

引用格式:Feng Guiping, Song Qingtao, Jiang Xinwei. Global Groundwater Storage Changes and Characteristics Observed by Satellite Gravimetry[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(4): 822-828. [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.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2019.4.0822

卫星重力监测全球地下水储量变化及其特征

冯贵平^{1,2,3,4}, 宋清涛^{2,3}, 蒋兴伟^{2,3}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;

3. 国家海洋局空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081;

4. 清华大学地球系统科学中心, 北京 100084)

摘要:地下水储量是水资源管理和陆地表面过程与水循环研究的一个重要参数。然而, 由于传统观测技术成本高和空间分辨率低等局限性, 很难建立一个全球连续的综合地下水监测网, 因此监测全球高时空分辨率的地下水储量及其变化仍是当前的一个挑战。2002年发射的低低卫—卫跟踪“重力恢复与气候试验”(GRACE)重力卫星为高分辨率地监测全球地下水储量及其变化, 提供了一种新的可能手段。利用2002年8月~2011年2月的GRACE观测数据估计近10a的月间隔全球陆地水总储存量, 扣除了GLDAS水文模型(全球陆地数据同化系统)中的地表水、冰雪和生物水, 得到全球地下水储量时间序列, 并分析其季节性和长期变化及其特征。研究结果表明: GRACE探测到全球地下水储量具有明显的季节性变化, 例如在南美洲的亚马逊河流域和亚洲中南部的周年振幅达到50 mm, 而在澳大利亚南部和非洲北部的周年振幅只有10 mm左右。另外全球地下水储量具有明显的长期变化, 如南美洲亚马逊河流域由于洪水造成地下水储量以6 mm/a的速率增加, 拉普拉塔地区由于干旱造成地下水储量以7.5 mm/a的速率减少; 中国新疆吐鲁番盆地地区的地下水储量以3.1 mm/a的速率减少, 中国华北地区的地下水储量以4.8 mm/a的速率下降。

关键词:地下水储量; 水循环; GRACE; GLDAS

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2019)04-0822-07

1 引言

地下水是地表以下岩(土)层空隙中的各种不同形式水的统称, 在全球水资源管理和水循环与全球气候变化研究以及理解地下水、地表水、大气水之间的相互交换等方面扮演重要的角色。此外, 地下水资源是人类生产与生活不可替代的重要资源, 与人类生活、农业灌溉、工矿企业以及城市生活用水联系密切。近年来, 随着我国经济的飞速发展, 地下水超采和过采现象变得日益严重, 尤其是地下水过采造成地下水降落漏斗、地面沉降、岩溶塌陷

等现象, 对城市基础设施构成严重威胁。然而由于地下水系统往往自地表到地下几百上千米深处, 形成空间立体分布, 传统的地面穿透雷达和无线电传感器等监测手段很难获得全球高分辨率的地下水储量及其变化。因此, 监测全球高时空分辨率的地下水储量及其变化非常困难。

地球重力场是反映地球表层及内部物质密度分布和运动状态的基本物理场, 其变化反映地球系统流体质量迁移与重新分布, 包括大气、海洋与陆地水等。扣除大气、海洋、地表水和冰川质量后, 剩

收稿日期: 2018-06-01; 修订日期: 2019-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41276019、41506211), 上海海洋大学科技发展基金(A2-0203-00-10022)。

作者简介: 冯贵平(1988-), 男, 湖北宜昌人, 讲师, 主要从事卫星海洋遥感研究。E-mail: gpfeng@shou.edu.cn。

通讯作者: 宋清涛(1971-), 男, 辽宁丹东人, 研究员, 主要从事海洋遥感与边界层物理研究。E-mail: qsong@mail.nsoas.org.cn。

