

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.093

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. ZHOU Z B, LIU J, YANG C, et al. The variation of terrestrial water storage in north China based on GRACE gravity satellite[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 66-73. (in Chinese)

# GRACE 重力卫星探究我国华北地区陆地水储量变化

周志博<sup>1,2</sup>, 刘杰<sup>3</sup>, 杨超<sup>4</sup>, 李克昭<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430077; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003; 4. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093)

**摘要:**利用 GRACE(gravity recovery and climate experiment)卫星 2003—2013 年资料分析了华北地区陆地水储量变化,并与同时间段的 CPC(climate prediction center)、GLDAS(global land data assimilation system)水文模型进行比较,GRACE 与 CPC 和 GLDAS 的相关系数分别为 0.679、0.817,GRACE 与 GLDAS 相关性更强。得出结论:2003—2013 年华北地区陆地水减少,变化率为  $-1.8 \text{ km}^3/\text{a}$ ,扣除地表水后,地下水变化率为  $-1.3 \text{ km}^3/\text{a}$ 。其中,2003—2004 年地下水有所增加,2005—2013 年下降,2010 年以后下降趋势变缓。GRACE 反演与水文模型模拟结果显示,2006、2009 年的等效水柱高(equivalent water height, EWH)均明显小于长期平均值,并且 GRACE 最值对应月份异常,对比国家统计局数据分析结果,这两年水资源总量、地表水资源量、地下水资源量处于低谷区,这与同年发生的自然灾害相对应。

**关键词:**GRACE;GLDAS;CPC;陆地水储量;华北地区

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## The variation of terrestrial water storage in north China based on GRACE gravity satellite

ZHOU Zhibo<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>3</sup>, YANG Chao<sup>4</sup>, LI Kezhao<sup>3</sup>

(1. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, Wuhan 430077, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The variation of terrestrial water storage from 2003 to 2013 was analyzed using GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment) satellite data and then compared with CPC(Climatic Prediction Center), GLDAS(Global Land Data Assimilation System) hydrological models in north China. The correlation coefficients of GRACE, CPC and GLDAS are 0.679 and 0.817, respectively, while GRACE has a stronger correlation with GLDAS. The results showed that: terrestrial water storage and groundwater decreased at a rate of  $-1.8 \text{ km}^3/\text{a}$  and  $-1.3 \text{ km}^3/\text{s}$  from 2003 to 2013 after deducting surface water as a whole. It's worth noting that the variation of groundwater presented different stages: increased from 2003 to 2004 and declined from 2005 to 2013, the downward trend had slowed since 2010. GRACE and hydrological models showed that equivalent water height was significantly smaller than the long-term average in 2006 and 2009. The month corresponding to the GRACE maximum was unusual in the two years, compared with the results of the National Bureau of Statistics of China, the total water resources, surface water

收稿日期:2019-11-13 修回日期:2020-04-17 网络出版时间:2020-04-28

网络出版地址:https://kns.cnki.net/KCMS/detail/13.1430.tv.20200428.0935.002.html

基金项目:国家自然科学基金(41774039);河南省高校基本科研业务费专项资金(NSFRF170807)

作者简介:周志博(1994—),男,河南新密人,主要从事惯性导航研究。E-mail:270714090@qq.com

通信作者:刘杰(1988—),男,河南焦作人,博士,主要从事卫星重力与地球重力场研究。E-mail:liujie2016@hpu.edu.cn

resources, and groundwater resources in the valley area, which corresponded to the natural disasters occurred in those two years.

