夏季随着温度上升、雨水增加,流域内水储量明显增加,其变化范围为 $-0.23 \sim 2.32 \text{ cm}$ 。黄河沿岸的宁夏、内蒙古、陕西北部、山西西部出现盈余状态,而其他地区仍处于亏损状态。黄河流域内的降水主要集中在秋季,该时间段黄河流域水储量达到全年最大值($0.33 \sim 4.82 \text{ cm}$)。陕西、山西、内蒙古、宁夏东部及山东、河南部分地区增量较大,其他地区也略有增长,涨幅较其他地区小。冬季降水减少,黄河流域水储量出现亏损,其变化范围为 $-1.77 \sim 0.61 \text{ cm}$ 。青海、四川东北、甘肃西南虽为盈余状态,但水储量较秋季也有下降,其他区域都处于亏损状态,其中山西西部、陕西北部、内蒙古南部等地区最为严重。

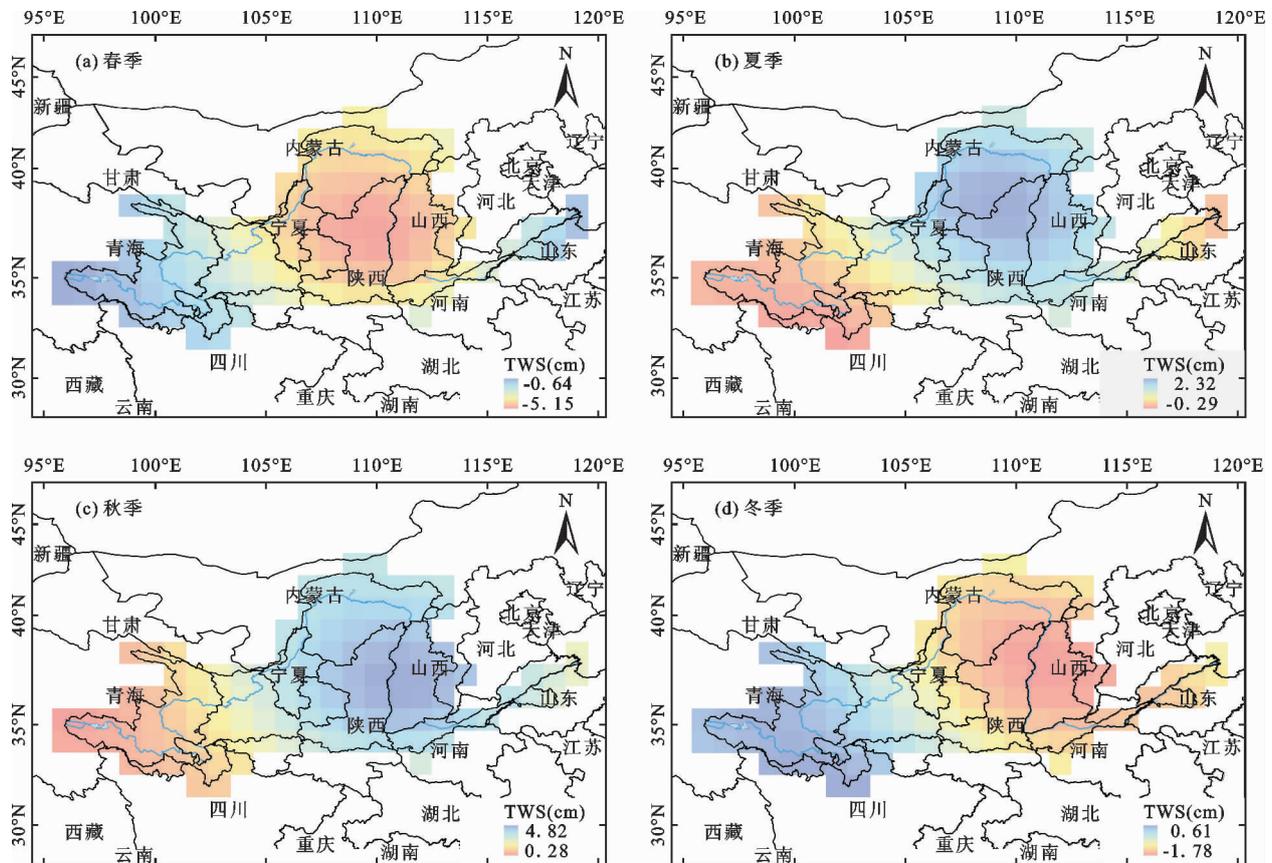


图5 黄河流域陆地水储量各季节变化量空间分布

3.3 陆地水储量变化的滞后性和相关性分析

3.3.1 陆地水储量变化的滞后性 大气水循环过程包括:降水、径流、蒸散、下渗等过程^[20]。降水是陆地水储量的重要来源,降水转换为水储量要经过

植被截留,径流汇聚、地表下渗、地下水补给等过程,在这个过程中还会受到温度、蒸散等条件的影响。因此,陆地水储量变化与降水、气温、蒸散等要素会有不同时间的滞后效应^[21]。

