

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.20180013

束美珍, 杨传国, 程雨春, 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. SHU M Z, YANG C G, CHENG Y C, et al. Temporal and spatial variation of water storage in Huang-Huai-Hai area during 2003–2014 based on GRACE satellite data[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 83–88. (in Chinese)

# 黄淮海地区 2003–2014 年 GRACE 水储量时空变化

束美珍<sup>1,2</sup>, 杨传国<sup>1,2</sup>, 李玉龙<sup>3</sup>, 程雨春<sup>1,2</sup>, 司巧灵<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 水文与水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3. 河北省环境地质勘察院, 石家庄 050021)

**摘要:** 利用 2003–2014 年 GRACE 时变重力场数据反演黄淮海地区水储量变化, 并与同期降水数据比较, 分析其年际与年内变化特征, 结果表明: 时间上, 2003–2014 年黄淮海地区水储量呈现下降趋势, 下降速率约 0.42 mm/月, 其子流域海河和淮河流域下降速率分别为 0.52 mm/月和 0.28 mm/月; 年内仅 2 月、9 月和 12 月水储量盈余, 9 月水储量最大, 为 98.6 mm, 6 月水储量达到最大盈亏量, 约 56.65 mm; 空间上, 水储量变化整体上由南往北递减, 海河流域水储量较淮河流域亏损严重, 但随季节变化水储量亏损状态由南向北得到缓解, 到冬季水储量呈现盈余; 水储量空间变化主要受降雨影响, 同时还受区域农业布局 and 作物灌溉影响。GRACE 数据可为黄淮海地区水储量变化研究带来便利, 为区域水资源的科学管理和规划提供依据。

**关键词:** GRACE; 黄淮海地区; 水储量; 时空变化; 降雨量

**中图分类号:** P333    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0083-06

## Temporal and spatial variation of water storage in Huang-Huai-Hai area during 2003–2014 based on GRACE satellite data

SHU Meizhen<sup>1,2</sup>, YANG Chuanguo<sup>1,2</sup>, LI Yulong<sup>3</sup>, CHENG Yuchun<sup>1,2</sup>, SI Qiaoling<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydror Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing

210098, China; 3. Hebei Institute of Environmental Geology Exploration, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** We obtained the variation of water storage in Huang-Huai-Hai area from 2003 to 2014 by using the monthly gravity field data from GRACE satellite data. Then we compared it with the precipitation data in the same period to analyze its interannual and annual temporal and spatial variation characteristics. The results indicated that: temporally, the water storage in the Huang-Huai-Hai area decreased by 0.42 mm/month in 2003–2014, and that in Haihe and Huaihe river sub-basins decreased by 0.52 mm/month and 0.28 mm/month respectively. Within a year, the water storage was in surplus only in February, September and December, reaching the maximum in September to 98.6 mm; the maximum water deficit occurred in June at 56.65 mm. Spatially, the water storage decreased from south to north. The water deficit in Haihe river basin was more serious than that in Huaihe river basin. But as the season changes, the water deficit was relieved from south to north, and switched to surplus in winter. The spatial variation of water storage was mainly affected by precipitation, and also affected by regional agricultural layout and crop irrigation. GRACE data can facilitate the study of water storage variation in the Huang-Huai-Hai area and can pro-

收稿日期: 2017-03-22    修回日期: 2017-06-04    网络出版时间: 2018-01-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180122.0855.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”专项(2016YFC0402706); 国家自然科学基金项目(41471016); 公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201406021)

**Funds:** National Key Research and Development Plan “High Efficiency Development and Utilization of Water Resource” (2016YFC0402706); National Natural Science Foundation of China(41471016); Special Scientific Research Fund of Public Welfare Industry(Meteorological) of China(GYHY201406021)

作者简介: 束美珍(1991-), 女, 安徽桐城人, 主要从事水文水资源及水文预报研究。E-mail: meizhenshu@hhu.edu.cn

通讯作者: 杨传国(1981-), 男, 山东青州人, 副教授, 博士, 主要从事环境变化与水文水资源研究。E-mail: cgyang@hhu.edu.cn

vide basis for the scientific management and planning of regional water resources.