**Key words:** GRACE; GLDAS; CPC; terrestrial water storage; north China

陆地水储量变化是国内外的研究热点,该研究对理解水循环、预测气候、指导农业生产及防治自然灾害等具有重要意义。目前监测方法主要有以下几种<sup>[1-2]</sup>:通过遥感手段来进行反演,其不足主要体现在观测深度受限,不能探究深层地下水的变化;在地面建立土壤水分观测站来监测,缺点在于不同地区分布不均,并且成本较高;采用地基大气资料与水文数据结合的方式,其不足在于两者所监测的空间范围以及分辨率不一定完全一致,导致不确定性较大。2002年3月,GRACE重力卫星升空,开辟了研究陆地水储量的新途径<sup>[3-4]</sup>,GRACE卫星由美德联合研制发射,其重要的科学目标是提供高精度和高空间分辨率的静态及时变地球重力场,其原理是通过K波段微波系统精确测定出两颗星之间的距离及速率变化来反演地球重力场,由此推求地球表层质量分布,进而研究陆地水储量季节性以及年际变化<sup>[5-6]</sup>。它可以进行全球观测,并且尺度统一<sup>[7]</sup>,是目前空间分辨率最高的重力探测方式,其研究日渐成熟和普遍。Wahr等<sup>[8]</sup>利用模拟数据研究了通过GRACE卫星数据来反演陆地水变化的基本理论和方法,为后续研究奠定了基础。Taply等<sup>[9]</sup>利用GRACE卫星重力数据对南美洲水量进行探测分析,证明了其数据精度能够用于大流域水文水量研究。叶叔华等<sup>[5]</sup>通过70个月的GRACE时变重力场数据证实了其在监测水质变化乃至一个相对较小的区域的水质量变化方面的潜能。王长青等<sup>[10]</sup>在中国地球物理学会报告中指出,2002—2010年GRACE的TWS减去GLDAS地表水(包含土壤湿度陆面冰雪等陆地表面的含水量),华北中部地区的地下水变化可达 $(-2.1 \pm 0.5) \text{ km}^3/\text{a}$ 。苏晓莉等<sup>[11]</sup>利用GRACE卫星重力观测揭示华北地区陆地水量变化,并与GLDAS、CPC水文模型进行了比较,定量分析地表水、地下水的变化速率分别为 $-0.6$ 、 $-0.5 \text{ cm/a}$ 。李琼等<sup>[12]</sup>利用2003—2010年GRACE月重力场数据进行分析,发现2009年秋至2010年春中国西南区域陆地水储量明显减少,与该时段发生的干旱事件相一致。许民等<sup>[1]</sup>利用GRACE卫星数据讨论分析了2002—2010年长江流域水储量的时空变化,并对其上中下游水储量进行了分析,效果良好。冯伟<sup>[13]</sup>利用GRACE和水文模式进行估计,表明在

2003—2010年,华北地区地下水损耗率为 $(2.2 \pm 0.3) \text{ cm/a}$ 。曹艳萍等<sup>[14]</sup>利用GRACE卫星研究河南省水储量时空变化特征,指出在2002—2014年,河南省水储量处于递减趋势,下降速率为 $-6.34 \text{ mm/a}$ 。束美珍等<sup>[15]</sup>通过GRACE数据研究了黄淮海地区2003—2014年水储量时空变化,得出其下降速率为 $0.42 \text{ mm/月}$ 的结论。这说明GRACE重力卫星能够有效弥补传统陆地水储量变化监测方法的不足,并且可以用于分析水储量的空间分布和时间变化。重力卫星可以说是当下研究区域和全球水储量变化的首选方法,也是以后的发展方向。我国华北地区人口众多,经济发展迅速,水资源需求量大,自20世纪70年代起就开始大量开采地下水,地下水的严重超采,带来了大面积地面沉降、海水入侵、土壤盐化等一系列生态环境问题<sup>[13]</sup>,是国内水资源研究的重点区域。南水北调中线工程,2014年正式通水,对华北地区的水储量变化有重要的影响。本文在前人研究基础之上,利用GRACE卫星重力数据对华北地区陆地水储量变化进行分析,同时结合GLDAS和CPC水文模型数据进一步分析了地下水储量变化,利用国家统计局水资源数据估算了该地区人类开采地下水的速率。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

华北地区:太行山脉以东,包括京津冀、山东等地,基本属于平原地区,海拔低,地势平;太行山脉以西是黄土高原,兼有暖温带和中温带、半湿润和半干旱的特征。平原区属于温带季风气候,高原区属于大陆性季风气候,对气候变化十分敏感。在黄土高原地区,冬季的特征是寒冷干燥、降水稀少。春季温度回升,降雨量不足,所以春旱现象比较严重。年降水量 $150 \sim 750 \text{ mm}$ ,基本上集中在7—9月<sup>[16]</sup>。大气降水是高原浅层地下水的主要补给来源,大部分地区地下水贫乏。

作为我国重要的粮食产区以及工业发展基地,华北地区已经是国内水资源最紧张的地区之一,为了满足人口增长和经济发展之需,华北地区大量开采地下水,导致地下水位不断下降。因此,对该地区水资源的研究十分重要,可以为水资源的分配调度、

合理利用提供相关依据。

## 1.2 卫星重力数据

卫星重力数据用于反演陆地水储量,目前国际上有 GFZ(German Research Centre for Geosciences)、CSR(the University of Texas at Austin Center for Space Research)、JPL(Jet Propulsion Laboratory)等机构负责数据的管理与发布。本文采用 2003 年 1 月至 2013 年 12 月的 CSR RL05 数据(<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>),个别缺失数据使用 SPSS“统计产品与服务解决方案”软件中邻近点的平均值方法进行替换。由于 GRACE 卫星轨道倾角较高,对重力场低阶项  $C_{20}$  不敏感<sup>[17-19]</sup>,重力场模型中没有 1 阶项,所以相应数值由 SLR(satellite laser ranging)测得的数据进行替换。对于 GSM 模型,非潮汐大气、高频海洋信号以及各种潮汐(包括海潮、固体潮和极潮等)的影响在处理过程中已经扣除。