余的主要是反映陆地地下水总储量。因此可以通过精确测定地球时变重力场得到全球地下水总储量及其变化。随着卫星重力探测技术的发展,为确定高精度和高时空分辨率的地球重力场提供了新的观测手段,使得利用地球时变重力场监测全球地下水总储量及其变化成为可能。美德合作的GRACE重力卫星于2002年3月发射,成功地以前所未有的精度获得了全球时变重力场信息^[1-2]。不少国内外学者利用GRACE的观测数据获得了陆地水总储量变化及其极端气候事件异常响应,包括印度地区水储量减少^[3],格陵兰冰盖以 260 ± 43 Gt/a的速度消融^[4]以及南极冰川以 213 ± 36 Gt/a的速度减少,导致全球海平面以每年 0.59 ± 0.10 mm的速度上升^[5]等。利用GRACE卫星数据研究地下水储量变化,国内外也有了不少的成果。例如Rodell等^[3]利用7 a的GRACE观测数据探测了印度北部由于过度开采导致的水储量的急剧下降。Yeh等^[6]利用GRACE重力卫星数据反演了Illinois地区的地下水,并利用基于实测水文数据合成的地下水储量变化进行比较验证,研究表明二者相关系数达到0.83。Strassberg等^[7]利用GRACE观测资料研究了美国中部大平原的地下水储量变化。罗志才等^[8]利用GLDAS与GRACE相结合反演了黑河流域10年间的地下水储量变化。谢小伟等^[9]利用GRACE反演陕甘晋高原地下水储量变化。李婉秋等^[10]研究了关中地区地下水储量变化。在我国华北地区,国内学者也逐步开展了利用GRACE监测

陆地水和地下水变化方面的研究工作。苏晓莉等^[11]利用2002~2010年的GRACE数据发现了华北的陆地水储量存在明显的减少趋势。冯伟等^[12]的研究也表明,2002~2014年间华北平原地下水存在明显的长期亏损。束秋妍等^[13]利用EOF方法分析了华北平原2003年1月~2015年8月地下水储量的时空变化。本文主要利用2002年8月~2011年2月GRACE资料得到的陆地水总储量,扣除水文模型GLDAS中的地表水、冰雪、冰川和生物水,得到近10 a全球每个月间隔的地下水储量变化时间序列,并分析全球地下水储量的周年和半年变化及其长期变化特征,重点分析了我国地下水储量的变化。

2 数据与方法

2.1 卫星重力数据

GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 重力卫星由两颗高度为480~300 km,相距为 200 ± 50 km的并行飞行双星构成。GRACE卫星利用K波段测距仪和星载GPS接收机来精确确定卫星位置和星间距离,以微米级的精度实时测得其距离变化率,利用距离变化率的一阶微分便可求得重力加速度进而反演重力场信息,最终提供高精度和高时空分辨率的地球时变重力场。地球表面及其内部物质质量的重新分布,会导致地球重力场的变化。考虑到地球表面物质质量的变化与地球重力场变化的关系,地球表面密度变化 $\Delta\sigma(\theta, \phi)$ 可表示为^[2]:

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

其中: l, m 分别为地球重力场的阶数和次数; a 为地球平均赤道半径; θ 是地球余纬度($0^\circ \sim 180^\circ$), ϕ 是经度; $\Delta C_{lm}, \Delta S_{lm}$ 是无量纲的地球重力位系数的变化量; \tilde{P}_{lm} 是归一正则化的缔合勒让德系数; ρ_{ave} 是地球

的平均密度($\rho_{ave} = 5517 \text{ kg/m}^3$); k_l 为 l 阶负荷勒夫数^[7]。注意到 $\Delta\sigma$ 除以水的密度 ρ_w ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$),可以将地球表面密度变化转化为等效水的高度变化 $\Delta\eta_{land}(\theta, \phi, t)$,即:

$$\Delta\eta_{land}(\theta, \phi, t) = \frac{a\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) \times \frac{2l+1}{1+k_l} (\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)) \quad (2)$$