**Key words:** GRACE; Huang Huai Hai area; water storage; temporal and spatial variation; precipitation

陆地水储量变化是全球水循环的重要组成部分,它反映着降雨、蒸发、径流、土壤水和地下水的交换等各部分变化的总和<sup>[1-3]</sup>。对陆地水储量开展研究可以有助于研究洪涝、干旱及地下水资源变化等情形<sup>[4-5]</sup>。

由美德两国合作研制并于2002年3月成功发射的重力卫星GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment)为高精度重力场观测和气候试验提供了有效手段<sup>[6-7]</sup>。目前,重力卫星已经持续观测十多年,重力卫星技术已逐渐在水文领域得到应用<sup>[8-11]</sup>。近来,GRACE数据被用于陆地水储量变化研究,这解决了由于缺乏实测资料 and 传统测量方法成本昂贵等造成的区域水储量变化信息难以获得的难题,为陆地水储量时空变化研究带来了机遇<sup>[2,4,12-13]</sup>。

黄淮海地区是我国水资源严重短缺的地区之一,又由于地表水和地下水长期超采,地下水漏斗面积不断扩大,水资源矛盾突出<sup>[14-16]</sup>。近年来许多学者利用GRACE数据对该地区的水储量进行了研究。任永强<sup>[17]</sup>等利用GRACE重力卫星数据反演推算了海河流域2005至2009年间地下水储量的时序变化,并与该流域170眼监测井的数据进行对比分析;苏晓莉<sup>[18]</sup>等利用GRACE重力卫星2002年8月至2010年8月的重力卫星数据分析华北地区陆地水量变化,并利用CPC水文模型、全球陆地资料同化系统(GLDAS)的数据,分别估计了该地区地表水的变化,从而得到该地区地下水的变化趋势;王超<sup>[19]</sup>等利用2003年1月至2011年12月的重力卫星数据研究中国六大流域,包括黄河、淮河和海河流域等陆地水总量时空变化特征,分析了六大江河流域水资源总量变化趋势,并与全球陆面数据同化系统(GLDAS)模拟结果进行对比;易爽<sup>[16]</sup>等利用2003-2014年GRACE数据分析了海河流域等的水储量总量变化趋势,并分析了水储量变化与降水间的相关关系。因此本文采用德克萨斯大学空间研究中心(CSR)、喷气推进实验室(JPL)、德国地学中心(GFZ)等三家机构公布的2003-2014年共133个月的GRACE RLO5版本数据,对黄淮海地区水储量年际及年内时空变化开展研究,不仅具有重要的科学意义,对区域水资源规划和管理也有重要的应用价值。

## 1 研究区概况

选取黄淮海地区作为研究区域,该区域包括淮河流域、海河流域以及黄河花园口以下流域,地理位置介于 $31^{\circ}-43^{\circ}\text{N}$ , $111^{\circ}-123^{\circ}\text{E}$ 之间。研究区总面积共计67.55万 $\text{km}^2$ ,其中淮河流域32.20万 $\text{km}^2$ ,海河流域33.09万 $\text{km}^2$ ,黄河花园口以下流域2.27万 $\text{km}^2$ 。

黄淮海地区属暖温带季风气候,四季变化明显,年均温 $14\sim 15^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为 $500\sim 900\text{mm}$ ,南部淮河流域处于向亚热带过渡地区,其气温和降水量都比北部高。受季风影响,流域降雨量在年内分布不均,且地区、季节、年际间差异大,使得该区域水储量表现出明显的季节性。因此,对研究区域水储量的估算,对区域水资源管理具有重要意义。

## 2 数据来源

### 2.1 GRACE 数据

目前,GRACE数据主要由德克萨斯大学空间研究中心(CSR(Center for Space Research)、喷气推进实验室(JPL(Jet Propulsion Laboratory)、德国地学中心(GFZ(Geophysikalisches Zentrum))等三家机构公布。本文主要采用CSR数据中心公布的RLO5版本数据,时间序列为2003年1月至2014年12月,共133个月数据。这些数据已去除了潮汐影响(包括海潮、固体潮和地球自转产生的极潮)和非潮汐(大气和海洋影响)影响<sup>[20-21]</sup>,因此在陆地上主要反映出水储量变化特征。

### 2.2 降水数据

本文选用了国家气象信息中心发布的2003年1月至2014年12月的 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 降水格点数据,以分析降水的年内变化过程和年际变化趋势。

