

# 重力卫星检测到的全球陆地水储量变化\*

苏晓莉<sup>1,2</sup> 平劲松<sup>1</sup> 黄倩<sup>1,2</sup> 段晓君<sup>3</sup>

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;  
3. 国防科技大学, 湖南 长沙 410073)

## 提 要

利用 GRACE 时变重力位模型反演了 2004 年至 2008 年共 60 个月的全球陆地水存储量变化, 并采用滑动年平均, 对全球陆地水储量的长期性变化情况进行了分析, 同时也推求了全球陆地水储量的季节性变化。研究表明, 使用滑动年平均对 GRACE 重力位模型数据进行处理, 可以较好地揭示全球陆地水储量的长期和季节性变化情况, 其监测能力足以揭示几 cm 的等效水高变化。

主题词: GRACE — 重力卫星 — 水储量

分类号: P223+.4, P343

## 1 引 言

地球重力场是一个反映地球物质分布特性的物理场。它在地球物理学、大地测量学、空间科学、海洋科学等研究领域中考虑的诸多因素中是举足轻重的。地球系统的物质及质量的重新分布会导致地球重力场变化, 其变化反映在一系列的时间尺度上。在几年或更短时间尺度上, 地球重力场的变化主要产生于大气压力、海底压力和陆地水储量的变化<sup>[1~3]</sup>。在这种时间尺度上, 地球重力场的变化主要来源于大气圈、水圈和浅层地下水等物质的迁移和交换过程。研究地球这些圈层的物质迁移, 特别是陆地水储量及其变化信息, 对全球气候变化的研究具有重要的意义。利用多种手段获取的相关信息对于评价和改进全球气候模型, 更好地理解大尺度的水文过程以及指导水资源的管理、抗旱救灾等工作具有重要的作用。

20 世纪 80 年代国外开始研究制定国际卫星重力梯度计划, 经过 30 多年的潜心研究, 卫星重力梯度测量技术已日趋成熟。欧洲空间局和美国宇航局陆续发射了具有测定地球重力场能力的卫星<sup>[4]</sup>。GRACE 是近年来由德国和美国联合开发的计划。GRACE 卫星于 2002 年 3 月成功发射。它采用了两颗低高度(300km ~ 500 km)近极轨小卫星的相互跟踪技术, 两颗卫星间的距离约为 220 km, 其有效载荷包括星载 GPS 测定轨系统、非保守力加速度测量系统以及精密测量两颗卫星之间距离变化的 K 波段微波测距系统。多项新技术的使用, 使得 GRACE 显著地提高了对地球重力场探测的时空分辨率。

详细的误差分析(大气是主要的误差源)表明在季节性时间尺度和几百千米或更大空间

收稿日期: 2009-05-19; 修回日期: 2009-06-03

\* 中国科学院“天文地球动力学方向”百人计划、中俄合作“萤火-1”火星探测工程 VLBI 测控分系统、上海市导航定轨重点实验室、以及国家高新科技 863 计划项目(2007AA12A210, 2008AA12A209)项目资助课题。

尺度上, GRACE 可探测平均水高小于 1cm 的陆地水储量变化, 从而使气象检测成为可能。有不少研究者利用 GRACE 的探测结果开展了地下水变化的检测相关工作。John Wahr, Sean Swenson 等人对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, 且表明利用 GRACE 重力位模型得到的质量反演结果可以得到等效水高 1.5cm 的水变化<sup>[5,6]</sup>; 利用 GRACE 重力位模型, I Velicogna 和 John Wahr 得到了 2002 - 2005 年间南极冰盖的消融变化时间序列, 为全球海平面上升和气候变化的研究提供了参考依据<sup>[7]</sup>; Tapley 对南美的大地水准面高度变化进行了分析<sup>[8]</sup>; Chen J L 等基于重力位模型就反演陆地水储量时滤波半径的选择问题进行了研究, 他还对格陵兰岛的冰盖质量变化进行了相关研究, 证实了格陵兰岛的冰在加速融化<sup>[9,10]</sup>。

