

利用 GRACE 反演长江流域水储量变化

翟 宁^{1,2,3} 王泽民^{1,2} 伍 岳⁴ 叶聪云⁵

(1 武汉大学中国南极测绘研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 极地测绘科学国家测绘局重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(3 珠海市海洋与渔业环境监测中心, 珠海市梅华东路 465 号, 519000)

(4 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌市大学路 8 号, 443002)

(5 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要:利用 GRACE 重力卫星 2003 年 1 月~2006 年 9 月共计 43 个月的时变重力场数据,反演了长江流域水储量的变化。结果显示,基于 GRACE 数据的反演结果和 CPC 模型符合得相当好;若考虑低阶项的影响,对 GRACE 的反演结果有很明显的改进。

关键词:GRACE;重力场;长江流域

中图法分类号:P228.42

长江流域是我国重要的经济政治区域,人口约占全国的 1/3,粮食产量约占全国的 1/2。三峡大坝建成后,其发电和防洪能力,为促进我国经济发展和减少国民经济损失,都发挥了重要的作用。因此监测长江流域水储量变化具有很重要的经济意义。文献[1-5]的研究表明,利用 GRACE 数据采用适当的平滑函数可以反演大尺度的河流流域水储量的季节性变化,并且结果和水文模型符合得相当好,这为更好地监测长江流域水储量的变化提供了新方法。

1 数据处理模型

1.1 GRACE 数据反演

地球重力场可以用大地水准面来描述。大地水准面的球谐系数表达式为:

$$N(\theta, \varphi, t) = a \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l P_{lm}(\cos\theta) \cdot [C_{lm}(t) \cos(m\varphi) + S_{lm}(t) \sin(m\varphi)] \quad (1)$$

由时变重力场系数直接得到表面密度变化为^[6]:

$$\Delta\sigma(\theta, \varphi) = \frac{a\rho_{ave}\pi}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} P_{lm}(\cos\theta) \cdot$$

$$[\Delta C_{lm} \cos(m\varphi) + \Delta S_{lm} \sin(m\varphi)] \quad (2)$$

式中, ΔC_{lm} 、 ΔS_{lm} 为 GRACE 提供的球谐系数变化量,在本文中取的是月平均重力场减去所有月重力场的平均值。

考虑到 GRACE 重力场模型系数误差随阶数增大而增大,因而一般采用空间平均来减低误差。平均后的表面密度变化为^[6]:

$$\Delta\sigma(\theta, \varphi) = \frac{2a\rho_{ave}\pi}{3} \sum_{l=0}^N \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} W_l P_{lm}(\cos\theta) \cdot [\Delta C_{lm} \cos(m\varphi) + \Delta S_{lm} \sin(m\varphi)] \quad (3)$$

式中, W_l 为权函数,定义为: $W_0 = \frac{1}{2\pi}$, $W_1 =$

$$\frac{1}{2\pi} \left[\frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right], W_{l+1} = -\frac{2l+1}{b} W_l + W_{l-1},$$

其中, $b = \frac{\ln(2)}{1-\cos(r/a)}$, r 是高斯平均半径。一般情况下,将表面密度变化变成等效水高变化:

$$HWT(\theta, \varphi) = \frac{2a\rho_{ave}\pi}{3\rho_{water}} \sum_{l=0}^N \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} W_l P_{lm}(\cos\theta) \cdot [\Delta C_{lm} \cos(m\varphi) + \Delta S_{lm} \sin(m\varphi)] \quad (4)$$

式中, ρ_{water} 为水的密度。

本文采用的数据是 CSR 提供的 RL04 从 2003-01~2006-09 GRACE 所测得的共 43 个近似月平均时变重力场模型。每个重力场以 60 阶

球谐系数的形式给出,它们之间的时间间隔并不完全一致。潮汐影响和非潮汐的大气和海洋影响在 Level-2 的数据处理过程中已经扣除,因而 GRACE 时变重力场反映的是非大气、非海洋的质量变化,即主要是陆地水储量的变化,同时还有未被模型完全模拟的海洋、大气的变化。由于卫星的轨道以及两颗卫星之间的距离很短,GRACE 低阶项尤其是 C20 项不能很精确地得到,在大多数的文章中,将 C20 项剔除掉,而本文采用 Cheng 等^[7]提供的根据激光测卫得到的 C20 代替 GRACE 的 C20,提高反演精度。另外,由于 GRACE 无法提供重力场一阶项球谐系数,而 Chambers 等^[8,9]和 Chen 等^[1]的研究表明一阶项不能忽略,本文采用地球质心季节变化项计算得到一阶项代替 GRACE 的一阶项。