基于黄河流域 2002 - 2013 年陆地水储量变化值分别和月尺度降水、蒸散、气温、NDVI 数据进行滞后性分析,结果见表 1。水储量与两个月前的降水、蒸散、植被 NDVI 相关系数达到最大值,分别为 0.52、0.58、0.57,与 3 个月前的气温数据相关系数达到最大值($r = 0.65$)。即水储量相对降水、蒸散、NDVI 具有两个月的延迟效应,相对于气温具有 3 个月的延迟效应。

3.3.2 陆地水储量变化的相关性 黄河流域约 81.3% 的区域陆地水储量变化与降水成正相关,在宁夏、内蒙古西北部、甘肃部分区域陆地水储量变化与降水呈负相关,约占流域面积的 18.7%。黄河流域约 90.3% 的区域陆地水储量变化与气温变化呈正相关,在甘肃省部分区域呈负相关,约占黄河流域面积的 9.7%。黄河流域水储量变化与蒸发量变化呈正相关

的地区主要分布在山西、河南、山东、陕西中部地区及青海、甘肃部分区域,约占流域面积的 81% ;而负相关区域位于宁夏、内蒙古、甘肃东部、青海西南等区域,约占流域面积的 19%。黄河流域水储量变化与 NDVI 变化呈正相关的地区约占流域总面积的 63.4% ,主要分布在陕西和青海东部地区,而负相关地区分布在于甘肃、宁夏、内蒙古西部区域以及穿插分布在陕西和山西等区域,占流域面积的 36.6% 。

表 1 黄河流域陆地水储量与影响因素的滞后性

影响因素	同期 相关系数	滞后 1 月 相关系数	滞后 2 月 相关系数	滞后 3 月 相关系数
降水	0.22	0.45	0.52	0.39
气温	0.14	0.44	0.63	0.65
蒸散	0.27	0.49	0.58	0.51
植被 NDVI	0.30	0.51	0.57	0.47