本文采用 CSR (Center for Space Research) 公布的 Level-2 数据中的 2004 年至 2008 年共 60 个月的近似月平均时变重力场模型, 对全球陆地水储量的变化进行了反演。这些时变重力位模型数据中, 潮汐影响 (包括海潮、固体潮和地球自转产生的极潮)、非潮汐影响 (包括大气和海洋) 等都已在 GRACE 数据处理过程中被扣除。因此, 除重力位模型的计算误差以及大气和海洋的模型误差外, GRACE 时变重力场反映的是非大气、海洋的质量变化。在季节性或更短的时间尺度上, 反映的主要是陆地水储量的变化<sup>[3]</sup>。本文主要采用了滑动年平均方法以揭示全球陆地水储量的长期变化。研究表明, 使用滑动年平均对 GRACE 重力位模型数据进行处理, 可以较好地揭示出全球陆地水储量的变化情况, 从而为做好科学管理水资源、气象防灾减灾和应对气候变化工作提供可靠证据。

## 2 利用时变重力位模型推求地球表面质量变化的基本原理

地球重力场通常用大地水准面表示, 其球谐系数展开形式为<sup>[5]</sup>:

$$N(\theta, \lambda) = a \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l (\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta). \quad (1)$$

其中,  $a$  为地球半径;  $\theta$  为地心余纬 ( $\theta = 90^\circ -$  地心纬度  $\varphi$ ),  $\lambda$  为地心经度;  $l, m$  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。

地球表面物质运动会引起大地水准面高的变化  $\Delta N$ , 这种变化可以是相对于另一个时间的大地水准面高的变化, 也可以是某一时间的大地水准面高相对于平均大地水准面高的变化。 $\Delta N$  可写成如下形式:

$$\Delta N(\theta, \lambda) = a \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l (\Delta \bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta). \quad (2)$$

其中,  $\Delta \bar{C}_{lm}, \Delta \bar{S}_{lm}$  为相应的大地水准面球谐系数变化, 其表达式可表示为:

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

其中,  $\rho_a = 5517 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  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, 体现地球圈层大气、海洋、冰盖以及地下水所引起的质量变化。

若地球表面变化的物质厚度  $H$  足够小, 使得  $(l_{\max} + 2)H/a \ll 1$ , 即  $r \approx a$ , 这样可以用面密度的变化  $\Delta \sigma(\theta, \lambda)$  代替  $\Delta \rho(r, \theta, \lambda)$ , 两者关系为:

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = \int \Delta\rho(r, \theta, \lambda) dr. \quad (4)$$

表面物质直接引力引起的大地水准面球谐系数变化为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{C}_{lm} \\ \Delta \bar{S}_{lm} \end{array} \right\}_{\text{mass}} = \frac{3}{4\pi a \rho_a (2l+1)} \int \Delta\sigma(\theta, \lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \begin{Bmatrix} \cos(m\lambda) \\ \sin(m\lambda) \end{Bmatrix} \sin\theta d\theta d\lambda. \quad (5)$$

由于固体地球受到物质作用产生形变, 形变引起大地水准面的球谐系数变化为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{C}_{lm} \\ \Delta \bar{S}_{lm} \end{array} \right\}_{\text{deform}} = \frac{3k_l}{4\pi a \rho_a (2l+1)} \int \Delta\sigma(\theta, \lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \begin{Bmatrix} \cos(m\lambda) \\ \sin(m\lambda) \end{Bmatrix} \sin\theta d\theta d\lambda. \quad (6)$$

其中,  $k_l$  为  $l$  阶负荷勒夫数。故, 物质质量分布的变化对大地水准面的贡献为(5)与(6)之和, 有:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{C}_{lm} \\ \Delta \bar{S}_{lm} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{C}_{lm} \\ \Delta \bar{S}_{lm} \end{array} \right\}_{\text{mass}} + \left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{C}_{lm} \\ \Delta \bar{S}_{lm} \end{array} \right\}_{\text{deform}}. \quad (7)$$

如果对表面物质面密度变化做球谐函数展开, 则有:

