

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.06.004

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

魏浩翰^{1,2}, 何秀凤², 郑加柱¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 水文模型资料反演我国西南地区陆地水储量变化, 并结合该区域月平均降水资料进行分析。结果表明, GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 水文模型资料反演的西南地区陆地水储量变化相关系数为 0.95, 平均偏差为 0.58 cm, 具有良好的相关性; 陆地水储量变化呈总体逐渐增加的趋势, 受降雨量变化影响明显, 且在时间上相对降雨量变化具有延迟性, 与降水量变化的总体趋势一致, 并具有显著的季节性变化特性, 尤其是周年变化明显。

关键词: GRACE; GLDAS; 西南地区; 陆地水储量

中图分类号: TV211.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2013)06-0488-05

Terrestrial water storage variations in Southwest China revealed by gravity mission and hydrologic and climate model

WEI Haohan^{1,2}, HE Xiufeng², ZHENG Jiazhu¹

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The terrestrial water storage variations in Southwest China were estimated by the GRACE (gravity recovery and climate experiment) mission and GLDAS (global land data assimilation system) model, and the data of monthly average precipitation in this area were analyzed. It can be seen that there is a good agreement between the terrestrial water storage variations derived from GRACE and GLDAS, with a correlation coefficient of 0.95 and mean deviation of 0.58 cm. The terrestrial water storage has a gradually increasing trend on the whole, and it is greatly affected by the variations of precipitation, but it always changes later than precipitation. The variations of the terrestrial water storage are consistent with those of the precipitation. In addition, with obvious yearly cycles, the terrestrial water storage variations in this area exhibit significant seasonal variations.

Key words: GRACE; GLDAS; Southwest China; terrestrial water storage

我国西南地区包括青藏高原东南部、四川盆地南部和云贵高原大部, 包含了高山寒带气候、中亚热带季风气候、北亚热带季风气候以及少部分热带雨林气候等气候类型。区域内河流湖泊众多, 气候多样, 适宜发展林牧业、农业、花卉、烟草、旅游等产业。自 2009 年秋季到 2010 年 5 月, 西南地区遭遇 50~60 a 一遇的干旱, 其持续范围之长、受灾程度之深、造成的损失之重为历史罕见^[1]。目前, 对陆地水分平衡的监测和研究仍受限于监测数据的不足, 而利用 GRACE (gravity recovery and climate experiment) 重力卫星观测数据可反演全球及局地范围内大尺度的陆地水储量变化^[2-7], 为我国西南地区陆地水储量变化监测提供了新方法。本文根据气候水文模型 GLDAS (global land data assimilation system) 的 NOAH 陆面模式 Version-2 数据提供的 1 个月时间分辨率和 1°×1°空间分辨率的土壤水分变化资料 (地面以下 0~200 cm) 以及积雪变化资料, 估计我国西南地区 2003 年 1 月至 2008 年 12 月的陆地水储量, 扣除 2003 年 1 月至 2008 年 12 月的平均陆地水储量,

收稿日期: 2012-10-26

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD); 江苏省科技支撑计划 (BE2010316); 国家自然科学基金 (41274017)

作者简介: 魏浩翰 (1978—), 男, 河南焦作人, 讲师, 主要从事大地测量学研究。E-mail: haohan_wei@sina.com

得到陆地水储量的逐月变化量,并分别用 GLDAS 反演得到的陆地水储量和中国气象局国家气象信息中心提供的西南地区实际降水资料进行比较,验证了利用 GRACE 重力卫星观测数据监测我国西南地区陆地水储量变化的精度。

1 利用 GRACE 重力卫星观测数据反演陆地水储量

根据地球重力场模型球谐系数的变化可以推求地球表面质量变化。大地水准面在空间和时间上逐渐变化,其球谐系数定义为

$$N(\theta,\lambda,t)=R\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^lP_{lm}(\cos\theta)(C_{lm}(t)\cos m\lambda+S_{lm}(t)\sin m\lambda)$$
 (1)

其中 $\theta=90^{\circ}-\varphi$

式中: θ ——地心余纬; φ ——地心纬度; λ ——地心经度; t ——时间; R ——地球赤道半径, $R=63\,781\,363.3\text{ m}$; l,m ——地球重力场的阶数和系数; $P_{lm}(\cos\theta)$ ——归一化缔合 Legendre 函数; $C_{lm}(t),S_{lm}(t)$ ——随时间变化的地球重力场系数。