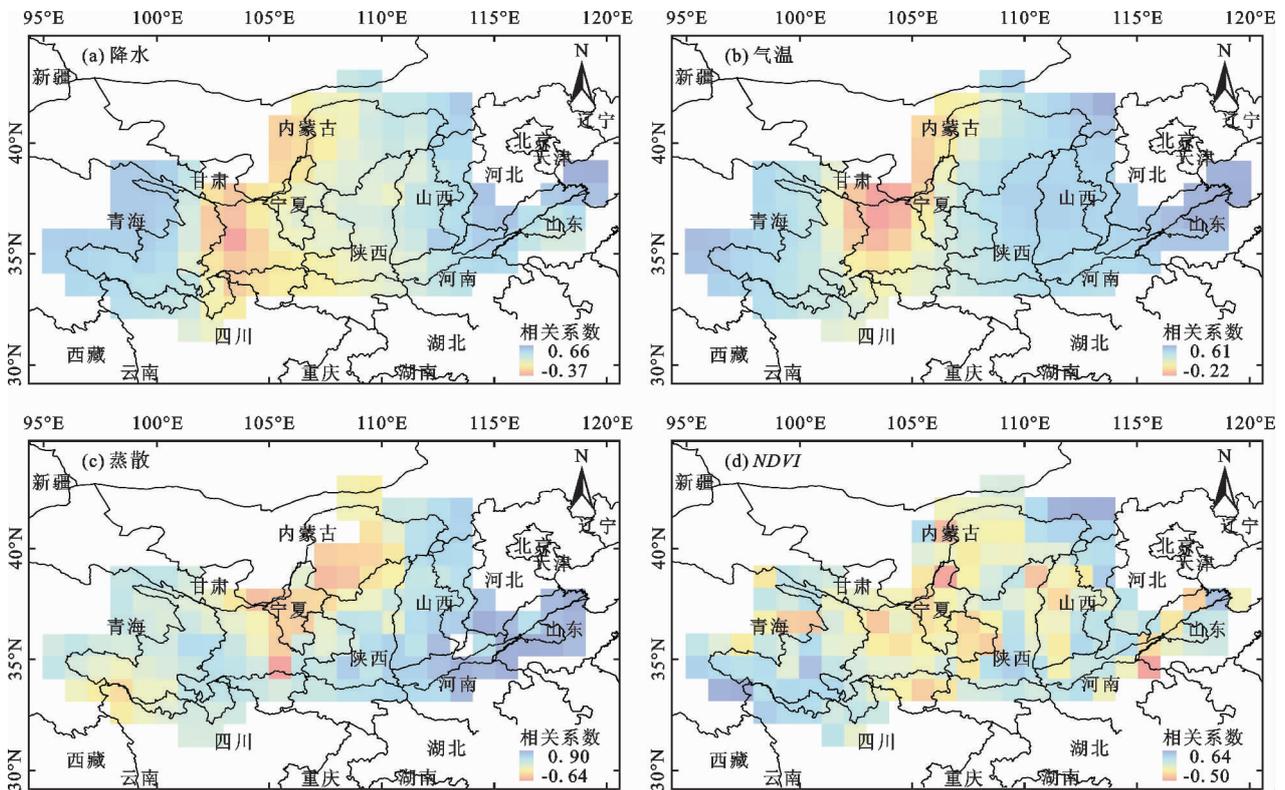


图 6 黄河流域陆地水储量变化与各影响因素相关系数空间分布

4 讨论

降水是陆地水储量变化的重要影响因素,与水储量变化有较高的相关性,在长江流域^[22]、华北地区^[4]等已得到验证。受气候条件、地形地貌影响,流域春冬干旱、夏秋多雨。流域内水储量变化与降水量呈现出相同的季节周期特征,水储量变化的峰值、谷值时间与雨季和旱季时间基本对应^[23],进一步说明降水是黄河流域水储量的重要补给源。流域

内 7、8 月降水量达到全年最大值,水储量则在 9、10 月达到最大值(图 7(a)),受高温、蒸散量大等因素影响,7、8 月水储量小于 9、10 月。水储量变化滞后于降水,主要是因为降水需要经过径流、蒸散和下渗等过程进行水储量的重新分布。流域内水储量变化与降水呈正相关的区域约占流域总面积的 81.3% ,在宁夏、内蒙古西北部、甘肃部分区域陆地水储量变化与降水呈负相关,主要原因是该区域气候干燥、降

水偏少,且植被稀少,地质灾害较为频发,地表水和地下水的水源涵养能力较差。同时,该地区建有龙羊峡、刘家峡等大型水利枢纽,其中龙羊峡和刘家峡的储水量达到 $304 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[24],库区截留了上游地表径流,无法对库区下游径流进行充分补充且水资源消耗量增大。因此造成了宁夏、甘肃南部、内蒙古西南部的降水与水储量呈负相关。

在全球变暖,流域内降水量降低的背景下,流域内水储量变化在青海、流域南部的秦岭沿线区域出现增长。主要是气温升高,流域内高原冰川和高山积雪消融,对流域水储量变化产生了重要影响。气

温对于水储量的影响存在正负反馈效应,气温升高加剧了地表蒸散过程,当地表蒸散量大于冰川和积雪融化量时,气温对水储量的升高起到抑制作用,相反,则会促进水储量增加。流域整体呈冬冷夏热,年气温差较大^[25]。每年11-4月降水较少,随着温度升高,蒸散量逐渐增大,导致流域内水储量达到全年的最低值。4-8月气温逐渐上升达到全年最高值,同时也进入了雨季,降水对陆地水进行了补充,降水补充量远大于蒸散量,水储量呈现盈余状态,并在9、10月达到全年最大年(图7(b))。比较而言,降水对水储量变化的影响大于气温、蒸散。