目前GRACE数据处理中心主要包括德克萨斯大学空间研究中心CSR(The Center for Space Research),美国喷气动力实验室JPL(Jet Propulsion Laboratory)和德国地学研究中心GFZ(GeoForschungszentrum)。采用CSR最新RL04版本的GSM数据,GSM重力场数据均已扣除了相应的非潮汐大气和海洋信号以及各种潮汐、包括海潮、固体潮和固体极潮的影响^[2],除了系统误差和模型造成的误差外,其陆地区域主要反映陆地水储量变化信息。

利用GRACE重力场数据计算了从2002年8月~2011年2月,共101个月的月时间间隔全球陆地水储量的变化(其中2003年6月及2011年1月没有数据),采用滤波半径为500 km的高斯滤波和相关系数平滑处理^[14]。另外,冰期后回弹(Glacial Isostatic Adjustment, GIA)也会引起重力场的长期变化,利用文献[15]中的GIA模型,扣除GIA对陆地水储量变化的影响^[15]。

2.2 陆地水文模型

选取由美国国家宇航局戈达德空间飞行中心(NASA/GSFC)和美国海洋和大气局国家环境预报中心(NOAA/NCEP)联合发布的全球陆地数据同化系统GLDAS(Global Land Data Assimilation System)。GLDAS水文模型是融合了卫星和地面观测数据的全球高时空分辨率的陆面模拟系统,能提供最优化近实时的地表状态变量^[16]。GLDAS陆面数据同化系统共调用了CLM, NOAH, Mosaic 3个陆面过程模式以及VIC水文模型。该模式利用陆地表面建模和数据同化技术,其发布的数据主要包括输入与输出陆地表面的各项参数(土壤湿度、土壤温度、蒸发量、降雨、径流和雪量等)。本文使用GLDAS中与Noah模式结合的数据集,该数据集包括降水、气温和土壤湿度等变量,相比其他数据集,具有驱动场稳定、模式先进、时间序列长等优势。数据

$$GW(t) = A_a \sin(\omega_a t - \phi_a) + A_{sa} \sin(\omega_{sa} t - \phi_{sa}) + B + C(t - t_0) + \varepsilon(t) \quad (3)$$

其中: A_a 、 A_{sa} 分别为周年和半周年振幅, ω_a 、 ω_{sa} 分别为周年和半周年相位, ϕ_a 、 ϕ_{sa} 分别为周年和半周年频率,则 $\phi_a = 2\pi$, $\phi_{sa} = 4\pi$, C 为长期趋势项, B 为常数项, $\varepsilon(t)$ 是残差序列。本文主要研究地下水储量的季节性变化和长期变化趋势。

3.1 地下水储量季节性变化

将近10 a全球地下水储量变化的时间序列进行最小二乘拟合,分别估计全球地下水储量周年和半周年变化及其长期趋势。图1分别给出了全球地下水储量的周年振幅和相位以及半周年振幅和相位,其中图1(a)表示地下水储量的周年振幅,图1(b)表示地下水储量的周年相位,图1(c)表示地下水储量的半周年振幅,图1(d)表示地下水储量的半周年相位。从图1(a)明显看出,在南美洲的亚马逊河流域,非洲大陆的尼日尔湖,乍得和赞比西河流域,亚洲东南部的印度恒河和长江流域地区,地下水储量的周年振幅直达50 mm,这些地区地下水储量有着明显的周年变化;在亚洲中北部以及北美地区,地下水储量的周年振幅在20 mm左右;而在澳大利亚南部及非洲北部,由于气候干旱等原因,地下水储量的周年振幅差约10 mm,其地下水储量周年变化不是很明显,对于地下水储量的半周年振幅(图1(c)),全球大多数地区的半周年振幅都小于10 mm,只有在亚洲东南部,南美亚马逊河流域地区的振幅达到了30 mm,而在非洲大陆的尼日尔湖,乍得和赞比西河流域,半周年振幅达到了20 mm,