## 3 结果与分析

### 3.1 黄淮海地区月水储量变化

利用CSR、GFZ、JPL三家机构公布的2003-2014年的GRACE数据,计算黄淮海地区逐月水储量变化值,结果如图1所示。从图中可以看出,黄淮海地区水储量变化整体呈下降趋势,但JPL较CSR、GFZ反映的下降趋势更明显,而GFZ和CSR两家数据则差异不大。因不同机构提供的数据其精

度和适用范围不同,导致数据质量有所差异。因此,文中选择 CSR 机构的数据进行分析。

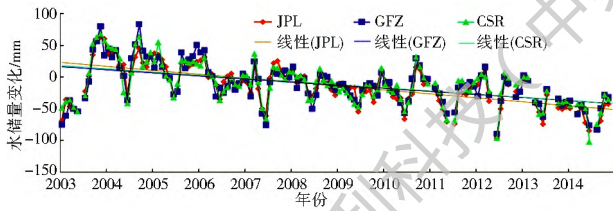


图 1 黄淮海地区月水储量变化

Fig. 1 Monthly water storage variation in Huang-Huai-Hai area

如图 2 曲线所示,利用 CSR 数据反演得到黄淮海地区 2003 年 1 月-2014 年 12 月的水储量变化,正值表示水储量增加,负值表示水储量减少。在 133 个月里,黄淮海地区水储量变化幅度在-110~70 mm 内变化,整体上看,水储量变化呈下降趋势,即黄淮海地区损耗的水资源量与进入到该地区的水资源总量之差越来越大。

对比分析 CSR 的水储量变化与同期降水资料,可以发现,水储量变化和降水具有明显的周期性。在一年周期内,1 月-3 月份水储量变化多为负值,但其量值与前期降水量及该月降水量有关,随着 5 月份之后降水的增加,水储量变化明显增大,10 月份后,水储量变化减少。尽管两者变化过程相似,但降水变化峰值多出现在 7 月,而水储量变化的峰值有所滞后,多出现在 9 月。根据任永强<sup>[17]</sup>等对黄淮海地下水储量变化研究可以分析,出现这种滞后的原因与土壤水截留、湖泊地下水调蓄有关。黄淮海地区水储量的这种月变化过程与中国大陆及相邻地区陆地水储量的变化具有一致性<sup>[22]</sup>。

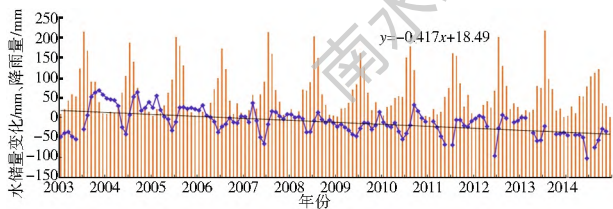


图 2 2003-2014 年黄淮海地区水储量变化及降水变化过程

Fig. 2 Monthly water storage variation and precipitation process in Huang-Huai-Hai area in 2003-2014

图 3 中,对黄淮海地区内子流域进行水储量变化分析,可见:各子流域的水储量变化均呈现下降趋势。海河流域水储量变化在-85~75 mm 内波动,尤其是自 2007 年以后,流域内水储量一直在减少,以 0.52 mm/月的速率下降。其原因可能与近年来华北平原地下水的过度开采有关。而石建省<sup>[23]</sup>、贾绍凤<sup>[24]</sup>等利用地下水位数据研究海河流域地下水超采情况,结果均可解释水储量变化这一过程。淮河流域水储量变化幅度在-104~68 mm 上下波

动,其下降速率为 0.28 mm/月。最大值为 68 mm,出现在 2003 年 11 月,最小值为-104 mm,出现在 2014 年 6 月。整体上看,海河流域水储量变化下降趋势较淮河流域严峻。对比各子流域内的同期降水数据,随着降水的增加,水储量也在增加,但其峰值滞后于同期降雨峰值,可见降水是影响流域水储量变化的因素之一。

