

利用 GRACE 时变重力位模型 研究全球陆地水储量变化*

朱广彬^{1,2)} 李建成¹⁾ 文汉江²⁾ 王建强¹⁾

(1)武汉大学测绘学院,武汉 430079
(2)中国测绘科学研究院,北京 100039)

摘要 利用 GRACE Level-2 数据产品推求了全球陆地水储量变化,并针对推求过程中高斯平滑半径的选择、位模型截断阶数的选择等问题进行了探讨。研究表明,在推求陆地水储量变化过程中,位模型截断阶数选为 20 阶,高斯滤波半径取为 800 km 时,计算结果较优,利用 GRACE 位模型计算的全球陆地水储量变化结果与 CPC 水文模型的计算结果具有较好的区域符合性和季节对应性。

关键词 地球重力场; GRACE; 水储量变化; 高斯滤波; CPC 水文模型
中图分类号:P333 文献标识码:A

STUDY ON VARIATIONS OF GLOBAL CONTINENTAL WATER STORAGE WITH GRACE GRAVITY FIELD MODELS

Zhu Guangbin^{1,2)}, Li Jiancheng¹⁾, Wen Hanjiang²⁾ and Wang Jianqiang¹⁾

(1) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079
(2) Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039)

Abstract By use of the GRACE Level-2 products, the variations of global continental water storage are deduced and in the deduction, the problems in the choice of Gaussian filter radius and the truncated degree are discussed. The computation results are good as with Gaussian smoothing radius of 800km and truncated till 20, and the variations of global continental water storage are in accord with those from CPC model in regional scale and seasonal scale.

Key words: gravity field; GRACE; variation of water storage; Gaussian filter; CPC hydrology model

1 引言

地球重力场是反映地球物质分布特性的物理场^[1],它是最基本的地球学信息之一,在地球物理学、大地测量学、空间科学、海洋科学等领域起着举足轻重的作用。许多自然物理现象都会在稳态的地球重力场或时变的重力场信号中得到反映。众所周知,

地球外部重力场的形成除了与地球质量、密度分布有关,还与质量的重新分布密切相关(地球内部运动、大气运动、水循环、潮汐等)。稳态的质量分布决定了平均地球重力场信息,可由稳态地球重力位模型描述,非稳态的质量重新分布导致了地球重力场的时变部分,可由时变重力位模型描述^[2]。

GRACE 重力卫星计划由美国国家宇航署

(NASA)和德国空间飞行中心(DLR)联合开发,旨在获取地球重力场的中长波部分及全球重力场的时变特征,并可用于探测大气和电离层环境。截至2007年12月,基于GRACE重力卫星观测数据已求解出了5年多的月地球重力位模型(即以月为时间间隔的时变重力位模型),这为探测地球物质迁移及变化,包括陆地水储量变化,提供了机遇和可能。

地球系统的大尺度质量重新分布(即质量分布随时间的变化)反映了地球系统内部各种形态的物质(大气、海洋和固态地壳、黏性地幔、液态外核以及固态内核)之间的相互作用,是地球科学领域的重要研究对象。由地核(包括内核和外核)引起的时变重力场部分主要表现在10年或更长的时间尺度上,而由大气、海洋等引起的时变重力场部分主要表现在季节性和年际时间尺度上^[3]。由于GRACE重力位模型在数据处理过程中已经扣除了潮汐影响(包括海潮、固体潮和地球自转产生的极潮)及非潮汐(大气和海洋)的影响。因此,除了重力位模型的计算误差以及大气和海洋的模型误差以外,GRACE时变重力场反映的是非大气、非海洋的质量变化。这在季节性或更短的时间尺度上,对于陆地区域反映的主要就是陆地水储量变化信息^[4]。