的时间分辨率为30 d,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,其陆地水模型考虑了土壤水、植物水、降水、蒸发和径流等水循环作用而储存在大陆或岛屿的地表水。鉴于GLDAS没有南极数据,因此本文不讨论南极地区。

3 讨论与分析

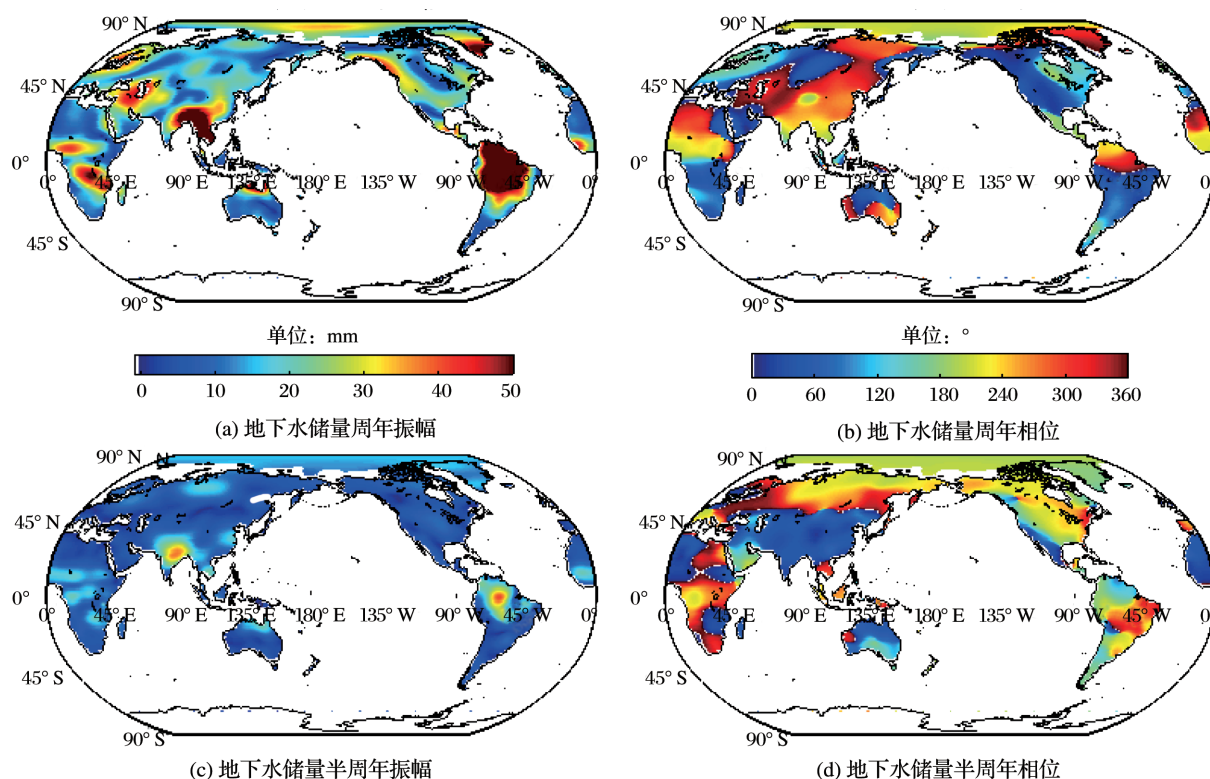
GRACE提供的时变重力场数据,可以反演得到全球陆地水总储存量的变化,其陆地水总储存量包括地下水、雪地、冰川、地表水和生物水。陆地水文模型GLDAS包括土壤水、冰雪和生物水。因此利用GRACE得到的陆地水储存总量减去GLDAS模型中的陆地水储量,就可得到全球地下水储量的变化^[17]。利用上述方法,得到了2002年8月~2011年2月间的全球地下水储量变化,然后通过最小二乘拟合公式(3),计算出每个格网点的长期变化项,周年变化项和半周年变化项。