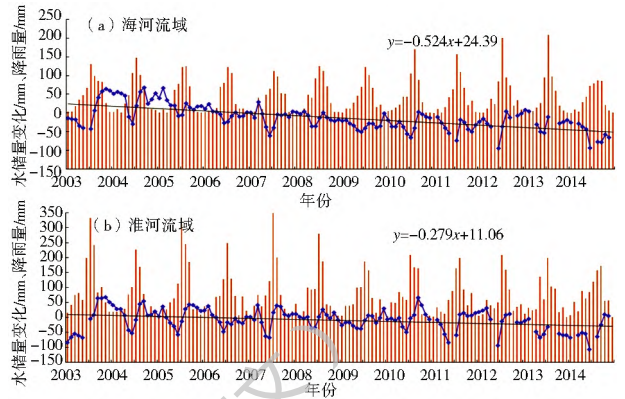


图 3 2003-2014 年海河流域及淮河流域水储量变化及降水变化过程

Fig. 3 Monthly water storage variation and precipitation process in Haihe and Huaihe river basins in 2003-2014

图 4 为 2003-2014 年月平均水储量及降水变化的年内分布图。从图中可以看出,仅 2 月、9 月、12 月黄淮海地区水储量变化为盈余状态,9 月份盈余量最大,达 9.86 mm;其他各月均处于水储量亏损状态,6 月亏损量达到最大,为 56.65 mm。而年内 1 月-4 月、10 月-12 月降水量较少,约 79% 的降水集中在 5 月-9 月。10 月-3 月期间,降水较少,且水储量变化也较小,4 月-6 月,尽管降水在增加,但水储量反而呈现亏损严重趋势;7 月份之后,水储量的亏损趋势才有所缓解,随着降水的集中出现盈余。而年内水储量的这种变化,可根据房全孝<sup>[25]</sup>等对华北平原地区农业生产研究给出解释。黄淮海地区是主要种植冬小麦夏玉米的主要区域,10 月份至次年 6 月份主要为小麦生长期,期间 3 月-5 月份为小麦需水高峰期;6 月-9 月份为玉米种植期,而玉米灌溉需水量相对较低。因此,3 月-5 月份,尽管降水在增加,但由于农业生产灌溉需求随之增加,因此水储量变化不增反减。

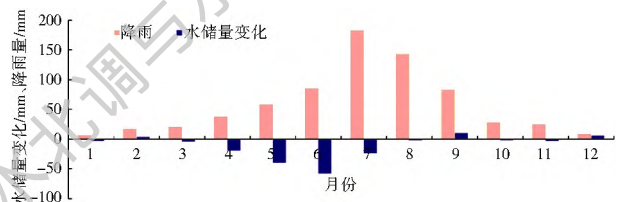


图 4 黄淮海地区水储量及降雨量年内变化

Fig. 4 Annual water storage and precipitation variations in Huang-Huai-Hai area

### 3.2 黄淮海地区水储量空间变化趋势

利用流域 GRACE 数据(2003–2014 年,选取全年数据完整的年份)计算得到黄淮海地区的年均水储量变化,从图 5 来看,水储量具有明显的空间差异性,多年平均水储量变化幅度在  $-70 \sim 72 \text{ mm}$  之间。淮河流域靠近大别山区水储量增加明显,海河流域西南部分水储量减少明显。流域同期多年降水空间分布图与水储量变化空间分布图整体都表现为北多南少,但局部存在一定的空间差异性,而流域内年均降水变化分布则与水储量变化分布差异明显。尤其在区域东北部,可见降水量的增减并不一定会导致水储量变化的波动,而这正说明降雨只是影响水储量变化的因素之一。

图 6 显示黄淮海地区四季水储量变化空间分布。春季黄淮海地区春季水储量明显处于亏损状态,且淮河流域东北部亏损最大值可达  $80 \text{ mm}$ ,海河流域北部亏损相对较小。夏季淮河流域南部靠近大别山区的水储量盈余,其余黄淮海地区的水储

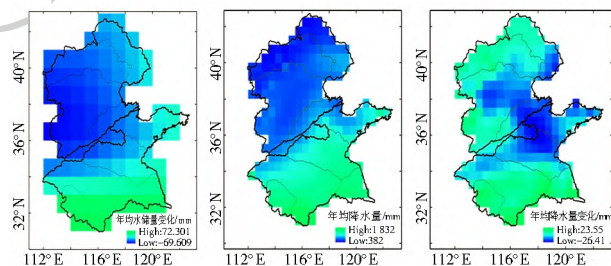


图 5 多年平均水储量变化及降雨空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of multi year average water storage variation and precipitation