John Wahr, Sean Swenson 等人^[5-7]利用时变重力位模型推算地球表面质量变化的方法进行了深入研究,研究表明,利用GRACE位模型得到的质量反演结果可以得到等效水高1.5 cm的水质量变化;I Velicogna, John Wahr^[8]利用GRACE重力位模型,得到了2002—2005年间南极冰盖的质量变化时间序列,为研究全球海平面上升和气候变化提供了参考依据;此外, Tapley、Chen J L、周旭华、胡小工等人^[3-4, 9-10]亦做了大量的相关研究工作。

本文采用UTCSR公布的Level-2 RL04 GSM系列数据产品^[11]进行全球陆地水储量的时变研究,并针对推求过程中的高斯平滑半径、位模型截断阶数的选择等关键性问题进行详细探讨,得出了有益结论。

2 利用时变重力场反演地球表面质量变化的基本原理

由质量变化引起的球谐系数变化的表达式为^[5]:

$$\begin{cases} \Delta\bar{C}_{lm} \\ \Delta\bar{S}_{lm} \end{cases} = \frac{3}{4\pi a \rho_a (2l+1)} \int \Delta\rho(r, \theta, \lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \left[\frac{r}{a} \right]^{l+2} \begin{cases} \cos(m\lambda) \\ \sin(m\lambda) \end{cases} \sin\theta d\theta d\lambda dr \quad (1)$$

式中, a 为地球平均半径; θ, λ 为余纬($\theta = 90^\circ -$ 纬度 φ)和经度; l, m 为球谐展开的阶和次; $\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}$ 为完全规格化球谐系数; $\bar{P}_{lm}(\cos\theta)$ 为完全规格化Legendre 缔合函数; $\rho_a = 5\,517 \text{ kg m}^{-3}$ 为地球平均密度; $\Delta\rho(r, \theta, \lambda)$ 为物质的体密度变化,并假定其表现为地球表面厚度为 H 的一薄层。

由于在地球重力位模型高阶项上,GRACE数据的误差占主要成分,因此可以对重力位模型进行截断 $l < l_{\max}$,忽略模型高阶项对地球质量变化的贡献。假定地球表面变化的物质厚度 H 足够小,从而可以认为式(1)中的 $r \approx a$,这样可以用面密度 $\Delta\sigma(\theta, \lambda)$ 代替 $\Delta\rho(r, \theta, \lambda)$,两者关系为:

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = \int \Delta\rho(r, \theta, \lambda) dr \quad (2)$$

如果对表面物质面密度做球谐函数展开,则有:

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = a \rho_w \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l (\Delta C_{lm} \cos m\lambda + \Delta S_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \quad (3)$$

其中, $\rho_w = 1\,000 \text{ kg m}^{-3}$ 为水密度, $\Delta\sigma/\rho_w$ 为用等效水高表示的物质质量变化。

由文献[5]推导得到利用重力位模型位系数变化推求地球表面质量变化的表达式为:

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = \frac{a \rho_a}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_l} (\Delta\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \quad (4)$$

用地球重力位模型球谐系数的变化可以求出地球表面质量变化,但利用GRACE每月观测资料得到的地球重力场受到卫星轨道误差、卫星K波段测距误差、加速度计测量误差等的影响。考虑到模型系数误差随阶数 l 增大而迅速增加;而且研究感兴趣的一般并不是某一点的表面密度变化,而是某区域的总质量变化。为了减小估算物质质量分布变化时的误差,提高精度,引入了高斯平滑函数。

$$W(\theta, \lambda, \theta', \lambda') = W(\gamma) = \frac{b}{2\pi} \frac{\exp[-b(1-\cos\gamma)]}{1-e^{-2b}} \quad (5)$$

其中, $b = \frac{\ln 2}{(1-\cos(r/a))}$, r 为高斯平滑半径。高斯平滑函数 $W(\theta, \lambda, \theta', \lambda')$ 仅仅取决于点 (θ, λ) 与点 (θ', λ') 间的角距 γ 。

由文献[6]推导得到加入高斯平滑算子后的地球表面质量变化反演公式为:

$$\Delta\tilde{\sigma}_{\text{region}} = \frac{2a\rho_a\pi}{3} \sum_{l=0}^{l_i} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} W_l(\Delta\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \quad (6)$$