全球大多数地区的半周年振幅都小于10 mm;对于全球地下水储量的相位图(图1(b)和1(d)),可以发现在全球大部分地区,地下水储量在每年9~10月份达到最大值,而在每年3~4月份达到最小值,这可能和降水量有着较大的关系。

3.2 地下水储量长期变化

进一步分析全球近10 a地下水储量长期变化。图2为全球不同区域地下水储量长期变化趋势分布。亚洲印度西北地区,地下水储量以惊人的24 mm/a的速度减少,主要由于人类农业灌溉过度开采地下水导致水资源损耗;中国华北地区陆地水储量以4.8 mm/a的速率下降,主要由于该地区植被稀少,蒸发较大以及地下水严重超采所造成的;南美洲亚马逊河流域由于洪水的因素,造成地下水储量以6 mm/a的速率增加;南美洲南部拉普拉塔地区最近干旱造成地下水储量以7.5 mm/a的速率减少。对于全球其他地区地下水储量的变化,例如北美洲南部地区地下水储量增加,亚洲北部地区地下水储量增加等具体原因,则有待进一步核准和研究。

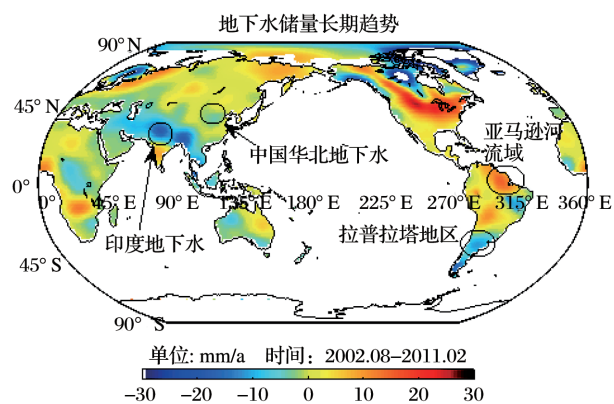
为了更清楚地显示中国区域地下水变化,图3显示了中国地区地下水储量长期变化趋势分布。由图3可以看出,在中国的华北平原、山西六大盆地、关中平原、西北内陆盆地的部分流域、东南沿海平原等地区地下水储量都呈下降趋势。并且从量级上看,主要有2个区域变化比较显著,分别为华北地区(区域A),新疆内陆吐鲁番盆地地区(区域B)。



审图号:GS(2016)1567

图1 全球地下水储量的周年和半年变化振幅与相位

Fig.1 Annual and Semi-annual variations of the amplitude and phase of global groundwater



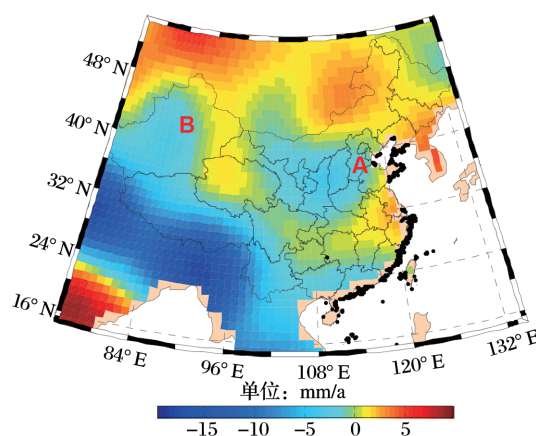
审图号:GS(2016)1567

图2 GRACE估计地下水储量的长期变化趋势

Fig.2 GRACE estimated the long-term trend of ground-water storage

图4显示了中国2个重点区域(区域A、B)地下水储量变化的时间序列。由图4可以看出,在每年的3~9月,地下水储量呈增加趋势,并且在9~10月份达到最大值,这是由于降水量的增加,造成地表径流对地下水的补充,10月份之后开始回落,在10月至来年的3月份,地下水储量呈现减少趋势,并且在3~4月达到最小值。

