

高春春, 陆洋, 张子占等. 2015. GRACE 重力卫星探测南极冰盖质量平衡及其不确定性. 地球物理学报, 58(3):780-792, doi: 10.6038/cjg20150308.

Gao C C, Lu Y, Zhang Z Z, et al. 2015. Ice sheet mass balance in Antarctica measured by GRACE and its uncertainty. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(3):780-792, doi:10.6038/cjg20150308.

# GRACE 重力卫星探测南极冰盖质量平衡及其不确定性

高春春<sup>1,2</sup>, 陆洋<sup>1\*</sup>, 张子占<sup>1,3</sup>, 史红岭<sup>1,4,5</sup>, 朱传东<sup>1,2</sup>

1 中国科学院测量与地球物理研究所 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 美国德克萨斯大学空间研究中心, 奥斯汀 78759

4 极地测绘科学国家测绘局重点实验室, 武汉 430079

5 地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室, 北京 100830

**摘要** 2002 年 GRACE 重力卫星的成功发射为南极冰盖质量平衡的研究提供了重力探测的新纪元. 本文利用美国德克萨斯大学 CSR 公布的 2003 年 1 月到 2013 年 12 月期间的 RL05 版本 GRACE 月重力场数据, 采用最优平均核函数法和组合滤波法两种 GRACE 后处理方法反演了南极冰盖质量的时空变化. 结果表明: 在 2003—2013 年期间南极冰盖物质平衡呈明显的负增长状态, 质量变化趋势为  $-163 \pm 50$  Gt/a(GW13)、 $-129 \pm 41$  Gt/a(IJ05)、 $-81 \pm 27$  Gt/a(W12a), 加速度为  $-8 \pm 10$  Gt/a<sup>2</sup>, 质量消融的主要区域分布在西南极阿蒙森海岸和南极半岛的北部. 另外本文还重点探讨了可能影响到估算结果的各项误差及不确定性, 分析结果显示影响南极冰盖质量平衡估算结果的最大误差源为 GIA 改正. 通过假设检验和信息准则对时间序列分析中拟合参数的合理选取进行了探讨和分析, 在联合周年项、半年项和 S2、K2、K1 潮汐混频项进行拟合分析时发现 K1 项对拟合结果的加速度影响比其他周期项稍大, 尽管考虑该项的合理性因当前 GRACE 数据时间序列长度有限而无法确切证实, 但 K1 项的影响值得后续关注. 对比两种 GRACE 后处理方法的结果发现: 当采用的数据时间跨度一致, 误差改正方法相同, 两种相异的后处理方法, 其估算结果也具有较好的一致性.

**关键词** 南极冰盖; 质量平衡; GRACE; 不确定性; 后处理方法

doi:10.6038/cjg20150308

中图分类号 P312

收稿日期 2014-03-24, 2015-02-05 收修定稿

## Ice sheet mass balance in Antarctica measured by GRACE and its uncertainty

GAO Chun-Chun<sup>1,2</sup>, LU Yang<sup>1\*</sup>, ZHANG Zi-Zhan<sup>1,3</sup>, SHI Hong-Ling<sup>1,4,5</sup>, ZHU Chuan-Dong<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Center for Space Research, University of Texas at Austin, Austin 78759, USA

4 State Bureau of Surveying and Mapping Key Lab. for Polar Surveying and Mapping Science, Wuhan 430079, China

5 Key Laboratory of Geo-Informatics of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Beijing 100830, China

**Abstract** As a critical component of the cryosphere, the Antarctic Ice Sheet (AIS) has strong

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB733301, 2012CB957703)、国家自然科学基金(41274025, 41174064, 41021003, 40904020)、极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(201204)、地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室资助项目(201307)、国家海洋局极地科学重点实验室开放研究基金(KP201202)、大地测量与地球动力学国家重点实验室自主项目(SKLGED2013-2-2-Z)和中国科学院测量与地球物理研究所重要方向项目(Y309451048)联合资助.