其中, $W_l = \frac{1}{2l+1} \int_0^\pi W(\gamma) \bar{P}_{l0}(\cos\gamma) \sin\gamma d\gamma$ 。

W_l 还可以通过下面的迭代公式计算^[5]:

$$\left. \begin{aligned} W_0 &= \frac{1}{2\pi} \\ W_1 &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right] \\ W_{l+1} &= -\frac{2l+1}{b} W_l + W_{l-1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3 陆地水储量推求过程中的关键问题探讨

由于在 GRACE 重力位模型的高阶项部分,误差占主要成分。因此,在利用 GRACE 位模型反演陆地水储量变化的过程中,位模型截断阶数的选择是需要重点探讨的一个问题。

GRACE 的空间分辨率在几百千米的量级上,陆地水储量变化的估计不是某一点上的测量,而是空域上的一种平均。高斯滤波的平滑算法在自动减小 GRACE 观测误差和其它地球物理信号污染的同时,能够估计某区域的陆地水储量变化,但是如何选择高斯滤波的平滑半径,使得在减小误差和噪声污染的同时,不损失有效的水储量变化信息,需要进一步探讨。

3.1 位模型截断阶数的选择

1) 位模型误差阶方差计算

为了对位模型截断阶数的选择提供参考标准,计算了 2006 年各月重力位模型各阶项的误差阶方差,并转化为大地水准面高的形式。图 1 显示了 2006 年各月重力位模型误差阶方差的变化曲线。

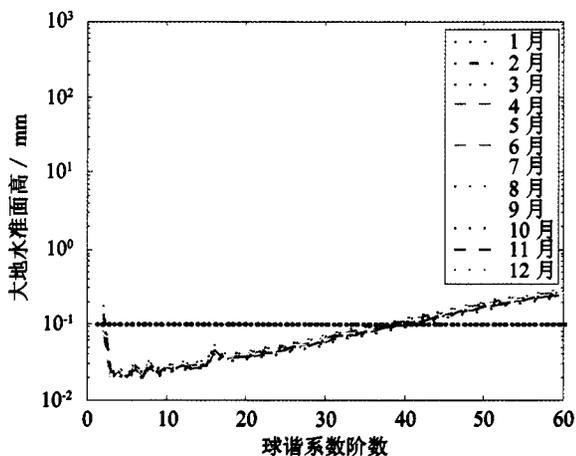


图 1 2006 年各月重力位模型的误差阶方差比较

Fig. 1 Estimated degree error variances of monthly gravity field models in 2006

从图 1 中可以看出,随着阶数的增加,误差阶方差迅速增大,2006 年各月重力位模型 40 阶以下(J_2 项除外)的误差阶方差都在 0.1 mm 以下。由于

GRACE 的轨道几何形状对重力场的 J_2 项不敏感^[9],因此其精度较差,误差阶方差在亚毫米级以上。所以,在利用 GRACE 月重力位模型计算陆地水储量变化过程中,一般将 J_2 项去掉或采用 SLR 观测方法得到的 J_2 项代替。

2) 不同阶数下全球陆地水储量变化结果的比较

利用 GRACE 月重力位模型对 2006 年 10 月的全球陆地水储量变化进行了计算。在计算时,首先对 2006 年 1—12 月间的重力位模型的球谐系数进行了平均计算,并从 2006 年 10 月的重力位模型中剔除了该平均值,得到了球谐系数残差和,然后计算得到了全球陆地水储量变化(图 2)。在计算时未进行高斯滤波处理,位模型阶数分别截取至 15 阶、20 阶、35 阶和 60 阶。

从图 2 可以看出,当位模型截断阶数取至 60 阶和 35 阶时,无法看到陆地水储量变化的主要特征,计算结果以噪声为主。当截断阶数取至 20 阶时,陆地水储量变化的主要特征变得比较明显,但仍然存在一定的噪声。当截断阶数取至 15 阶时,陆地水储量变化的主要特征变得更加明显,噪声又得到了进一步的减弱,但有可能同时去掉了全球陆地水储量变化特征的有用信息。