由于观测误差、建模误差、球谐系数间的相关性误差以及高阶项的截断误差会出现南北条带、噪声等影响,为了更好地提取重力场信号,还需要对数据进行滤波处理,常用的有高斯滤波、扇形滤波等。王志栋<sup>[20]</sup>指出对于相同的滤波半径,扇形滤波的效果优于高斯滤波,能有效去除条带误差。因此,本文采用扇形滤波的方法,这是一种非各向同性的滤波方式,同时对球谐位系数的阶和次进行滤波。

地球重力场变化、地球表面质量的迁移和重新分布、大地水准面变化这三者之间相互联系,通过 GRACE 卫星重力数据反演水储量变化的方法以及原理主要体现在如下公式,最终表示为水柱高  $\Delta h_{\text{water}}$  的形式<sup>[2,20-23]</sup>。

$$\Delta h_{\text{water}} = \frac{2\pi R_{\text{earth}} \rho_{\text{earth}}}{3\rho_{\text{water}}} \sum_{n=0}^{\infty} W_n \sum_{m=0}^n \overline{P}_{nm}(\cos\theta) \frac{2n+1}{1+k_n} W_m \times (\Delta C_{nm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{nm} \sin(m\lambda)) \quad (1)$$

式中: $R_{\text{earth}}$ 表示地球半径; $n$ 、 $m$ 分别表示重力场的阶数和次数; $\theta$ 表示余纬; $\lambda$ 表示经度; $\overline{P}_{nm}$ 表示归一化的缔合勒让德函数; $\Delta C_{nm}$ 、 $\Delta S_{nm}$ 表示球谐系数的变化量; $\rho_{\text{earth}}$ 表示地球平均密度; $k_n$ 为负荷勒夫数; $W_n$ 、 $W_m$ 分别为与 GRACE 球谐位系数阶、次相关的高斯滤波权重系数。

为了得到华北地区陆地水储量的相对变化,本文选取所有月重力场模型的平均值为基准,然后将各月的值减去平均值得到的差值作为相对变化量进行分析<sup>[24]</sup>。

## 1.3 水文模型数据

GRACE 卫星数据可以用来反演陆地水储量变化,目前常用水文数据模型进行检验。本文采用 GLDAS 和 CPC 两个国际上通用的水文模型进行

比较。GLDAS 水文模式来自美国宇航局哥达航空中心(Goddard Space Flight Center,NASA)和美国国家环境预报中心(National Centers of Environmental Prediction,NCEP)([ftp://hydro1.sci.gsfc.nasa.gov/data/s4pa/GLDAS\\_V1/GLDAS\\_NOAH10\\_M/](ftp://hydro1.sci.gsfc.nasa.gov/data/s4pa/GLDAS_V1/GLDAS_NOAH10_M/))。该模型基于卫星和地面观测数据,利用先进的地表建模和数据同化技术反映最理想的地表状态,其中包含土壤温度、土壤湿度、蒸发量、积雪、径流等物理量。本文采用空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的月数据。CPC 水文模型来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的气象预报中心(<ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/ggfc/water/CPC/>)。该模型根据全球观测到的降水分布而建立,输入数据为每日和每小时的降水分析结果、太阳辐射分布、地表大气压、温度以及水平风速等,输出数据为地表积雪厚度,土壤温度,土壤水含量等,时间间隔为 1 个月,空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,土壤水深度至 1.6 m。为了与前面 GLDAS 数据处理保持一致,本文将相邻 4 个数据进行平均(转化为  $1^\circ \times 1^\circ$ )作为该点土壤水含量的估计,反映了地表的土壤水分变化和积雪变化<sup>[14]</sup>。本文对水文数据采取与 GRACE 数据相同的处理方法<sup>[25]</sup>。

## 1.4 国家统计局数据

国家统计局相关水资源数据可用来分析降雨对地下水的补给,从而估算由于人类开采导致地下水的变化。数据来自国家统计局官网(<http://data.stats.gov.cn/>)。下载京津冀、河南省、山东省以及山西省 2004—2016 年的数据(包括水资源总量、地表水资源量、地下水资源量、用水总量等),将其相加得到整个研究区域(华北地区)的数据。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 GRACE 重力卫星反演结果与水文模型模拟结果分析