从时变重力场系数可得到地球表面密度变化:

$$\Delta\sigma(\theta,\lambda)=\frac{R\rho_{\text{avg}}\pi}{3}\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^l\frac{2l+1}{1+k_l}P_{lm}(\cos\theta)(\Delta C_{lm}\cos m\lambda+\Delta S_{lm}\sin m\lambda)$$
 (2)

式中: $\Delta\sigma(\theta,\lambda)$ ——地球表面密度变化; ρ_{avg} ——地球平均密度, $5\,517\text{ kg/m}^3$; k_l ——负载 LOVE 数; $\Delta C_{lm},\Delta S_{lm}$ ——球谐系数变化量,由 GRACE 重力卫星观测数据提供。为了得到球谐系数的变化量,需从月地球重力场中扣除背景重力场。

为了减小估算误差,通常采用高斯平滑法来计算平均后的地球表面密度变化:

$$\Delta\sigma(\theta,\lambda)=\frac{2R\rho_{\text{avg}}\pi}{3}\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^l\frac{2l+1}{1+k_l}W_lP_{lm}(\cos\theta)(\Delta C_{lm}\cos m\lambda+\Delta S_{lm}\sin m\lambda)$$
 (3)

其中 $W_0=\frac{1}{2\pi}$ $W_1=\frac{1}{2\pi}\left(\frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}}-\frac{1}{b}\right)$ $W_{l+1}=-\frac{2l+1}{b}W_l+W_{l-1}$ $b=\frac{\ln 2}{\left[1-\cos\left(\frac{r}{R}\right)\right]}$

式中: W_l ——各项同性的高斯平滑权函数; r ——高斯平滑半径。

陆地水储量定义为地表水和地下水之和。CSR (the University of Texas at Austin, Center for Space Research) 提供的 GRACE RL04 数据在 Level-2 数据处理过程中扣除了包括大气潮、海潮、固体潮、极潮等潮汐及非潮汐影响,因此 GRACE 时变重力场体现的主要是非大气和海洋的质量变化,即陆地水储量的变化。利用 GRACE RL04 数据可计算地球时变重力场球谐系数,代入式(2)即可得到主要由陆地水储量变化引起的地球表面密度变化。为了反映陆地水储量变化,地球表面密度变化可转化为等效水高变化:

$$T(\theta,\lambda)=\frac{\Delta\sigma(\theta,\lambda)}{\rho_{\text{water}}}$$
 (4)

式中: $T(\theta,\lambda)$ ——等效水高; ρ_{water} ——液态水密度。

如图 1 所示,选取我国西南地区 ($99.5^{\circ}\text{E}\sim 110.5^{\circ}\text{E}$, $21.5^{\circ}\text{N}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$) 为研究范围,采用 CSR 提供的 2003 年 1 月至 2011 年 10 月共 102 个月的 GRACE RL04 月平均时变重力场模型 60 阶的球谐系数。为了得到球谐系数的变化量,选取 2003 年 1 月—2008 年 12 月 (2003 年 6 月除外) 共 71 个月地球重力场的平均值作为背景重力场予以扣除,并选取 500 km 的高斯平滑半径降低 GRACE 的噪音^[8-9]。由于 GRACE 轨道高度较低,两颗卫星的距离很短,其低阶项尤其是 C20 项不能精确获取。为了提高 GRACE 的反演精度,采用卫星激光测距技术 SLR (satellite laser ranging) 得到的 C20 替代 GRACE 的 C20^[3,10]。

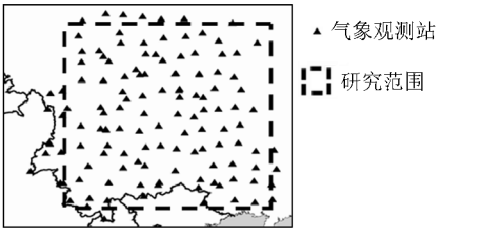


图 1 研究范围及降水量观测台站分布
Fig. 1 Study area and distribution of precipitation observation stations

2 气候水文模型 GLDAS

陆地水储量的平衡方程可描述为^[11-12]