量皆处于亏损状态,海河流域南部和淮河流域北部地区亏损严重,可达  $80 \text{ mm}$ 。秋季淮河流域水储量盈余,西部地区最大盈余值可达  $40 \text{ mm}$  以上;而海河流域水量依然亏损,但亏损量较夏季有所减少。此时夏季亏损最严重地区的情况得到缓解。冬季黄淮海地区水储量基本处于盈余状态,东部地区水储量明显高于西部地区。而造成海河流域季节性水储量的空间分布和该地区的农业布局密切相关。

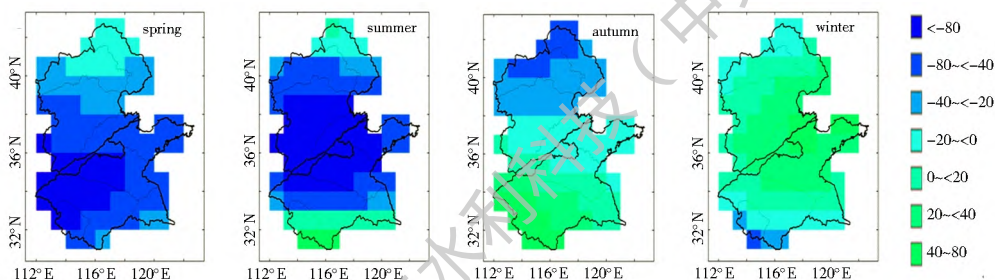


图 6 季节水储量变化空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of seasonal water storage variation

为了进一步了解黄淮海地区水储量的年内变化趋势,作出多年月水储量变化空间分布图,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,2 月、9 月和 12 月黄淮海地区水储量总体呈盈余状态,这和图 4 中时间序列是一致的。3 月–6 月,黄淮海地区水储量都是受负异常控制,7 月以后,水储量逐渐增加,10 月以后,水储量又明显减少。这种年内变化和 syea T H<sup>[26]</sup>、王超<sup>[19]</sup> 等研究结果相一致,表明陆地总水量变化主要受降雨量影响,我国降雨水汽主要来源于夏季风。

## 4 结论

利用 GRACE 重力卫星数据计算黄淮海地区 2003–2014 年的陆地水储量变化,并结合该地区的气象站点逐月降水数据,分析该区域水储量变化的空间分布规律及变化趋势,得出以下结论。

(1) 根据 GRACE 数据模拟该地区的水储量变化情况,结果表明:时间上,黄淮海地区水储量变化从 2003–2014 年水储量整体呈下降趋势,下降速率

约  $0.42 \text{ mm/月}$ ;海河流域和淮河流域均呈下降趋势,海河流域水储量下降趋势较淮河严重,下降速率分别为  $0.52 \text{ mm/月}$ 、 $0.28 \text{ mm/月}$ 。

(2) 黄淮海地区水储量年内变化差异较大,仅 2 月、9 月和 12 月水储量盈余,其余各月均处于亏损状态。9 月水储量最大盈余  $9.86 \text{ mm}$ ,6 月水储量最大亏损  $56.65 \text{ mm}$ 。

(3) 黄淮海地区年水储量变化空间分布从南到北有递减趋势,春夏两季水储量亏损明显,最大超过  $80 \text{ mm}$ ,秋冬有所盈余。流域内年均降水变化空间分布与水储量变化分布存在差异,降水量的增减并不一定会导致水储量变化的波动,相对而言,降雨量增加的地区,水储量一般呈盈余状态,但由于受地域气候差异、农业布局及人类活动等的影响,局部地区水储量会呈亏损状态。因此水储量变化主要受降水影响,但仍存在其他因素。