综上所述,在利用 GRACE 位模型反演陆地水储量变化的过程中,模型的截断阶数取至 20 阶是比较合理的,能够在尽量不减少有用反演信息的同时,有效地抑制位模型误差带来的影响。

3.2 高斯滤波平滑半径的选择

图 3、图 4 显示了在不同高斯平滑半径下计算的 2006 年 10 月全球陆地水储量变化的结果,模型分别截取至 20 阶和 60 阶;高斯平滑半径分别取为 0 km、200 km、400 km、600 km、800 km 和 1 000 km。

从图 3、图 4 可以看出,随着平滑半径的增加,全球陆地水储量变化的推算值愈加明显。这说明利用 GRACE 位模型计算的全球水储量变化中含有一定的相关误差,而高斯滤波方法可以在一定程度上有效去除这种误差。此外,当平滑半径大于 400 km 时,能够得到较为清楚的水储量变化信息。在模型截取至 20 阶和 60 阶时,800 km 的平滑半径是相对较优的,大尺度的水文信号可以较为显著地显现出来。

4 GRACE 全球陆地水储量变化结果与 CPC 水文模型结果的比较

本文采用的水文模型,即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CPC的陆地资料同化系统,CPC水文模型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水文模型时间间隔为1个月,经度和纬度方向的空间格点间隔为 0.5° ,其时间跨度为1980年1月至今。CPC没有南极的数据。

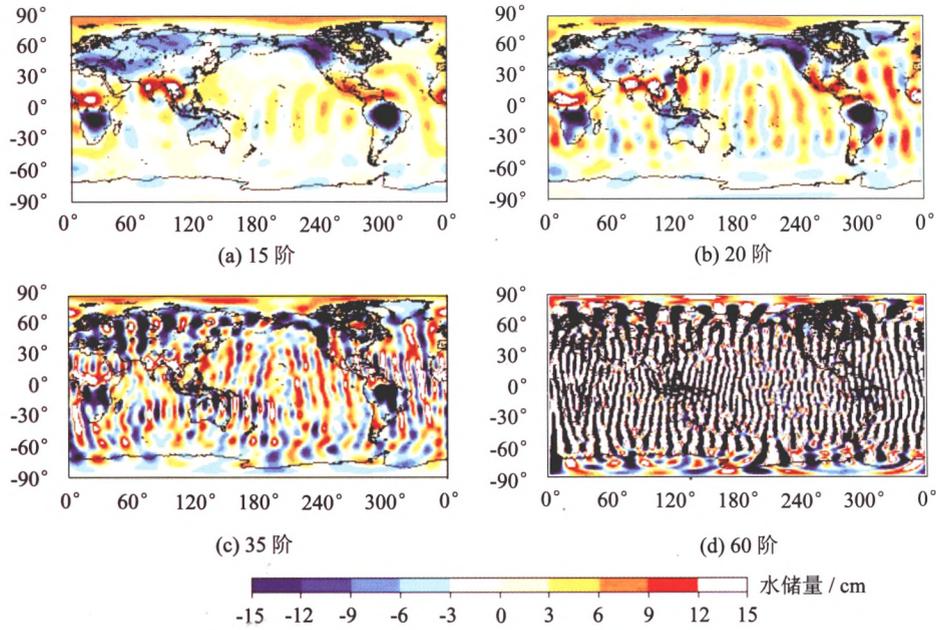


图2 不同阶数下全球陆地水储量变化结果的比较

Fig. 2 Variations of global continental water storage calculated in different truncated degree