利用 CPC、GLDAS 水文数据、GRACE 重力数据分析华北地区水储量变化见图 1,三者的变化趋势整体上相符合,具有较强的相关性,见表 1。其中,CPC 水文模型变化幅度最大,GRACE 重力模型次之,GLDAS 水文模型最小。CPC 与 GLDAS 均为水文模型,在实际应用中往往表示地表水储量变化。从图表中可以看到:由于数据建立与发布机构不同,建模方式不同,其输入与输出存在一定差异,但它们的变化趋势基本上是一致的。GRACE 数据反演结果包括地表水、地下水等在内的所有陆地水

储量,因此会比 GLDAS 数值大,这与苏晓莉等<sup>[11]</sup> 研究华北地区陆地水量变化相一致。

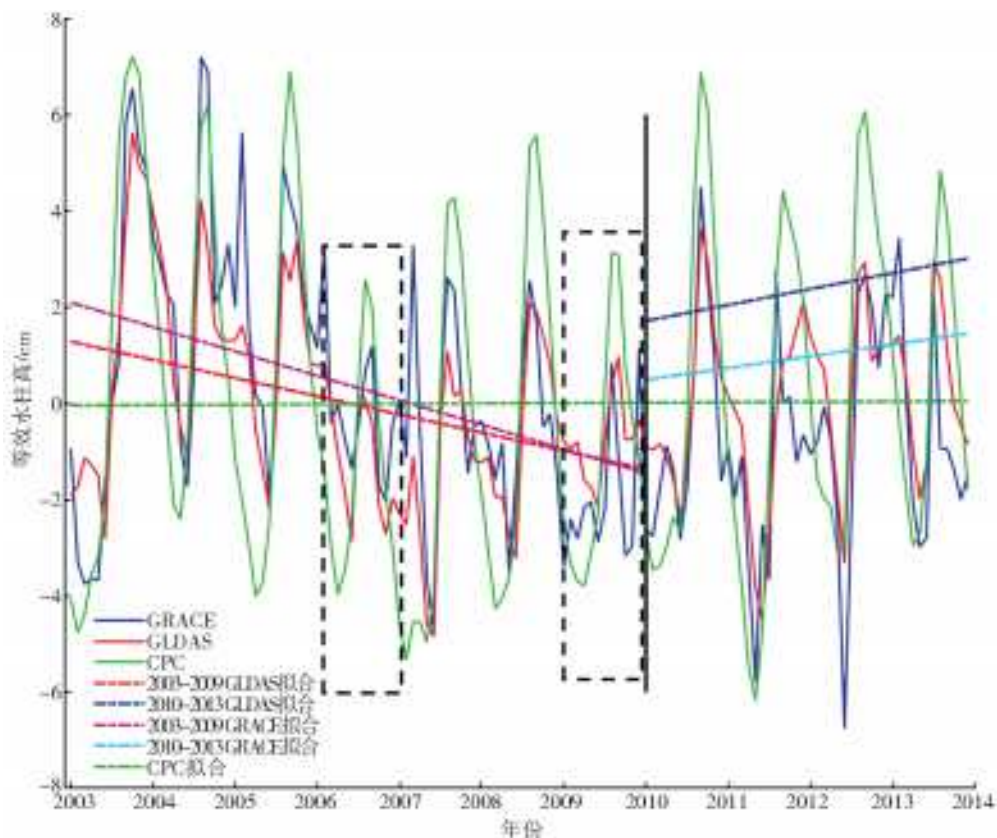


图 1 华北地区水储量变化

Fig. 1 The variation of water reserves in north China

表 1 CPC、GLDAS 水文数据与 GRACE 卫星数据相关性

Tab. 1 Correlativity analysis between CPC, GLDAS hydrographic data and GRACE satellite data

类型	CPC	GLDAS	GRACE
CPC	1	0.822	0.679
GLDAS	0.822	1	0.817
GRACE	0.679	0.817	1

注:三者之间有较强的相关性, GLDAS 水文模型与 GRACE 相关性更显著。

如图 1 所示, CPC 水文模型基本处于平稳状态,无明显增减趋势。GLDAS 水文模型与 GRACE 更为一致,从 2003 年初到 2009 年末显著下降,这与卢飞等<sup>[26]</sup> 研究结论 2003—2012 年华北平原陆地水和地表水主要变化集中在 2004—2008 年基本一致; 2010 年以后,图中所示陆地水、地表水轻微上升,其中地表水变化与卢飞<sup>[26]</sup> 等的研究结论一致,陆地水有所不同,由于 2011 年后 GRACE 存在缺失值,这可能是由不同的替换方法造成的,但仍可得到如下结论:在研究时间段内,虽然陆地水长期来看处于下降趋势,但 2010 年以后有所减缓。