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = a \rho_w \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l (\Delta C_{lm} \cos m\lambda + \Delta S_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta). \quad (8)$$

其中,  $\rho_w = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  为水密度,  $\Delta\sigma/\rho_w$  为用等效水高表示的物质质量变化, 由上式得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta C_{lm} \\ \Delta S_{lm} \end{array} \right\} = \frac{1}{4\pi a \rho_w} \int_0^{2\pi} d\lambda \int_0^{\pi} \Delta\sigma(\theta, \lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \begin{Bmatrix} \cos(m\lambda) \\ \sin(m\lambda) \end{Bmatrix} \sin\theta d\theta. \quad (9)$$

由(5)、(6)、(7)、(9)式可以得到  $\Delta C_{lm}$ 、 $\Delta S_{lm}$  和  $\Delta \bar{C}_{lm}$ 、 $\Delta \bar{S}_{lm}$  间的关系式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{C}_{lm} \\ \Delta \bar{S}_{lm} \end{array} \right\} = \frac{3\rho_w}{\rho_a} \frac{1+k_l}{2l+1} \left\{ \begin{array}{l} \Delta C_{lm} \\ \Delta S_{lm} \end{array} \right\}; \quad (10)$$

也可写成:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta C_{lm} \\ \Delta S_{lm} \end{array} \right\} = \frac{\rho_a}{3\rho_w} \frac{2l+1}{1+k_l} \left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{C}_{lm} \\ \Delta \bar{S}_{lm} \end{array} \right\}. \quad (11)$$

将(11)式代入(8)式得:

$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = \frac{a\rho_a}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_l} (\Delta \bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{lm} \sin m\lambda). \quad (12)$$

由此得到了时变重力场反演地表质量重新分布的基本方程。

由于重力场模型不可能给出从 0 至无穷所有阶次的位系数而必须截断至一定阶次, 表面密度变化球谐展开的系数也只能计算到截断阶次, 这样就会产生截断误差。另外, 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  $l$  增大而迅速增加且地球物理研究感兴趣的并不是某一点的面密度变化, 而是某一区域的总质量变化。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<sup>[6]</sup>:

$$W(\theta, \lambda, \theta', \lambda') = W(\gamma) = \frac{b}{2\pi} \frac{\exp[-b(1-\cos\gamma)]}{1-e^{-2b}} \quad (13)$$

其中,  $b = \frac{\ln 2}{(1-\cos(r/a))}$ ,  $r$  为平滑半径。该函数  $W(\theta, \lambda, \theta', \lambda')$  仅仅取决于点  $(\theta, \lambda)$  与点  $(\theta', \lambda')$  间的角距  $\gamma$ 。加入高斯平滑算子后的地球表面质量变化反演公式为:

$$\Delta\sigma_{\text{region}} = \frac{2a\rho_a\pi}{3} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} W_l (\Delta \bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta). \quad (14)$$

式中,  $W_l = \frac{1}{2l+1} \int_0^\pi W(\gamma) \bar{P}_{l0}(\cos\gamma) \sin\gamma d\gamma$ , 且  $W_l$  可以通过下面的迭代公式进行计算<sup>[5]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} W_0 &= \frac{1}{2\pi} \\ W_l &= \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1+r^{-2b}}{1-e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right] \\ W_{l+1} &= -\frac{2l+1}{b} W_l + W_{l-1} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

值得注意的是,由于 GRACE 的轨道几何构形对重力场的 J2 项不敏感,因而测得的 J2 项精度较差。在利用 GRACE 逐月重力位模型反演陆地水储量变化过程中,一般将 J2 项去掉或采用由 SLR 观测得到的 J2 项代替<sup>[3]</sup>。

### 3 高斯滤波平滑半径的选取

重力场模型通常把引力位函数截断至一定阶次给出。利用 GRACE 观测发布的位函数截断阶数取至 35 阶次以上,如果不进行滤波则计算结果以条带状噪声为主,无法看到陆地水储量变化的主要特征。进行滤波后阶数取至 20 阶时,陆地水储量变化的主要特征就已变得比较明显,但仍然存在一定的噪声。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<sup>[4]</sup>。另外,考虑到采用高斯滤波,对 2006 年 1-12 月的重力场模型进行