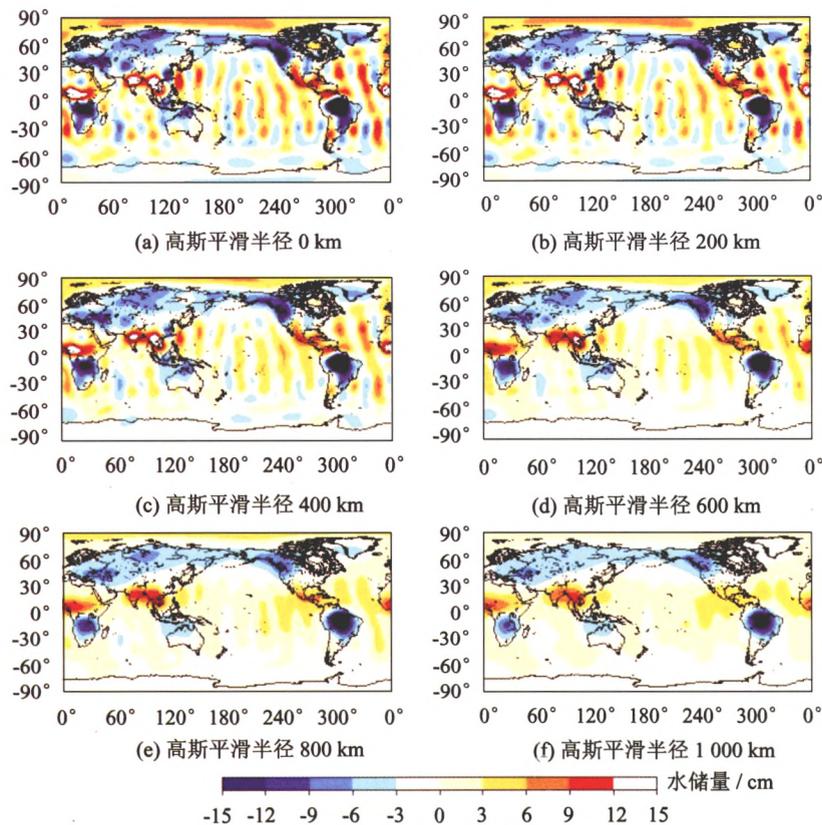


图3 高斯平滑半径对全球陆地水储量变化计算结果的影响(20阶)

Fig. 3 Influence of different Gaussian filter radius on the calculated results when truncated degree is set to 20