针对重力场低阶项,本文采用以下 4 种方案分别处理 GRACE 的重力场数据得到流域水储量变化的时间序列:① 剔除 GRACE 数据中的 C20 项;② 纯 GRACE 数据;③ 用 SLR 测得的 C20 代替 GRACE 的 C20 项;④ 在方案③的基础上,地球质心季节变化项得到的一阶项代替 GRACE 的一阶项^[5]。因为在 GRACE 重力场解算的过程中,已经扣除了非潮汐大气、海洋信号的影响,本文方案④中的一阶项同样扣除非潮汐大气、海洋信号的影响。在本文计算中,考虑到目前的精度水平,重力场系数最高阶取为 60 阶。另外,精度分析显示,2003 年以后的重力场空间分辨率可达到 400~600 km,为此,在计算长江流域水储量变化时,采用高斯平滑半径 1 000 km,利用式(4)计算格网点地表水变化,然后再利用纬度的余弦加权平均,得到流域的地表水变化。

1.2 水文模型 CPC

流域水储量的平衡方程可以简单地描述为:降雨量-土壤水分蒸发蒸腾-表面流失-深层渗透=土壤水分变化+积雪变化。对于流域水储量,其变化就等于土壤水分变化加上积雪变化。在本文中,土壤水分变化和积雪变化数据来自于美国国家海洋和大气局(NOAA)的气象预报中心(climate prediction center,CPC)的陆地资料同化系统。

CPC 是根据全球观测到的降水分布而建立的,采用的数据包括 CPC 每日和每小时的降水分析结果、太阳辐射分布、地表大气压、潮湿度、温度以及水平风速等。CPC 提供的产品包括地表积雪分布、厚度及其反照率、土壤温度、地表以下 4 层的土壤水含量等。本文采用 CPC 陆地资料同

化系统提供的月平均陆地水储量的格网数据,时间间隔为 1 个月,经度和纬度方向的格网点间隔为 1°,时间跨度选取与 GRACE 相同月份的数据,数据单位是和等效水高相同的 cm。对流域内的格网点数据,利用纬度的余弦加权平均,得到河流域的水储量变化。

1.3 最小二乘拟合

最小二乘拟合长江流域水储量变化时间序列。拟合的形式为 $A\cos(\omega t - \varphi)$,其中 ω 为频率, A 为振幅(单位为 cm), φ 为相位,参考时间为 0101。可以将任一个月的水储量变化表示为:

$$y(t) = a + bt + \sum_{i=1}^M A_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i}(t - \varphi_i)\right)$$

式中, a 为常数项; b 为线性项系数; T_i 、 A_i 、 φ_i 分别为对应的周期、振幅和相位。由于 GRACE 发布的数据时间跨度不长,线性项并无很大的研究价值,因此,本文仅考虑年变化项和半年变化项。

2 数据分析和结论

本文计算得到长江流域水储量变化。GRACE 反演出来的等效水高和利用 CPC 模型计算出来的结果比较见图 1。图 1(a)~1(d)所示的反演结果和 CPC 水文模型符合得相当好,都反映出了长江流域水储量存在明显的季节变化,并可以看出水储量的周年变化,主要在春季和秋季达到最小和最大值。图中,GRC 代表 GRACE 数据,CPC 代表 CPC 水文模型,SLR 代表 SLR 测得的 C20,GEOC 代表根据地球质心季节变化项得到的一阶项。图 1(a)为 GRACE 数据(剔除 C20 项)反演和 CPC 水文模型估计的长江流域水储量变化;图 1(b)为 GRACE 数据反演和 CPC 水文模型估计的长江流域水储量变化;图 1(c)为 GRACE 数据(利用 SLR 测得的 C20 项代替 GRACE 的 C20 项)反演和 CPC 水文模型估计的长江流域水储量变化;图 1(d)为 GRACE 数据(利用 SLR 测得的 C20 项代替 GRACE 的 C20 项,根据地球质心季节变化项得到的一阶项代替 GRACE 的一阶项)反演和 CPC 水文模型估计的长江流域水储量变化。在图 1 中,2003 年第一季度和 2006 年第三季度 GRACE 的反演结果和 CPC 水文模型有明显的差别,原因可能是缺乏 2002 和 2006 年底的数据,导致 GRACE 不能很好地反映出该时间段的变化趋势。由于实测数据的缺乏以及传统测量方法的成本太高,水文模型的精度有限,利用 CPC 水文模型得到 2005 年 8、9、10 月的结果和其 2003、2004 年同期结果存在