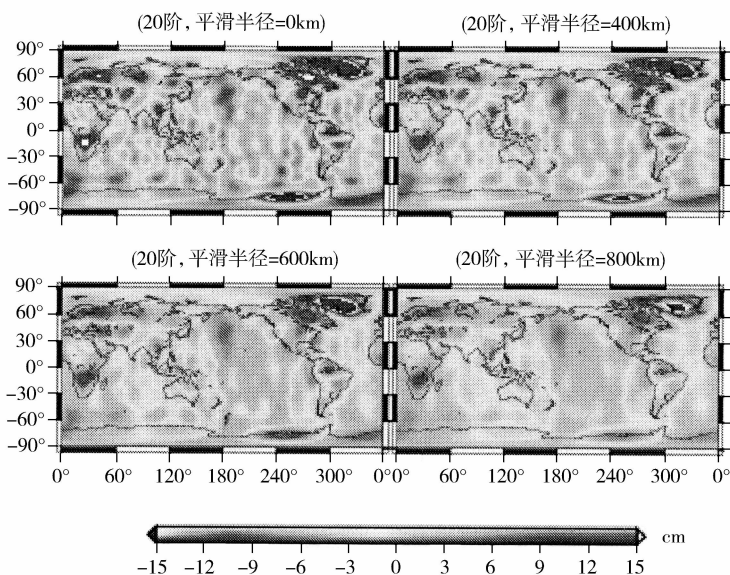


图 1 不同平滑半径的高斯滤波图

Fig. 1 Comparison of Gaussian filtering based on different smoothing radius

了平均计算,并从9月的重力场模型中剔除了该平均值,然后计算得到全球陆地水储量变化。其中,高斯平滑半径分别取为0km、400km、600km、800km,如图1(另可见封面彩图)所示,可以看出使用800km的平滑半径是相对较优的。这时,中大尺度的特征可以较为显著地显现出来。后续的工作也是在此基础上开展的。

## 4 全球陆地水储量变化情况

### 4.1 全球陆地水储量变化的长期趋势

前已述及,除重力位模型的计算误差以及大气和海洋的模型误差外,GRACE时变重力场反映的是非大气、海洋的质量变化。在季节性或更短的时间尺度上,反映的主要是陆地水储量的变化<sup>[3]</sup>。一般来讲,GRACE时变重力场的变化通过球谐系数的变化来体现,球谐系数的变化一般有三种计算方法:一是减去某一年的平均系数值,二是减掉某一静态重力场模型的系数,三是减掉某一月的系数值。很多研究工作采用的是使用每个月的重力位模型减去某一年的平均系数值后,进行陆地水储量的反演。本文采用的方法是减去某一年(2004年)的平均系数值,然后进行滑动年平均,最先选用04年2月至05年1月的平均系数值进行计算,然后依次往后滑动一个月,取年平均后再计算,如此进行至08年12月。

次页中的图2是用滑动年平均方法得到的04至08年全球陆地水储量变化情况。利用GRACE时变重力场反演了全球水储量滑动年平均变化,从图中可以清晰地看到其长期变化。从04年2月至05年1月的年平均系数来看,全球的陆地水储量变化基本为零,这主要因为与04年平均系数相比,仅有一个月的差别,因此变化很小。随着时间的推移,从图上可以看到全球陆地水储量存在着较为明显的长期变化:如在亚洲、欧洲、澳大利亚等地区,陆地水储量表现出逐渐减少的趋势,其中亚洲、欧洲的部分地区陆地水储量减少约5cm,澳大利亚陆地水储量减少约7cm;在格陵兰岛,明显可以看到陆地水储量加速减少的现象,且在这五年中其减少总量达到了15cm左右,在北美洲北部陆地水储量则清晰地表现出逐步增加的趋势,至08年8月,其增加量达12cm左右。