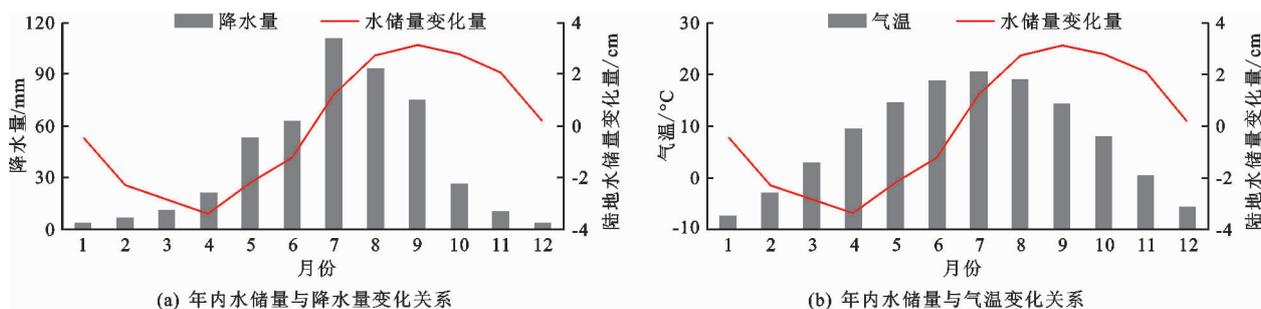


图7 黄河流域陆地水储量变化与降水、气温年内变化的关系

黄河流域植被覆盖度分布差异显著,流域南部高于北部,中下游高于上游^[26]。流域内 *NDVI* 与水储量变化呈负相关区域约占总面积的 36.6%,主要集中于甘肃、宁夏和内蒙古西部等流域中上游地区。这些地区地类以沙地、戈壁、盐碱地和裸土为主,植被类型以草地为主,约占流域面积的 47.9%^[25]。上述环境要素锁水能力差,过滤极小降水后,大部分直接蒸散或形成径流,并未对水储量进行补充,导致这些区域水储量变化与 *NDVI* 呈负相关。在黄河流域南部秦岭沿线,该地区植被覆盖度高,且垂直分布合理,减缓了区域的汇水过程和产流能力,进一步增强了地表水的下渗,故该区域水储量变化与 *NDVI* 呈正相关。另外,植被的蒸腾作用会补充大气水分,使流域南部区域降水高于北部区域,这也间接影响了流域水储量的分布。黄河流域各种生态恢复措施的实施中,由于单一植被生态系统在调节气候、涵养水源、保持水土等方面与多植被生态系统存在很大差距,其无法进行高效控水,降水会以径流形式流失,从而无法对水储量进行充分补给,所以要综合考虑区域的地形、土壤、生态等因子,因地制宜,改善区域水土流失、土壤侵蚀等环境问题,增强黄河流域的生态环境承载力^[27]。

除上述因素外,人类生产活动对水储量变化也

有重要的影响。农业灌溉、工业生产、生活用水、水利工程建设、跨流域调水等都会影响水储量变化,每年全球约 70% 的用水用于进行农业活动,这对全球水平衡产生了重要影响。黄河流域从西向东,人口密度逐渐增大,农业、工业生产活动活跃,山东、河南是我国人口、农业大省,过度抽取地下水进行生产活动,水资源消耗量远大于补给,导致地下水位持续走低。从 Siebert 等^[28]绘制的地下水灌溉面积比重图中发现,黄河流域东部灌溉用水比例超过 20%,因此导致黄河流域东部水储量变化的重要原因是工农业生产。流域中西部的山西、内蒙等地是我国重要的能源基地,长期矿产开采严重破坏了当地的地下空间结构及地表植被,导致该区域的深层土壤水亏损、地下水流失及地表锁水能力下降。黄河流域中西部水储量亏损与矿业开采有很大关系。

5 结论

本文利用 2002-2013 年的 GRACE 重力数据分析了黄河流域陆地水储量的时空变化特征,讨论了气象要素、植被要素与水储量变化的相关性,主要结论如下:

(1) 基于 GRACE 反演的陆地水储量与 GLDAS 模拟结果相关性较好。两者时间序列都表现出明显的季节分布特征,与黄河流域的气候特征较吻合。

表明 GRACE 反演陆地水储量的可行性。

(2) 黄河流域 2002 - 2013 年水储量以 0.56 cm/a 的速率递减。其空间分布特征与季节变化有较大的联系。夏秋两季,黄河中下游水储量涨幅大于上游。春冬两季,黄河流域整体为亏损状态,但黄河上游的青海、甘肃和四川部分区域与其他地区比较有少量盈余。

(3) 降水、气温、植被、径流、等要素对陆地水储量变化都有影响。其中径流对同期水储量变化影响最为明显。降水、气温、植被对水储量变化有一定的滞后效应。水储量受降水影响最为直接,受气温影响时间最长,受植被的影响作用最小。