很大差别,而 GRACE 的反演结果和其 2003、2004 年同期反演结果基本相似,因而 2005 年 8、9、10 月 GRACE 和 CPC 存在明显差别的原因可能是 CPC 水文模型的不准确造成的。另外,在

2006 年 4 月~10 月,长江流域出现严重的旱情,图 1 中,该时间段的 GRACE 反演结果和 CPC 水文模型的振幅明显变小,它们都很好地反映出了该旱情。

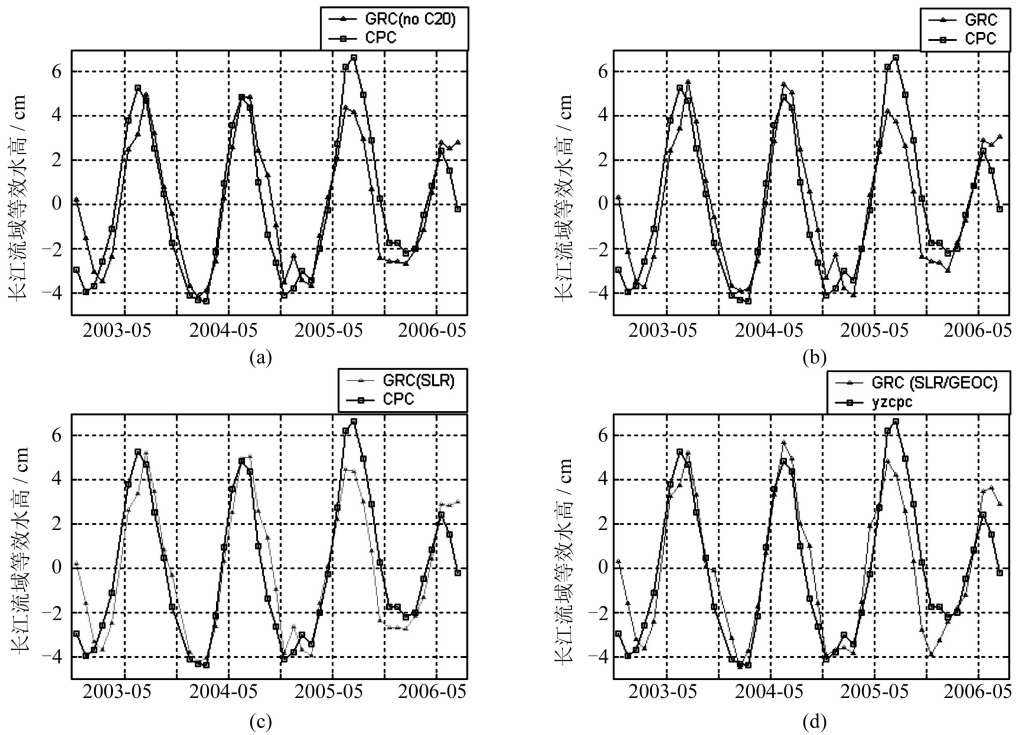


图 1 长江流域水储量变化

Fig. 1 Water Storage Changes of the Yangtze River Basin

在几百 km 或者更大的空间尺度上,GRACE 可探测平均小于 1 cm 的表层水变化^[3]。长江总面积约 1.9×10^6 km²,利用 GRACE 可以反演出周年信号变化。用最小二乘拟合分别估计上述 5 个时间序列的周年信号、半年信号(振幅和相位,结果见表 1)。由于 GRACE 的轨道几何形状对重力场 C20 项不是很敏感,它所确定的 C20 项精度相对较低,因而 C20 项在很多文章中不予考虑,而本文采用卫星激光测距技术得到的 C20 项代替 GRACE 的 C20 项。在周年信号上,方案②和方案③的周年项振幅和相位相差很小,与 CPC 相比,方案③的周年项振幅和 CPC 更接近。从图 1 (b)、1(c)图可以看出,方案②和③反演的结果和 CPC 符合程度相当,不存在显著差别,只是方案③得到的曲线更平滑,符合得稍微好些,因而在本文中考虑采用 SLR 的 C20 项对反演结果有些许改善。另外,从表 1 可以看出,方案①~④的周年振幅、相位与 CPC 水文模型周年振幅、相位都比较接近,但是方案④和 CPC 的周年振幅、相位完全相等,可见方案④对反演结果的质量有明显改善,和 CPC 水文模型更接近。综合以上分析可