降水量 - 土壤水蒸发及蒸腾量 - 深层渗透量 - 地表水流失量 = 土壤水分变化量 + 积雪变化量

GLDAS 采用 NASA 新一代的地面、空间观测系统和数据同化技术,目的是获取卫星和地面观测数据,提供最优、近实时的陆地表面状态变量(如土壤湿度、地表温度、气压等)与流量变量(如降水量等)^[12]。GLDAS 提供的数据空间分辨率最高能达到 0.25°×0.25°的经纬度格网,时间分辨率最高能达到 3 h。

3 实际降水资料

实际降水资料来源于中国地面气候资料月值数据集。该数据集由中国气象局国家气象信息中心提供,以 ASCII 码形式存储。本文采用研究区域内 112 个地面气象观测站的月平均降水数据(图 1),并将所有地面气象观测站数据进行逐月平均,以反映西南地区月平均降水量。为了和 GRACE 重力卫星观测数据时间保持一致,降水量数据的时间范围为 2003 年 1 月至 2011 年 10 月,并扣除 2003 年 1 月至 2008 年 12 月的平均降水量以得到月平均降水量变化。

4 结果分析

图 2 为利用 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演的 2006 年 9 月和 2007 年 4 月的全球陆地水储量变化。由于 GLDAS 资料缺少南极洲的数据,且在格陵兰岛极不准确,本文未对南极洲进行比较。从图 2 可以看出,利用 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演的陆地水储量变化在全球尺度上有非常高的一致性。此外,全球陆地水储量变化在两个时间段内有显著的变化,反映出陆地水储量具有明显的季节性变化特征。同时,GRACE 重力卫星观测数据计算的结果相较于 GLDAS 结果季节变化幅度更为突出,主要原因在于 GLDAS 对积雪、地表和地下水分流失等数据估计不足;另一方面,在 GRACE 重力卫星观测数据处理过程中(例如高斯滤波半径的不同)产生的误差也会加强或者削弱陆地水储量的变化信号^[13-15]。

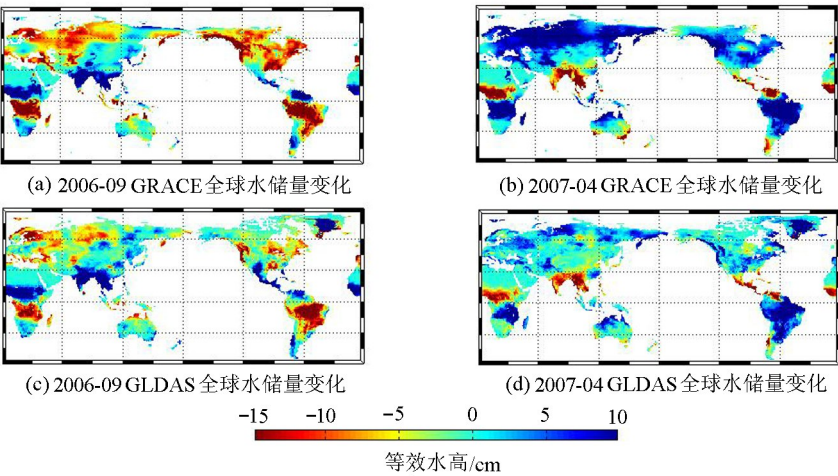


图2 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 水文模型反演的全球陆地水储量变化

Fig. 2 Global terrestrial water storage variations derived from GRACE and GLDAS

为了揭示我国西南地区陆地水储量变化的长期趋势及变化特征,分别利用 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演我国西南地区(图 1)月平均陆地水储量变化,同时引入月平均降水量变化数据,如图 3 所示。从图 3 可以看出,GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演的我国西南地区陆地水储量变化具有良好的相关性(图 4)。此外,二者均呈现显著的季节性变化现象,年度最小值出现在每年 5 月左右,最大值在 11 月左右,这也和图 3 中月平均降水量的变化相一致,反映出降水量变化直接影响陆地水储量的变化。需要注意的是,从 2009 年秋季到 2010 年 5 月西南地区的陆地水储量变化和降水量变化急剧下降,直观反映出该时间段内我国西南地区发生的严重旱灾。此外,还可以看出陆地水储量变化相对于降水量变化在时间上有延迟性,反映出降水量在经过径流、蒸发蒸腾、渗透等水分重新分配后形成了陆地水储量。