### 4.2 全球陆地水储量的季节性变化

利用UTCSR(University of Texas, Center for Space Research)提供的2004年1月至2008年12月共60个月的月重力场模型推求了全球陆地水储量的季节性变化。在计算中J2项均被去掉,模型截取至20阶,高斯平滑半径为800km,反演结果见第20页中的图3。

图3给出了2005年至2006年共两年的全球陆地水储量季节性变化情况,从图中可以看到陆地水储量的季节性趋势在南美洲的亚马逊流域、亚洲的长江流域、非洲大陆的尼日尔湖、乍得和赞比西河流域以及澳大利亚北部地区表现得较为明显,且在这几个区域南北半球陆地水储量变化趋势相反。以南半球的亚马逊流域、北半球的长江流域为例,在05年1-7月份,长江流域水储量处于减少状态,且在4,5,6月份减少量达到10cm左右,在7,8,9月份长江流域陆地水储量开始呈现增加趋势,在12月以及06年的1,2月份长江流域陆地水储量又呈现减少趋势;亚马逊流域在05年1-7月份陆地水储量处于增加状态,在7,8,9月份开始呈现减少趋势,在10月份左右减少量达到15cm左右,06年的1,2月份其水储量又开始呈现增加趋势。总之,这两个区域的陆地水储量季节性变化趋势分别与其水文季节性变化是相符合的。由此可见,GRACE月重力位模型可以很好地揭示全球陆地水储量的季节性变化。