为进一步了解水储量的年内变化,比较它们的最大、最小值见表 2。

对于最大值: CPC 水文模型出现在 8、9、10 月,

其中 8、9 月居多; GLDAS 水文模型较分散,但 8、9 月居多; GRACE 最大值同样较多集中在 8、9 月,这是共同点。

表 2 CPC、GLDAS 水文数据和 GEACE 卫星数据 2003—2013 年最值对应的月份

Tab. 2 Monthly maximum and minimum values of CPC, GLDAS hydrographic data and GRACE satellite data from 2003 to 2013

年份	最大值出现的月份			最小值出现的月份		
	CPC	GLDAS	GRACE	CPC	GLDAS	GRACE
2003	10	10	10	2	6	3
2004	9	8	8	5	6	6
2005	9	10	2	4	6	6
2006	8	2	2	4	6	11
2007	9	8	3	2	6	6
2008	9	8	8	3	6	5
2009	8	9	12	4	6	1
2010	9	9	9	2	6	6
2011	9	12	8	5	6	5
2012	9	9	9	5	6	6
2013	8	7	2	4	5	5

对于最小值: CPC 水文模型对应 2、3、4、5 月,其中 4、5 月居多; GLDAS 很稳定,基本上是 6 月,只有

2013 年是 5 月;GRACE 比较分散,不过 5、6 月居多。

对于最大、最小值对应的月份分布而言,对应的异常年份有 2006、2009 年。文献[27]指出:2006 年全国旱灾的发生大体可分为 3 个阶段:春旱(3 至 5 月)、夏伏旱(6 月上旬至 8 月下旬)和秋冬旱(9 月后)。江东等[28]指出,2008 年 10 月以后旱情逐渐加重,2009 年 1 月下旬各地旱情达到了最严重程度。这在图 1 中也有体现,CPC、GLDAS 与 GRACE 变化趋势一致,振幅明显减小,虚线矩形框所示。

华北地区属季风气候:一年中夏季降雨量最大,此时土壤含水量、径流量以及湖泊、水库蓄水量会增加,因此水储量往往会在夏秋两季(8、9 月)达到最大;冬季寒冷干燥,降雨量少,进入春季,雨水不足,干旱情况会延续,导致缺水严重发生春旱(4、5 月),随后降雨量增加,干旱情况得以缓解。这与表中最大值对应月份的分布情况较为一致。

## 2.2 华北地区地下水变化

GRACE 卫星所监测的是研究区域的陆地水储量变化。为得到华北地区地下水变化量,还需从陆地水中扣除地表水,考虑到水文模型的输出参数以及水平衡方程,本文将 GLDAS 视为反映地表水储量变化的模型。这里的地表水与 2.3 节国家统计局

数据中地表水资源量不一样,此处的地表水指土壤含水量和雪水当量(在华北地区,雪水当量的影响本文忽略不计<sup>[13]</sup>)。

从图 2 可以看出,陆地水、地表水、地下水都处于下降趋势。华北地区面积共 698 727.39 km<sup>2</sup>,通过最小二乘法拟合出 2003—2013 年水储量的变化率,其中陆地水为 -0.26 cm/a,相当于 -1.8 km<sup>3</sup>/a,地下水为 -0.18 cm/a,相当于 -1.3 km<sup>3</sup>/a。如图中红实线所示,从 2003 年初到 2004 年,地下水处于上升趋势,这是高降雨量和低气温共同作用的结果,高降雨量保证了充足的水量来源,低气温减少了水分的蒸发;2005 年以后下降,这与冯伟<sup>[13]</sup>华北地下水变化时间序列自 2005 年以来持续下降相一致。本文基于 2004—2009 年的数据进行拟合运算,得到地下水变化率为 -2.4 km<sup>3</sup>/a,Cao 等<sup>[29]</sup>利用其构建的华北平原地下水模型得到 2002—2008 年华北平原地下水储量以 4 km<sup>3</sup>/a 的速率减少,冯伟<sup>[13]</sup>的研究结果为 (-3.9±1.6) km<sup>3</sup>/a,本文的结果要小,其中的一个原因可能是选取的研究区域不完全一致。Cao 等<sup>[29]</sup>论文中不包括山西,但是包含了山东部分地区。冯伟<sup>[13]</sup>论文中主要是指北京、天津、河北和山西等地,本文中还包括了河南和山东。