本文通过 GRACE 数据,可以比较真实地反映黄淮海地区的水资源变化情况,但这仅是对水储量

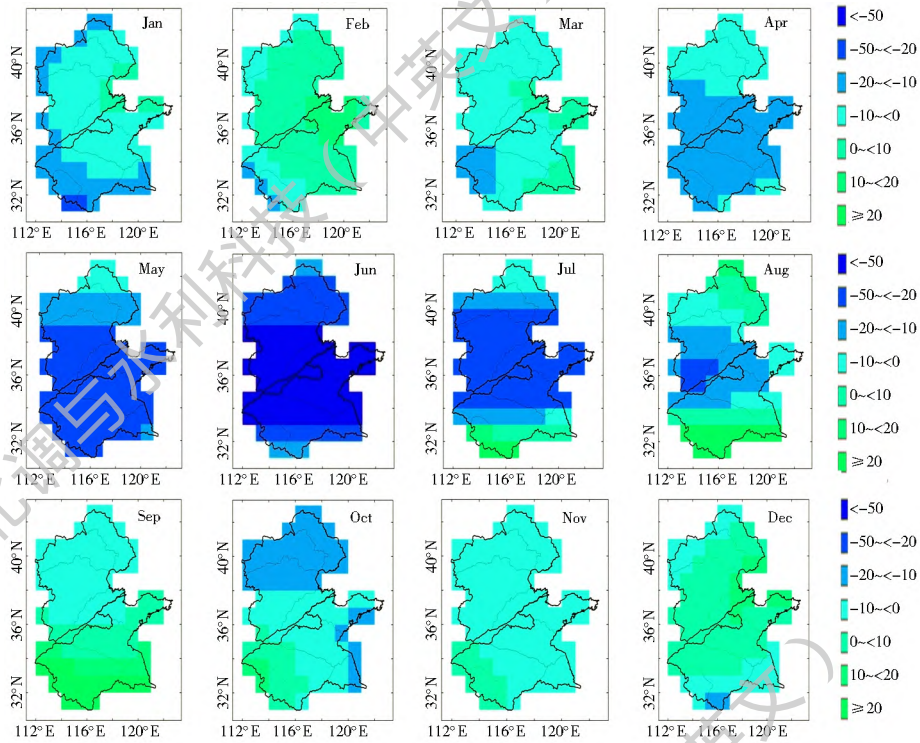


图 7 年内水储量变化空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of annual water storage variation

总量变化作出分析, 由于资料有限, 无法对组成水储量的各分量(地表水、地下水、土壤水等)进一步分析, 尤其是黄淮海地区地下水问题突出。需要进一步收集研究区地下水观测资料, 且有必要考虑将水文模型分析与 GRACE 数据分析进行对比。同时 GRACE 数据本身存在精度问题, 因此如何验证 GRACE 数据的准确性, 提高结果的精确性, 更能反映流域水资源变化的真实情况, 仍需要各位研究者不断完善。

参考文献(References):

[1] CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D, et al. 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models [J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2009, 114 (B5). DOI: 10.1029/2008JB006056.

[2] 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. (in Chinese) DOI: 10.3724/SP.J.1033.2013.00068.

[3] 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. (N I S N, CHEN J L, LI J, et al. Terrestrial water storage change in the Yangtze and Yellow river basins from GRACE time variable gravity measurements [J]. *Journal of*

*Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(4): 49-55. (in Chinese))

[4] 冯伟, Lemoine J M, 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. (FENG W, LEMOINE J M, ZHONG M, et al. Terrestrial water storage changes in the Amazon basin measured by GRACE during 2002-2010 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 814-821. (in Chinese)) DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.011.

[5] 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. (WANG W, WANG P, CUI W. A comparison of terrestrial water storage data and multiple hydrological data in the Yangtze river basin [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(6): 759-768. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.06.001.

[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)*, 2006, 36(3): 225-232. (HU X G, CHEN J L, ZHOU Y H, et al. Monitoring the seasonal water storage changes in Yangtze River basin with GRACE spatial gravimetric measurements [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 36(3): 225-232. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1006-9267.2006.03.003.

[7] 许朋琨, 张万昌. GRACE 反演近年青藏高原及雅鲁藏布江流域陆地水储量变化[J]. *水资源与水工程学报*, 2013(1): 23-29. (XU P K, ZHANG W C. Inversion of terrestrial water storage changes in recent years for Qinghai-Tibetan plateau and Yarlung Zangbo River basin by GRACE [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013(1): 23-29. (in Chinese))

[8] SCHMIDT R, SCHWINTZE R P, FLECHTNER F, et al. GRACE observations of changes in continental water storage [J]. *Global*