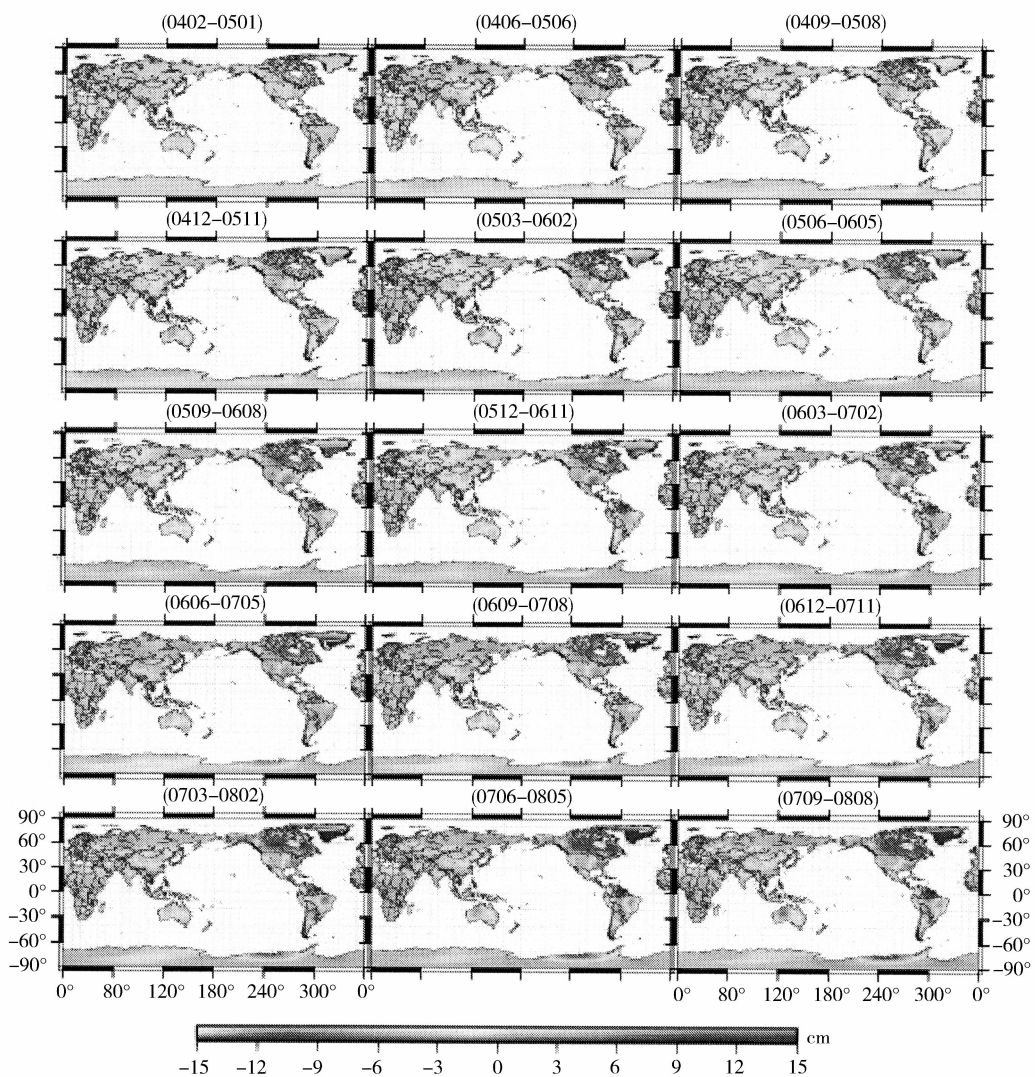


图 2 全球地下水滑动年平均变化图

(图中标示 0402 - 0501 表示从 04 年 2 月至 05 年 1 月,之后的标示依此类推)

Fig. 2 Variation of global continental water using annually smoothing method

The sign 0402 - 0501 indicates that time moves from February 2004 to January 2005, and so on

## 5 小 结

利用 GRACE 时变重力场可以监测全球陆地水储量的变化,其监测能力足以揭示几 cm 的等效水高变化,且滑动年平均方法在大尺度上能较好地显示全球陆地水储量随时间的长期变化情况,因此滑动年平均在揭示全球陆地水储量变化方面是一种有效的分析方法。此外,海洋卫星测高作为全球平均海平面变化监测的重要手段,如果将其与 GRACE 反演水储量变化、海

洋数值模式以及全球水文模型相结合,那么精确的海洋同化模式数据和重力场系数与卫星测高数据进行结合就能更好地估算海水质量分布引起的平均海平面变化,为进一步研究海平面变化提供可靠的依据<sup>[11,12]</sup>。结合卫星测高和 GRACE 卫星观测结果也可以估算海洋膨胀引起的海平面变化,这些工作有待后续进行研究。