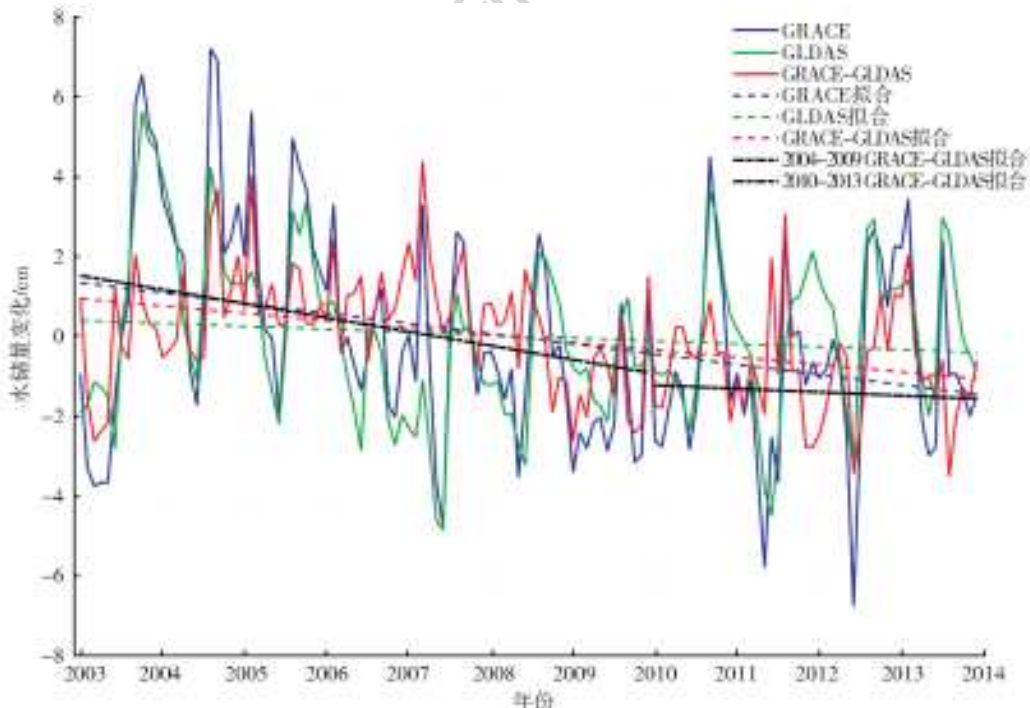


图 2 华北地区陆地水、地表水及地下水变化

Fig. 2 The change of terrestrial water, surface water and groundwater in north China

## 2.3 国家统计局水资源数据分析

为进一步分析华北地区陆地水储量变化情况,本文结合国家统计局数据进行论证,见图 3。这里的水资源总量指当地降水形成的地表和地下水总

量,即地表径流量与降水入渗补给量之和。这里的地表水资源量指河流、湖泊以及冰川等地表水体中可以逐年更新的动态水量,即天然河川径流量,与 GLDAS 水文模型所表示的土壤含水量不完全一样。这里的

地下水资源量指地下饱和含水层逐年更新的动态水量,即降水和地表水入渗对地下水的补给量。这里的用水总量指各类用水户取用的包括输水损失在内的毛水量。可以看出:水资源总量、地表水资源量呈现出下降趋势,并且两者较为一致,可以得知地表水资源量是水资源总量的重要影响因素;地下水资源量也在下降,但变化不明显;用水总量在不断上升。2006、2009年,水资源总量、地表水资源量、地下水资源量都出现了低谷,如图中椭圆所示,这与 GRACE 反演结果一致。拟合出 2004—2013 年水资源总量的变

化率为 $-1.5 \text{ km}^3/\text{a}$ ,GRACE 在相同时间段内的拟合结果 $-2.2 \text{ km}^3/\text{a}$ 。对华北地区而言,忽略冰川的影响,水资源变化一方面是地表径流量与降水入渗补给,另一方面是人类开采用水。对地下水资源量进行拟合,变化率为 $-0.02 \text{ km}^3/\text{a}$ ,可知降水和地表水入渗对地下水的补给量基本不变,由此可以推出人类用水开采量约为 $0.7 \text{ km}^3/\text{a}$ 。苏晓莉等<sup>[11]</sup>在论文中指出华北地区降雨量减少与地下水超采很可能是造成地下水减少的主要因素,从文中分析来看,地下水超采的影响要远远大于降雨量减少的影响。