图4显示中国两个典型区域的地下水储量变



审图号:GS(2016)1600

图3 中国地下水储量的长期变化趋势

Fig.3 The long-term trend of groundwater storage in China

化,其中图4(a)显示华北地区,忽略2003年前GRACE精度较差的几个月份,运用最小二乘拟合得出其线性趋势约为-4.8 mm/a。并且在最近5a的时间里,其减小速率有着增大的趋势。目前,华北平原上已有200万口深水机井,官方通报显示,华北地下水超采达1200亿 m^3 。华北透支的地下水估计已近2000亿 m^3 ,由于该地区植被稀少,每年有着很大的蒸发量,而且不合理的开发利用,造成很大

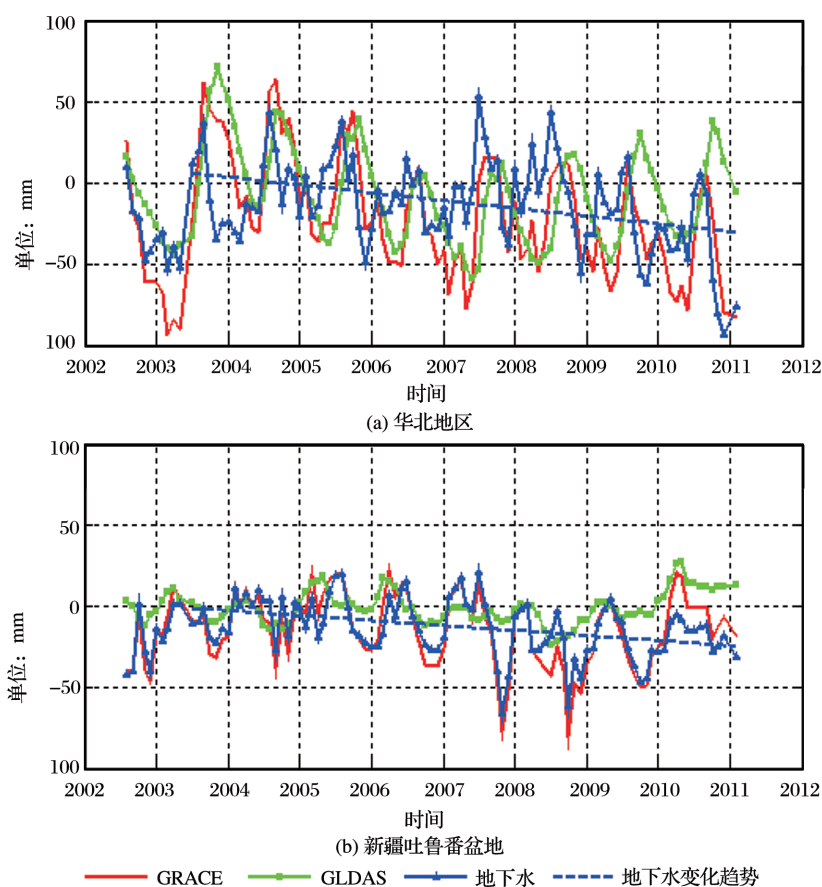


图4 中国区域地下水量随时间的月变化值

Fig.4 Groundwater variations with time of the month in North China Plain and Turpan Basin in Xinjiang

的浪费,使得超采的地下水几乎全部流失,成为中国地下水储量减少最严重的地区,这种区域性大范围的地下水位下降不仅会造成水量的减少,而且还会影响地下水资源的均衡。图4(b)显示的是中国新疆吐鲁番盆地地区,该地区的地下水储量以 3.1mm/a 的趋势减少,主要是由于在新疆集中灌溉的盆地地区,年降雨量较少,水资源不是很丰富,地下水补给困难,并且没被考虑采补平衡,无计划地连续过度开采地下水,造成了新疆大部分区域的地下水位持续下降。