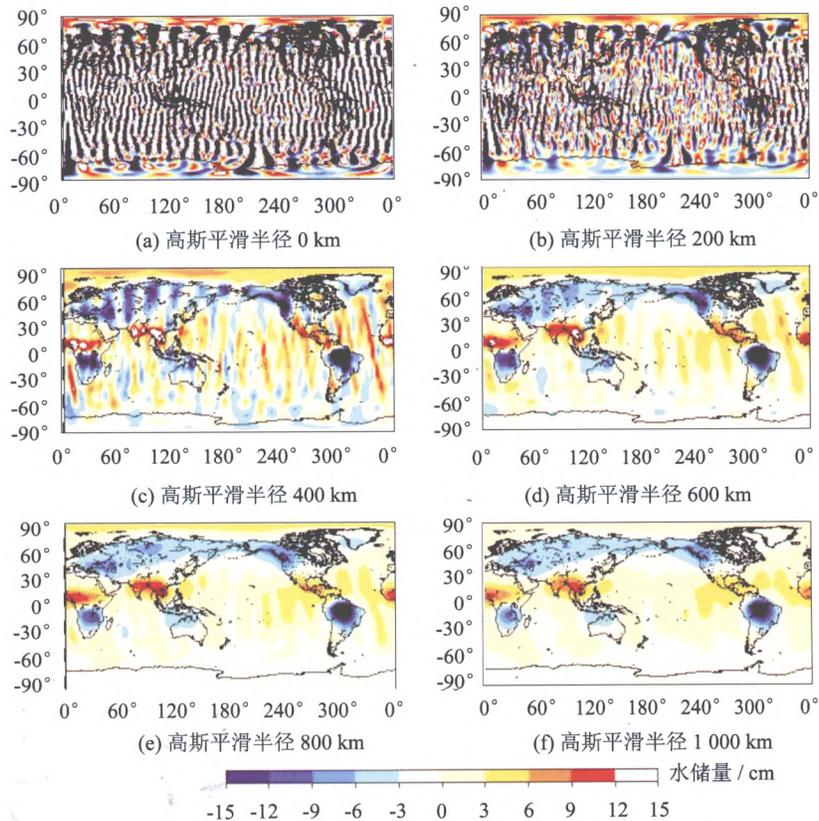


图4 高斯平滑半径对全球陆地水储量变化计算结果的影响(60阶)

Fig. 4 Influence of different Gaussian filter radius on the calculated results when truncated degree is set to 60

本文利用 GRACE 位模型和 CPC 水文模型两类数据分别计算了 2006 年 1—4 月、4—7 月以及 7—10 月间的全球陆地水储量变化。在计算过程中,利用 SLR 观测方法得到的 J_2 项^[11]对 GRACE 位模型的 J_2 项进行了替换。GRACE 位模型阶数截取至 20,高斯平滑半径为 800 km。结果见图 5(左图为 CPC 水文模型数据计算结果,右图为 GRACE 位模型数据计算结果)。

从图 5 中可以看出,两种方法计算的水储量变化具有较为明显的区域性对应关系和季节性对应关系。图 5(a)显示,在 2006 年 1—4 月期间,利用 GRACE 数据和 CPC 水文模型分别计算的陆地水储量变化在南美洲的亚马逊河流域、非洲大陆的尼日尔湖以及澳大利亚北部等南半球地区均呈现增长趋势,而在亚洲东南部的孟加拉湾和长江流域地区、非洲的乍得和赞比西河流域等区域则均呈现减小趋势。同样,在图 5(b)、图 5(c)中亦可见到相似的区域性和季节性对应趋势。由于 CPC 水文模型的南极数据缺失,所以二者在南极地区存在一定差异。此外,在格陵兰岛及俄罗斯的西伯利亚地区,冰后期回弹影响较大,而 CPC 模型又缺乏探测冰后期回弹带来的地表质量变化的能力,故而两种方法计算的结果存在一定的差异。

需要指出,虽然在大尺度范围上,GRACE 反演结果和 CPC 水文模型结果符合较好,但它们的差别也是明显的。GRACE 位模型的计算结果分辨率较低,而 CPC 模型结果则较为精细。这是由于 GRACE 重力卫星对于探测地球重力场的中短波部分能力较差(UTCSR Level-2 RL04 类型数据的位模型仅解算至 60 阶)。但是,有一点是毫无疑问的,GRACE 时变重力场观测已经成为监测陆地水储量变化独特而又有效的技术手段。

5 结论

研究表明,GRACE Level-2 RL04 GSM 系列重力位模型的 J_2 项精度较低,误差阶方差在 0.1 mm 以上;在推求陆地水储量变化过程中,模型截断阶数选为 20 阶,高斯滤波半径取为 800 km,水储量计算结果较优;利用 GRACE 位模型计算的全球陆地水储量变化与 CPC 水文模型存在区域符合性和季节对应性,二者结果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,亚洲东南部的孟加拉湾和长江流域地区以及澳大利亚北部符合较好。GRACE 时变重力场观测已成为监测陆地水储量变化独特而有效的技术手段。