利用最小二乘原理分别对 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演的陆地水储量变化时间序列数据进行线性拟合,二者的变化趋势一致,分别为 $(0.64\pm0.033)\text{ cm/a}$ 和 $(0.51\pm0.027)\text{ cm/a}$;同时对月均降水量数据进行线性拟合,其线性变化趋势为 $(0.24\pm0.030)\text{ cm/a}$ (图 3)。这些反映出我国西南地区陆地水储量在季节性变化的前提下,呈缓慢上升的趋势,并且和降水量变化的总体趋势相一致。同时可以看出 GRACE 重力卫星观测数据反演的陆地水储量变化量大于根据 GLDAS 资料得到的结果,再一次验证了 GLDAS 对积雪、地表和地下水分流失等参数的估计不足。

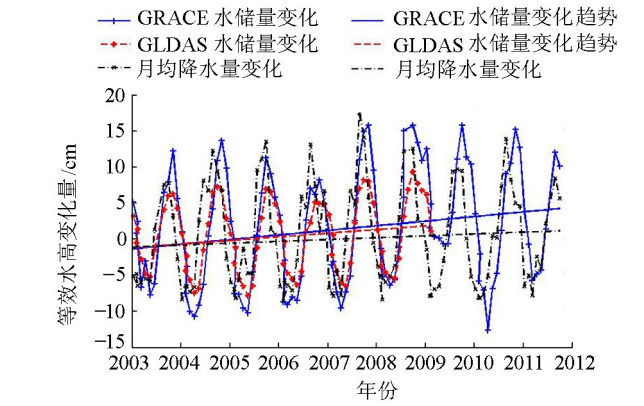


图 3 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演西南地区陆地水储量变化及月平均降水量

Fig. 3 Terrestrial water storage variations derived from GRACE and GLDAS, and monthly average precipitation in Southwest China

利用傅立叶变换分别对 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演的陆地水储量变化进行功率谱分析,如图 5 所示。由图 5 可见,二者在 1 a 附近信号强度相当明显,同时在 0.5 a 处也有强度较弱的信号,说明西南地区陆地水储量变化的时间序列具有周年和半周年的季节性变化特点,特别是周年变化显著。

为了计算西南地区陆地水储量的周年和半周年变化,可用谐函数描述:

$$y(t) = a + \sum_{i=1}^2 \left\{ S_i \sin \left[\frac{2\pi(t - t_0)}{p_i} + \varphi_i \right] \right\} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中: a ——常数项; S_i, p_i, φ_i ——振幅、周期和相位; ε_i ——残差。

利用最小二乘原理对其进行拟合,振幅和相位见表 1。从表 1 可以看出,GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演的西南地区陆地水储量变化其周年、半周年的振幅和相位均比较接近,且周年变化尤为突出,进一步表明该地区的陆地水储量呈周年显著变化的特性。

5 结 论

a. GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演的陆地水储量变化有良好的一致性,但是由于模型数据的缺失,GRACE 重力卫星观测数据反演的陆地水储量变化更为显著。

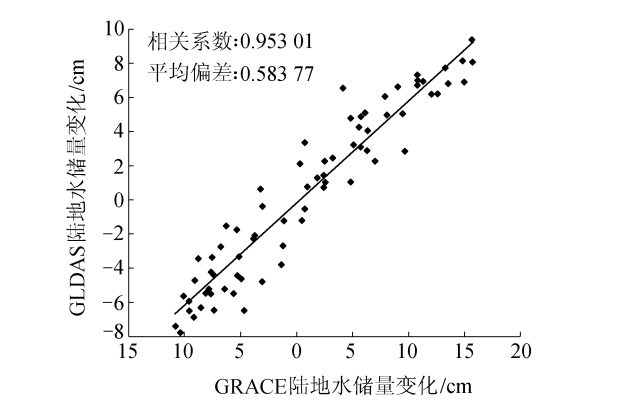


图 4 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演的西南地区陆地水储量变化的线性相关性

Fig. 4 Linear correlations between terrestrial water storage variations in Southwest China derived from GRACE and GLDAS

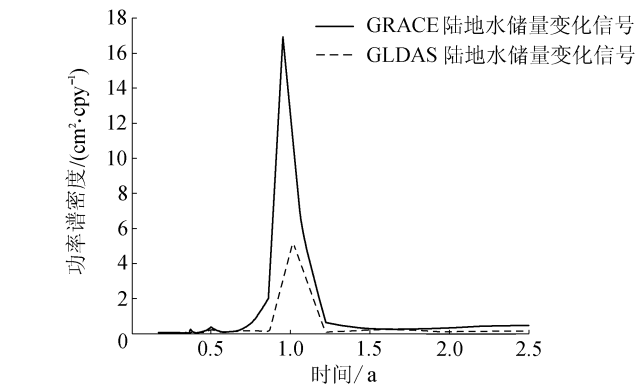


图 5 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料反演的西南地区水储量变化功率谱分析

Fig. 5 Power spectrum of terrestrial water storage variations in Southwest China derived from GRACE and GLDAS