4 结语

本文主要利用GRACE重力卫星时变观测数据和GLDAS模型数据研究了近10 a来全球地下水储量的长期变化、周年变化和半周年变化,并重点研究了中国区域的地下水储量及其变化特征。结果显示,利用GRACE观测数据确定的时变重力场结合GLDAS模型得到的全球地下水储量,发现全球地下水具有变化明显的季节性变化和长期趋势。其中在南美洲的亚马逊河流域,亚洲东南部的周年

振幅达到 50mm ,而在澳大利亚南部,非洲北部的周年振幅只有 10mm 左右。全球大部分地区,地下水储量在每年9~10月达到最大值,而在每年3~4月达到最小值。另外,中国华北平原、山西六大盆地、关中平原、西北内陆盆地的部分流域、东南沿海平原等地区地下水储量都呈下降趋势,尤其是新疆吐鲁番盆地地区的地下水储量以 3.1mm/a 的速率减少;中国华北地区的地下水储量以 4.8mm/a 的速率下降。以上结果充分体现了卫星重力探测技术在监测地下水变化方面的能力。另外,GRACE-FO(GRACE Follow-On)卫星也于2018年5月22日成功发射,该卫星将继续对全球重力场进行连续监测,将会在地下水储量、河流湖泊、土壤湿度以及冰川冰盖质量变化等方面得到更加深入的应用,预示着卫星重力探测技术有着广泛的应用前景。

然而,由于GRACE重力卫星轨道高度、轨道倾角、硬件噪音以及数据处理方法等的局限性,精确估计地下水储量及其变化有待进一步提高,如滤波方法的影响。另外,陆地水文模型、冰期后回弹和潮汐等模型有待进一步精化和提高。随着下一代

重力卫星计划的发射,仪器测量精度的提高,轨道高度和轨道倾角的优化选取,观测时间的延长,数据处理方法的完善以及地球物理模型的改进,将会得到更高精度的重力场信息,进而反演得到更高时空分辨率的全球地下水储量信息,对监测全球地下水储量变化具有非常重要的意义。

致谢:感谢美国宇航局(NASA)提供GRACE重力观测数据!