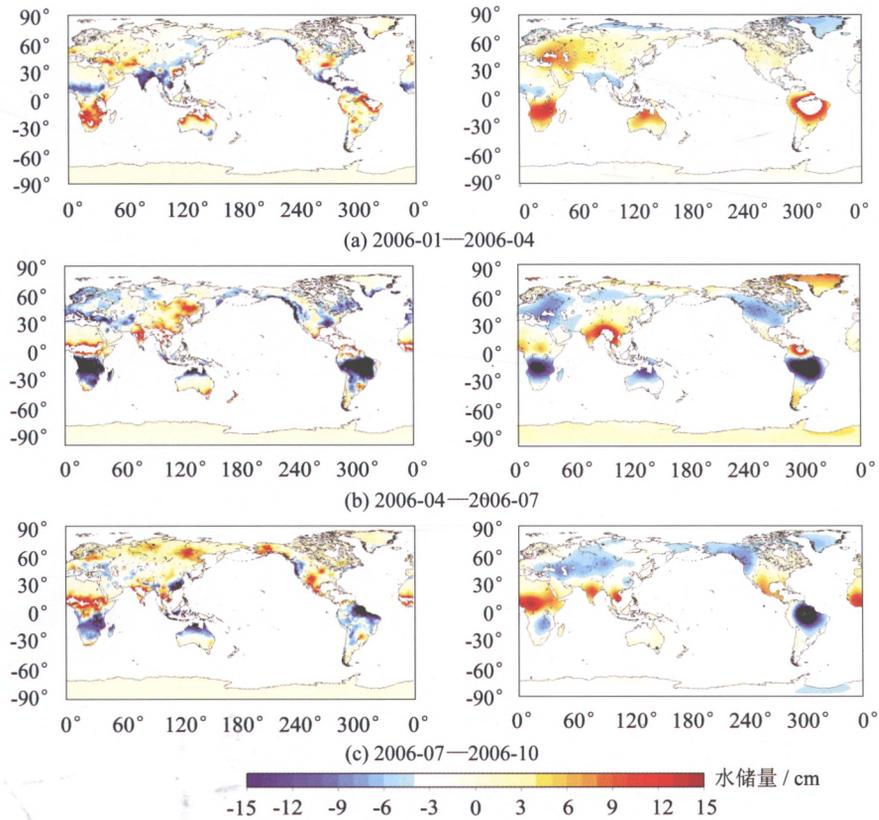


图5 2006年4月至10月间的全球陆地水储量变化比较

Fig. 5 Variations of global continental water storage in 2006

参 考 文 献

- 1 宁津生,陈军,晁定波著. 数字地球与测绘[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- 1 Ning Jinsheng, Chen Jun and Chao Dingbo. Digital earth and surveying [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)
- 2 罗佳. 利用卫星跟踪卫星确定地球重力场的理论与方法[D]. 武汉大学,2003.
- 2 Luo Jia. Theory and methodology of earth gravity field determination using satellite-to-satellite tracking[D]. Wuhan University, 2003. (in Chinese)
- 3 胡小工,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.
- 3 Hu Xiaogong, et al. Seasonal variation of water distribution in Yangtze River basin from spatial gravity survey of GRACE [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 36(3): 225-232. (in Chinese)
- 4 周旭华,等. 全球水储量变化的 GRACE 卫星检测[J]. 地球物理学报,2006, 49(6):1 644-1 650.
- 4 Zhou Xuhua, et al. Detection of global water storage variation using GRACE[J]. Chinese J. Geophys, 2006, 49(6): 1 644-1 650. (in Chinese)
- 5 John Wahr and Mery Molenaar. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE[J]. J Geophys Res, 1998,103(B12):30 205-30 229.
- 6 Sean Swenson and John Wahr. Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity[J]. J Geophys Res,2002,107(B9):2 193.
- 7 John Wahr, Sean Swenson and I Velicogna. Accuracy of GRACE mass estimates[J]. Geophys Res Let, 2006, 33: L06401.
- 8 I Velicogna and John Wahr. Measurements of time-variable gravity snow mass loss in Antarctica[J]. Science,2006,311: 1 754-1 756.
- 9 Chen J L, et al. Low degree gravitational changes from GRACE: validation and interpretation[J]. Geophys Res Let, 2004,31:L22607.
- 10 G Ramilliena, et al. Time variations of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids[J]. Earth and Planetary Science Letters,2005,235:283-301.
- 11 <http://www.csr.utexas.edu/grace>.