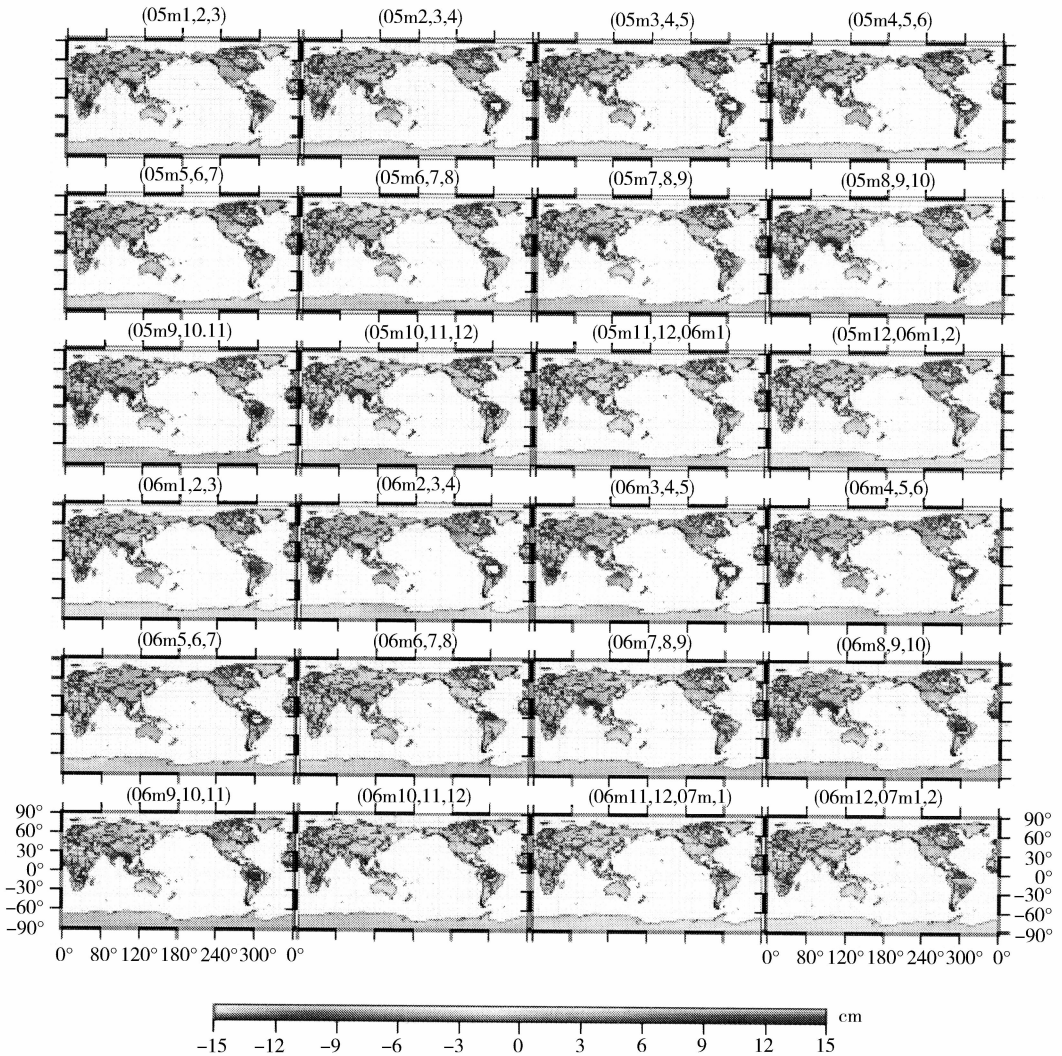


图3 全球陆地水储量的季节性变化

Fig. 3 Seasonal variation of global continental water

The sign 05m1,2,3 indicates that the relative time is from JAN to MAR in 2005, and so on

### 参 考 文 献

- [1] 胡小工等. 中国科学 D 辑, 2006, 36(3): 225 ~ 232
- [2] 朱广彬. 利用 GRACE 位模型研究陆地水储量的时变特征(硕士论文). 北京: 中国测绘科学研究院, 2007

- [3] 朱广彬等. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 8
- [4] 曾华霖. 重力场与重力勘探. 北京: 地质出版社, 2005, 77
- [5] Wahr J, Molenaar M. JGR, 1998, 103(B12): 30205 ~ 30229
- [6] Swenson S, Wahr J. JGR, 2002, 107(B9): 2193
- [7] Velicogna I, Wahr J. Science, 2006, 311: 1754
- [8] Tapley B D *et al.* Science 305, 503 (2004); doi: 10. 1126/science. 1099192
- [9] Chen J L, Wilson C R *et al.* JGR, 2005, 110, B08408, doi: 10. 1029/2004JB003536
- [10] Chen J L *et al.* Science, 2006, 313, doi: 10. 1126/science. 1129007
- [11] 邢乐林等. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(4): 35 ~ 37, 56
- [12] 殷述广等. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(4): 33 ~ 37

## THE SUBTERRANEAN WATER TIME VARIATION IN GLOBAL AREA BY GRACE MISSION

SU Xiao-li<sup>1,2</sup> PING Jin-song<sup>1</sup> HUANG Qian<sup>1,2</sup> DUAN Xiao-jun<sup>3</sup>

- (1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;  
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;  
3. The S&T University of Defense, Changsha 410073)

### Abstract

Based on the global gravity results by GRACE mission, we estimate the 60 months' global subterranean water variation from 2004. We use annually smoothing method to calculate the subterranean water variation in global area, and obtain its longterm and seasonal variations. The result shows that annually smoothing method is an effective way to analyze the variation of subterranean water. The GRACE observation can clearly open out the subterranean water variation even in a relatively small area and find an equivalent water reduce of several cm in thickness in continental area.

**Key words** GRACE — gravity variation — subterranean water