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Swenson S, Wahr J. Methods for Inferring Regional Surface-mass Anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Measurements of Time-variable Gravity[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2002, 107 (B9):2193.
- [3] Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S, Satellite-based Estimates of Groundwater Depletion in India [J]. *Nature*, 2009, 460 (7258) :999-1002.
- [4] Feng Guiping, Wang Qimao, Song Qingtao. Greenland Ice Sheet Mass Variations based on GRACE Satellite Gravitydata [J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(11):73-84.[冯贵平,王其茂,宋清涛.基于GRACE卫星重力数据估计格陵兰岛冰盖质量变化[J].*海洋学报*, 2018, 40(11):73-84.]
- [5] Feng Guiping, Song Qingtao, Jiang Xingwei, *et al.* Land Water and Glaciers Contributions to Global Sea Level Change from Satellite Gravity Measurements [J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(11):85-95.[冯贵平,宋清涛,蒋兴伟,等.卫星重力估计陆地水和冰川对全球海平面变化的贡献[J].*海洋学报*, 2018, 40(11):85-95.]
- [6] Yeh J F, Swenson S C, Famiglietti J S, *et al.* Remote Sensing of Groundwater Storage Changes in Illinois Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(12):395-397.
- [7] Strassberg G, Scanlon B R, Chambers D. Evaluation of Groundwater Storage Monitoring with the GRACE Satellite: Case Study of the High Plains Aquifer, Central United States [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(5):195-211.
- [8] Luo Zhicai, Li Qiong, Zhong Bo. Water Storage Variations in the Heihe River basin Recovered from GRACE Temporal Gravity Field [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5):676-681.[罗志才,李琼,钟波.利用GRACE时变重力场反演黑河流域水储量变化[J].*测绘学报*, 2012, 41(5):676-681.]
- [9] Xie Xiaowei, Xu Caijun, Gong Zheng, *et al.* Groundwater Storage Changes in Shan-Gan-Jin Plateau Derived from GRACE [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018 (1) : 133-137.[谢小伟,许才军,龚正,等.利用GRACE反演陕甘晋高原地下水储量变化[J].*测绘通报*, 2018(1):133-137.]
- [10] Li Wanqiu, Wang Wei, Zhang Chuanyin, *et al.* Monitoring Groundwater Storage Variations in the Guanzhong Area Using GRACE Satellite Gravity Data [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2018, 61(6):2237-2245.[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.]
- [11] Su Xiaoli, Ping Jinsong, Ye Qixin. Terrestrial Water Variations in the North China Plain Revealed by the GRACE Mission [J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 2012, 42(6) : 917-922.[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.]
- [12] Feng Wei, Wang Changqing, Mu Dapeng, *et al.* Groundwater Storage Variations in the North China Plain from GRACE with Spatial Constraints [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2017, 60(5) : 1630-1642.[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.]
- [13] Shu Qiuyan, Pan Yun, Gong Huili, *et al.* Spatiotemporal Analysis of GRACE-based Groundwater Storage Variation in North China Plain [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2018, 30(2) : 132-137.[束秋妍,潘云,宫辉力,等.基于GRACE的华北平原地下水储量时空变化分析[J].*国土资源遥感*, 2018, 30(2): 132-137.]
- [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 Solid Earth*, 1998, 103 (B12) : 30205-30229.
- [15] Geruo A, Wahr J, Zhong S. Computations of the Viscoelastic Response of a 3-D Compressible Earth to Surface Loading: An Application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada [J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 192 (2):557-572.
- [16] Rodell M, Houser P R, Jambor U, *et al.* The Global Land Data Assimilation System [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3) : 381-394.
- [17] Jin S, Feng G. Large-scale Variations of Global Groundwater from Satellite Gravimetry and Hydrological Models, 2002~2012 [J]. *Global & Planetary Change*, 2013, 106(3):20-30.

Global Groundwater Storage Changes and Characteristics Observed by Satellite Gravimetry

Feng Guiping^{1,2,3,4}, Song Qingtao^{2,3}, Jiang Xinwei^{2,3}

(1. *Shanghai Ocean University College of Marine Sciences, Shanghai 201306 China;*

2. *National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China;*

3. *Key Laboratory of Ocean Space Remote Sensing and Application, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China;*

4. *Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

Abstract: Groundwater storage is an important parameter in water resource manages and research of land-surface processes and hydrological cycle. However, the traditional instruments are very difficult to monitor global high temporal-spatial groundwater water storage and its variability without a comprehensive global monitoring network of hydrological parameters due to high cost and high labor intensity. The recent Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) mission provides a unique opportunity to directly measure the global groundwater storage and its change at multi-scales from August 2002 to February 2011. In this paper, the global terrestrial water storages with monthly resolution are derived from approximate 10 years of monthly GRACE measurements (2002 August–2011 February), and the groundwater is obtained with subtracting the surface water, snow, ice and canopy water, from total terrestrial water storages using the GLDAS (Global Land Data Assimilation System) model. Results have shown that significant annual variations of groundwater storages are found at the globe with amplitude of up to 50 mm. in Southeast Asia, northern Amazon, while in South Australia and North Africa the annual amplitude is about 10 mm. The secular trends of groundwater storage are also observed at specific areas. For example, in northern Amazon, the groundwater storage is increasing at about 6mm/a due to recent floods, in La Plata, the groundwater storage is declining at about 7.5 mm/a because of drought, in Turpan Basin, the groundwater storage is declining at about 3.1 mm/a, and in North China Plain, the groundwater storage is declining at about 4.8 mm/a.

Key words: Groundwater storage; Water Cycle; GRACE; GLDAS