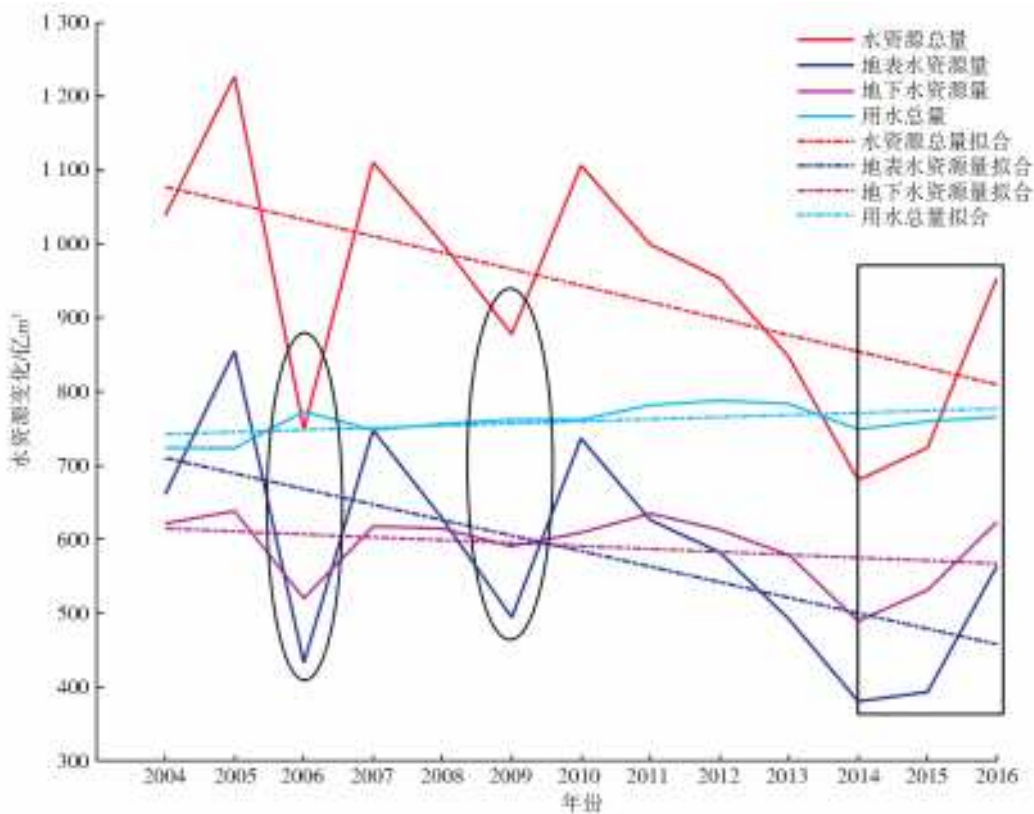


图3 华北地区(包含京津冀、河南省、山东省以及山西省)水资源变化

Fig. 3 Changes in water resources in north China (including Beijing-Tianjin-Hebei, Henan Province, Shandong Province, and Shanxi Province)

从图3可知,水资源总量、地表水资源量、地下水资源量在2014年出现最小值,随后逐渐上升,如图中矩形框所示。2004—2014年,水资源总量和地表水资源量有升有降,但是没有连续两年上升的,但是在2014—2016年,连续两年上升;对于地下水资源量,2014—2016年上升的幅度也要大于2009—2011年上升的幅度。

### 3 结论

本文利用2003年1月至2013年12月的GRACE重力数据分析了华北地区陆地水储量变化,同时将同时段的CPC、GLDAS两种水文数据采用相同的处理方式进行比较,又结合国家统计局数据分析,

得到了如下结论。

(1)水文模型CPC、GLDAS均与GRACE具有较强的一致性,GLDAS水文模型与GRACE相关性更强,相关系数为0.817。三种模型的变化趋势与华北地区的气候变化特征相符合,并且均能反映出2006、2009年华北地区发生的自然灾害,这与国家统计局的数据也一致,同时,这两年GRACE最值的月份也较为异常。

(2)基于GRACE卫星数据和GLDAS水文数据估计了华北地区地下水的变化,2003—2013年呈下降趋势,变化率为 $-1.3 \text{ km}^3/\text{a}$ ,其中2003—2004年处于上升趋势,2005—2013年处于下降趋势,不过2010年后下降趋势变缓。

(3)国家统计局 2004—2016 年地表水资源量与水资源总量呈现出明显下降趋势,并且两者变化率相近,用水总量不断上升。拟合出 2004—2013 年水资源总量的变化率为  $-1.5 \text{ km}^3/\text{a}$ , GRACE 在相同时间段内的拟合结果  $-2.2 \text{ km}^3/\text{a}$ 。由于降水和地表水入渗对地下水的补给量变化为  $-0.02 \text{ km}^3/\text{a}$ ,基本不变,由此可以推出人类用水开采量约为  $0.7 \text{ km}^3/\text{a}$ ,进一步证明地下水开采才是造成地下水减少的主要因素。

#### 4 展 望

对于水储量变化的研究十分迫切,特别是在水资源日益紧张的现状下,方法需要更具适用性,对象需要更有针对性。就本文而言,进一步的探究方向如下。

(1)缺失值替换方法研究,由于卫星数据不可避免会有缺失值,出现连续几个月数据缺失的情况对结果影响比较大,需要寻找更为有效合理的替换方法。

(2)本文的研究对象是华北地区,具体包括京津冀以及河南、山东、山西,对于变化率的计算结果取的是平均值,关注的是整体陆地水储量的时间变化,对空间变化研究不足,只有突出水储量变化显著的区域,才能提出有效的建议。

GRACE-Follow-On 计划在时空分辨率和精度方面均有所提升<sup>[2]</sup>,将来非常有希望借助于新计划的数据进行更加详细和深入的分析。

#### 参考文献:

[1] 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. DOI:10.3724/SP.J.1033.2013.00068.