参考文献:

- [1] 冯贵平,宋清涛,蒋兴伟. 卫星重力监测全球地下水储量变化及其特征[J]. 遥感技术与应用, 2019,34(4): 822 - 828.
- [2] 胡鹏飞,李 净,张彦丽,等. 黄土高原水储量的时空变化及影响因素[J]. 遥感技术与应用,2019,34(1):176 - 186.
- [3] CAO Yanping, NAN Zhuotong. Applications of GRACE in hydrology: A review [J]. Remote Sensing Technology & Application, 2011, 26(5):543 - 553.
- [4] 周志博,刘 杰,杨 超,等. GRACE 重力卫星探究我国华北地区陆地水储量变化[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):66 - 73.
- [5] SCHMIDT R, SCHWINTZER P, FLECHTNER F, et al. GRACE observations of changes in continental water storage [J]. Global & Planetary Change, 2006,50(1 - 2):112 - 126.
- [6] CROWLEY J W, MITROVICA J X, BAILEY R C, et al. Land water storage within the Congo Basin inferred from GRACE satellite gravity data [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(19):L19402.
- [7] 苏晓莉,平劲松,叶其欣. GRACE 卫星重力观测揭示华北地区陆地水量变化[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(6):917 - 922.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 奋斗,2019(20):4 - 10.
- [11] 赵莺燕,于法稳. 黄河流域水资源可持续利用:核心、路径及对策[J]. 中国特色社会主义研究,2020(1):52 - 62.
- [12] 张 璐,江善虎,任立良,等. 基于 GRACE 数据监测黄河流域陆地水储量变化[J]. 人民黄河,2020,42(4): 47 - 51 + 64.
- [13] 李晓英,吴淑君,蔡晨凯,等. 黄河流域陆地水储量时空变化[J]. 哈尔滨工程大学学报,2019,40(11):1833 - 1838.
- [14] 刘柏君,彭少明,崔长勇. 新战略与规划工程下的黄河流域未来水资源配置格局研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2):1 - 7.
- [15] 徐子君,尹立河,胡伏生等. 2002 - 2015 年西北地区陆地水储量时空变化特征[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(4):314 - 320.
- [16] 王 文,崔 巍,王 鹏. GLDAS Noah 模型水文产品与中国地面观测及卫星观测数据的对比[J]. 水电能源科学, 2017,35(5):1 - 6.
- [17] 冯 伟,王长青,穆大鹏,等. 基于 GRACE 的空间约束方法监测华北平原地下水储量变化[J]. 地球物理学报, 2017,60(5):1630 - 1642.
- [18] SWENSON S, YEH P J F, WAHR J, et al. A comparison of terrestrial water storage variations from GRACE with *in situ* measurements from Illinois [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(16):627 - 642.
- [19] 孙 倩,阿丽亚·拜都热拉. 基于 GRACE 卫星和 GLDAS 系统的地下水水位估算模型:以和田地区克里雅河流域为例[J]. 地理科学进展,2018,37(7):912 - 922.
- [20] 王泓云. 气候变异和植被变化对中国陆地水储量的影响研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [21] 曹艳萍,南卓铜. 利用 GRACE 重力卫星监测黑河流域水储量变化[J]. 遥感技术与应用,2011,26(6):719 - 727.
- [22] 田小娟,邹 芳,金双根. 气候变化和人类活动对长江流域水储量变化的影响研究[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(04):371 - 376 + 436.
- [23] 周 帅,王义民,畅建霞,等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报,2019,50(10):1231 - 1241.
- [24] 刘晓燕,王瑞玲,张原锋,等. 黄河河川径流利用的阈值[J]. 水利学报,2020,51(6):631 - 641.
- [25] 郑 健,马 静,王 燕,等. 基于气候分区的甘肃省参考作物蒸发蒸腾量时空分布特征[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):240 - 247.
- [26] 郭 帅,裴艳茜,胡 胜,等. 黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J]. 水土保持通报, 2020,40(3):1 - 7 + 13.
- [27] 高健翎,高 燕,马红斌,等. 黄土高原近 70a 水土流失治理特征研究[J]. 人民黄河,2019,41(11):65 - 69.
- [28] SIEBERT S, BURKE J, FAURES J M, et al. Groundwater use for irrigation — a global inventory [J]. Hydrology & Earth System Sciences & Discussions, 2010, 14(10): 1863 - 1880.