- and Planetary Change, 2006, 50(1): 112-126. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2004.11.018.
- [9] CHEN J L, WILSON C R, FAMIGLIETTI J S, et al. Attenuation effect on seasonal basin scale water storage changes from GRACE time variable gravity[J]. Journal of Geodesy, 2007, 81: 237-245. DOI: 10.1007/s00190-006-0104-2.
- [10] 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(12): 2987-2992. (YANG Y D, E D C, CHAO D B, et al. Seasonal and inter-annual change in land water storage from GRACE[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009(12): 2987-2992. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.12.007.
- [11] 范云峰. GRACE 重力卫星在陆地水储量变化监测中的应用[J]. 全球定位系统, 2013, 38(5): 83-86. (FAN Y F. Application of GRACE satellite gravity changes in land water storage monitoring[J]. GNSS World of China, 2013, 38(5): 83-86. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-9268.2013.05.018.
- [12] 曹艳萍, 南卓铜, 胡兴林. 利用 GRACE 重力卫星数据反演黑河流域地下水变化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 680-689. (CAO Y P, NAN Z T, HU X L. Changes of groundwater storage in the Heihe River basin derived from GRACE gravity satellite data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 680-689. (in Chinese))
- [13] 王杰, 黄英, 曹艳萍, 等. 利用 GRACE 重力卫星观测研究近7年云南省水储量变化[J]. 节水灌溉, 2012(5): 1-5. (WANG J, HUANG Y, CAO Y P, et al. Spatial and temporal variation of water storage in recent seven years from GRACE in Yunnan Province[J]. Water Saving Irrigation, 2012(5): 1-5. (in Chinese))
- [14] 胡春胜, 张喜英, 程一松, 等. 太行山前平原地下水动态及超采原因分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2002, 18(2): 89-91. (HU C S, ZHANG X Y, CHENG Y S, et al. An analysis on dynamics of water table and overdraft of groundwater in the piedmont of Mt. Taihang[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2002, 18(2): 89-91. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-0068.2002.02.003.
- [15] YANG Y H, TIAN F. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China[J]. Journal of Hydrology, 2009, 3(4): 373-383. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.040.
- [16] YI S, SUN W, FENG W, et al. Anthropogenic and climate driven water depletion in Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(17): 9061-9069. DOI: 10.1002/2016GL069985.
- [17] 任永强, 潘云, 宫辉力. 海河流域地下水储量时变趋势分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2013, (4): 88-94. (REN Y Q, PAN Y, GONG H L. Haihe basin groundwater reserves time varying trends analysis[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2013, (4): 88-94. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9398.2013.04.020.
- [18] 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. (SU X L, PING J S, YE Q X. Terrestrial water variations in the North China Plain revealed by the GRACE mission[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(6): 917-922. (in Chinese))
- [19] 王超, 杨涛. 重力卫星监测的中国陆地水资源储量时空变化特征[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 20-23. (WANG C, YANG T. Spatial temporal characteristics of terrestrial water storage variations in China based on GRACE satellite data[J]. Water Resources and Power, 2013, 7(31): 20-23. (in Chinese))
- [20] ZHONG M, DUAN J B, XU H Z, et al. Trend of China land water storage redistribution at medium and large spatial scales in recent five years by satellite gravity observations[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(5): 816-821. DOI: 10.1007/s11434-008-0556-2.
- [21] BETTADPUR S. Level 2 gravity field product user handbook [M]. Austin: Center for Space Research, 2007: 18-21.
- [22] 吴利平, 詹军, 田军锋. 基于 GRACE 卫星重力测量资料监测中国大陆及邻区陆地水储量变化[J]. 科技咨询, 2009(19): 6-8. (WU L P, ZHAN J, TIAN J F. Monitoring the land water storage change in Chinese mainland and its adjacent areas based on GRACE satellite gravity measurement data[J]. Science and Technology Information, 2009(19): 6-8. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2009.19.004.
- [23] 石建省, 李国敏, 梁杏, 等. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 527-534. (SHI J S, LI G M, LIANG X, et al. Evolution mechanism and control of groundwater in the north China plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(5): 527-534. (in Chinese)) DOI: 10.3975/cagsb.2014.05.01.
- [24] 贾绍凤, 李媛媛, 吕爱锋, 等. 海河流域平原区浅层地下水超采量估算[J]. 南水北调与水利科技, 2016(4): F7, 71. (JIA S F, LI Y Y, LYU A F, et al. Estimation of excess pumping of shallow groundwater aquifer in Haihe plain[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016(4): F7, 71. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsrtdqk.2016.04.001.
- [25] 房全孝, 王建林, 于舜章. 华北平原小麦-玉米两熟制节水潜力与灌溉对策[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 37-44. (FANG Q X, WANG J L, YU S Z. Water saving potential and irrigation strategies for wheat maize double cropping system in the North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 37-44. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.07.007.
- [26] 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(W024332). DOI: 10.1029/2006WR005779.