见,若考虑低阶项的影响尤其是一阶项,对反演结果的质量有明显的提高。

如何更好地提高 GRACE 的时变重力场以及低阶项的解算精度和改进地球质心时间序列的精度,同时改善平滑方法,将有利于提高反演质量。相信随着 GRACE 卫星数据精度的提高以及处理方法的完善,利用 GRACE 卫星将能更有效地对长江流域水储量变化进行监测,为监督三峡大坝对长江流域环境的影响以及加强水资源的合理利用作出贡献,为国民建设服务。

表 1 振幅和相位

Tab. 1 Amplitudes and Phases

数据	年变化项		半年变化项	
	振幅/cm	相位/(°)	振幅/cm	相位/(°)
GARCE(no C20)	3.73	246	0.59	98
GRACE	3.88	245	0.65	95
GRACE(SLR)	3.92	247	0.62	99
GRACE(SLR+Geo)	4.06	239	0.70	87
CPC	4.06	239	0.51	102

参 考 文 献

- [1] Chen J L, Rodell M, Wilson C R, et al. Low Degree Spherical Harmonic Influences on Gravity Re-

- covery and Climate Experiment (GRACE) Water Storage Estimates[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(1):155-162
- [2] 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 Resources Research, 2003, 39(8):345-354
- [3] Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, et al. Time-variable Gravity from GRACE: First Results [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(11):31-35
- [4] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. Science, 2004, 305:503-505
- [5] 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
- [6] 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, 1998, 103(B12):30 205-30 229
- [7] Cheng M K, Tapley B D. Variations in the Earth's Oblateness During the Past 28 Years[J]. Jour Geophys Res, 2004, 109(B9):335-368
- [8] Chambers D P, Wahr J, Nerem R S. Preliminary Observations of Global Ocean Mass Variations with GRACE[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(13):13 158-13 161
- [9] Chambers D P. Observing Seasonal Steric Sea Level Variations with GRACE and Satellite Altimetry[J]. Jour Geophys Res, 2006, 111(C3):305-318
- [10] Chen J L, Wilson C R, Eanes R J, et al. Geophysical Interpretation of Observed Geocenter Variations [J]. Jour Geophys Res, 1999, 104(B2):2 683-2 690
- [11] Chambers D P. Observing Seasonal Steric Sea Level Variations with GRACE and Satellite Altimetry[J]. Jour Geophys Res, 2006, 111(C10):111-128
- [12] 段建宾, 钟敏, 闫昊明, 等. 利用重力卫星观测资料解算中国大陆水储量变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(3):68-71

第一作者简介: 翟宁, 硕士。主要研究方向为大地测量数据处理、GPS 应用和卫星重力等。
E-mail: wuren8734@126.com

Recovery of Yangtze River Basin Water Storage Variations by GRACE Observations

ZHAI Ning^{1,2,3} WANG Zemin^{1,2} WU Yue⁴ YE Congyun⁵

- (1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping SBSM, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(3 Zhuhai Ocean and Fishery Environment Monitoring Center, 465 East Meihua Road, Zhuhai 519000, China)
(4 Key Lab. of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, Three Gorges University, 8 Daxue Road, Yichang 443002, China)
(5 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Using 43 monthly gravity models observed by GRACE satellites from January 2003 to September 2006, we estimate Yangtze River basin water storage variations. We examine how treatment of C20 and one-degree harmonics affect GRACE based the estimation of basin-scale water storage changes, using independently derived C20 harmonic from satellite laser ranging (SLR) observations and one-degree harmonics from geocenter seasonal variations. GRACE based water storage changes are compared with estimation from CPC hydrological model. Results show remarkably good agreement with CPC in the Yangtze River basin. Combining GRACE observations with SLR degree-2 spherical harmonic and geocenter seasonal variations apparently improves the estimation in Yangtze River basin.

Key words: GRACE; gravity; Yangtze River basin