[2] 曹阳,杨明祥,雷晓辉,等. GRACE 卫星数据在国内陆地水储量反演中的应用综述[J]. 中国农村水利水电, 2017(8): 74-79. DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2017.08.017.

[3] 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. DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2001.03.001.

[4] 宁津生,罗佳,王正涛. 卫星重力与地球重力场[J]. 地理空间信息, 2008, 6(1): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2008.01.001.

[5] 叶叔华,平劲松,苏晓莉,等. GRACE 重力卫星揭示的水储量季节性变化[J]. 航天器工程, 2010, 19(4): 1-7. DOI:10.3969/j.issn.1673-8748.2010.04.001.

[6] 吴长春. 基于 GRACE 重力卫星数据非洲大陆水储量的时空变化分析[D]. 杭州:浙江大学, 2017.

[7] 许民,张世强,王建,等. 利用 GRACE 重力卫星监测祁

连山水储量时空变化[J]. 干旱区地理, 2014, 37(3): 458-467. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.03.006.

[8] 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): 30205-30229. DOI: 10.1029/98JB02844.

[9] 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. DOI: 10.1126/science.1099192.

[10] 王长青,冯伟,钟敏. 利用水文测站和重力卫星观测资料研究华北地下水变化[C]. 长沙:中国地球物理学会第二十七年会论文集, 2011: 869.

[11] 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. DOI: CNKI: SUN: JDXK. 0.2012-06-012

[12] 李琼,罗志才,钟波,等. 利用 GRACE 时变重力场探测 2010 年中国西南干旱陆地水储量变化[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1843-1849. DOI: 10.6038/cjg20130606.

[13] 冯伟. 区域陆地水与海平面变化的卫星重力监测研究[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2013.

[14] 曹艳萍,赵芳. 利用 GRACE 卫星研究河南省水储量时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2). DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.045.

[15] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.20180013.

[16] 张锐. 华北平原水储量变化及其影响机制分析[D]. 北京:首都师范大学, 2013.

[17] 叶叔华,苏晓莉,平劲松,等. 基于 GRACE 卫星测量得到的中国及其周边地区陆地水量变化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1580-1586. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2011.05.043.

[18] 曹艳萍,南卓铜. GRACE 重力卫星数据的水文应用综述[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 543-553. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00112

[19] CHEN J L, RODELL M, WILSON C R, et al. Low degree spherical harmonic influences on Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage estimates [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(14): 57-76. DOI: 10.1029/2005GL022964.

[20] 王志栋. 利用 GRACE 时变重力场探测青海区域陆地

- 水变化[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [21] 刘锋. GRACE 卫星时变重力场研究[D]. 西安:长安大学,2009. DOI:10.7666/d.Y1527530.
- [22] 段建宾. 利用时变卫星重力数据解算中国陆地水储量变化[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所,2006.
- [23] WAHR J M. Time Variable Gravity from Satellites [M] Volume 3: Geodesy. 2007. DOI: 10.1016/B978-044452748-6.00176-0.
- [24] 魏浩翰,何秀凤,郑加柱. 联合重力卫星数据及气候水文模型监测西南地区陆地水储量变化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(6):488-492. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.06.004.
- [25] 冯伟,JEAN-MICHEL L,钟敏,等. 利用重力卫星 GRACE 监测亚马逊流域 2002—2010 年的陆地水变化[J]. 地球物理学报,2012,55(3):814-821. DOI:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.011.
- [26] 卢飞,游为,范东明,等. 由 GRACE RL05 数据反演近 10 年中国大陆水储量及海水质量变化[J]. 测绘学报,2015,44(2):160-167. DOI:10.11947/j. AGCS.2015.20130753.
- [27] 2006 年全国旱灾情况[J]. 中国减灾,2007(2):9-10.
- [28] 江东,付晶莹,庄大方,等. 2008—2009 年中国北方干旱遥感动态监测[J]. 自然灾害学报,2012,21(3):94-103. DOI:CNKI:SUN:ZRZH.0.2012-03-015
- [29] CAO G, ZHENG C, SCANLON B R, et al. Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the north China plain [J]. Water Resources Research, 2013, 49(1): 159-175. DOI: 10.1029/2012WR011899.

南水北调与水利科技(中英文)