表 1 西南地区陆地水储量变化的振幅和相位

Table 1 Amplitudes and phases of terrestrial water storage variations in Southwest China

数据源	周年变化		半周年变化	
	振幅/cm	相位/(°)	振幅/cm	相位/(°)
GRACE	9.60±0.29	190.4	1.30±0.29	317.6
GLDAS	9.46±0.08	183.0	1.19±0.08	355.4

b. 我国西南地区陆地水储量变化具有显著的季节性变化特性,尤其是周年变化明显,且总体呈逐步增加的趋势。

c. 降水量变化直接影响陆地水储量的变化,且后者相对于前者在时间上有延迟性,这和陆地水分的新分配过程相一致。

GRACE 重力卫星观测数据及 GLDAS 资料对大尺度时空陆地水储量变化的监测显示出良好的一致性,但是二者之间的差异仍需进一步探讨。如,进一步优化 GRACE 重力卫星观测数据处理过程,以削减由此项误差带来的陆地水储量变化的信号误差;引入外部数据或模型,例如 GOCE, TRMM 等卫星遥感数据,或者 NCEP 水文模型、CPC 水文模型,定量分析 GLDAS 水文模型反演陆地水储量变化的优劣之处。

致谢:感谢 NASA 提供的 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 资料,感谢中国气象局国家气象信息中心提供的西南地区月平均降水资料。

参考文献:

- [1] 温奇,范一大,陈世荣,等. 环境减灾卫星数据在旱灾预警监测中的应用[J]. 遥感技术与应用,2012,27(4):591-599. (WEN Qi, FAN Yida, CHEN Shirong, et al. Application of environment and disaster satellites data in drought early-warning and monitoring[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(4):591-599. (in Chinese))
- [2] TAPLEY B D, BETTADPUR S, WATKINS M, et al. The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(9): L09607.
- [3] 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(1): 155-162.
- [4] 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.
- [5] 翟宁,王泽民,伍岳,等. 利用 GRACE 反演长江流域水储量变化[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(4):436-439. (ZHAI Ning, WANG Zeming, WU Yue, et al. Recovery of Yangtze River Basin water storage variations by GRACE observations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(4): 436-439. (in Chinese))
- [6] 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 Yuande, E Dongchen, CHAO Dingbo, et al. Inverse the seasonal and annual variation of terrestrial water storage form GRACE [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009(12): 2987-2992 (in Chinese))
- [7] 罗志才,李琼,张坤,等. 利用 GRACE 时变重力场反演南极冰盖的质量变化趋势[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2012,42(10):1590-1596. (LUO Zhicai, LI Qiong, ZHANG Kun, et al. Investigation on mass change trend of ice sheet in Antarctic from GRACE time-variable gravity data[J]. Science in China Ser D: Earth Science, 2012, 42(10): 1590-1596. (in Chinese))
- [8] WERTH S, GUNTNER A, SCHMIDT R, et al. Evaluation of GRACE filter tools from a hydrological perspective[J]. Geophysical Journal International, 2009, 179(3): 1499-1515.
- [9] 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]. J Geophys Res, 103(B12): 30205-30230.
- [10] CHENG M K, TAPLEY B D. Variations in the earth's oblateness during the past 28 years[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(B9): 335-368.
- [11] FAN Y, VAN D D, MITCHELL K, et al. A 51-year reanalysis of the US land-surface hydrology[J]. GEWEX News, 2003, 13(2): 6-10.
- [12] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2004, 85(3): 381-394.
- [13] 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]. J Geod, 2007, 81: 237-245.
- [14] SWENSON S C, WAHR J. Estimating large-scale precipitation minus evapotranspiration from GRACE satellite gravity measurements[J]. J Hydrometeorol, 2006, 7(2): 252-270.
- [15] SYED T H, FAMIGLIETTI J S, Rodell Matthew, et al. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS [J]. Water Resources Research, 2008, 44(2): W02433.