**作者简介** 高春春, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事卫星重力与地球重力场方面研究. E-mail: gaocc@asch.whigg.ac.cn

\* **通讯作者** 陆洋, 男, 1959 年生, 研究员, 主要从事卫星测高、时变重力场与南极冰盖质量平衡等研究. E-mail: luyang@whigg.ac.cn

connection with the sea level change and global climate change. Accurate quantification of the current spatial and temporal mass changes of AIS is very important to improve our understanding and prediction of its response and contribution to global change. The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) mission has provided new and useful observations to detect AIS mass balance since its launch in March 2002. There are significant differences among the GRACE estimates of the total mass change. The big difference is due in part to considerable uncertainty in the accuracy of glacial isostatic adjustment (GIA) signals, and also due to use of different time spans, different versions of GRACE products and different GRACE post-processing methods.

Using 124 monthly GRACE gravity field solutions of Release 5 (RL05) produced at the Center for Space Research (CSR) of the University of Texas, Austin, spanning the interval from January of 2003 through December of 2013, the mass balance of AIS is estimated by two post-processing ways: the optimizing averaging kernel method (also named VW) and the combined filter method (the first step is called P5M11 decorrelation filter to remove correlated noise by fitting and subtracting a fifth-order polynomial to even and odd coefficient pairs at spherical harmonic orders eleven and above, the second involves smoothing with a 250 km Gaussian filter). A detailed error analysis is provided including consideration of leakage-in, leakage-out, and errors in modeling mass variations of the atmosphere, ocean and GIA. In addition, a statistical model selection criterion is employed in computation of trends from mass variation time series, and the impact of K1 tidal alias is analyzed.

The results reveal that during 2003—2013, the total mass of the ice sheet decreased significantly at change rates of  $-163 \pm 50$ ,  $-129 \pm 41$  and  $-81 \pm 27$  Gt/a for three GIA models: GW13, IJ05, W12a. There was a distinct region with mass loss in the Amundsen Sea Embayment of West Antarctic ice sheet and the Northern Antarctic Peninsula, while an increasing mass gain was concentrated in the Dronning Maud Land and the Enderby Land of East Antarctic ice sheet. Furthermore, we use hypotheses testing and information criteria evaluation to select the best trend model fitting together with sinusoidal functions of annual (365.0-d) and semi-annual (181.0-d) signals and the S2 (161.0-d), K1 (2725.4-d) and K2 (1362.7-d) tidal aliases. We found that K1 tidal alias has a potential to falsify the acceleration estimates. Although it is not good enough to confirm the K1 tidal alias based on an eleven-year time-series, the impact of K1 tidal alias deserves further notice. By comparing the quantities of total mass balance computed by the two different processing methods and three different GIA models in the Antarctica, we find that the differences are less than 15 Gt/a between two processing methods, but the largest difference is about 80 Gt/a between different GIA models. The analysis of the uncertainty of GRACE's estimation of AIS mass balance indicates that the largest source of error is the GIA correction.

Our results indicate that during January 2003 to December 2013 the contribution of AIS to sea level rise was about  $+0.34 \pm 0.11$  mm/a. Significant mass loss increases were limited to the basin that contains Pine Island Glacier along the Amundsen Sea coast of West Antarctica. During the analyzed time period, the total mass acceleration was  $-8 \pm 10$  Gt/a<sup>2</sup>, equivalent to  $+0.02 \pm 0.03$  mm/a<sup>2</sup> sea level rise. Results of analysis point to the conclusion that when using a given GRACE data set with same error correction, the differences of total mass changes are not highly dependent on which post-processing strategies to be used but on the different GIA models. Therefore, a more accurate GIA model is the key for determining Antarctic ice mass change from GRACE in the present and future.

**Keywords** Antarctic Ice Sheet; Mass balance; GRACE; Uncertainty; Post-processing method

## 1 引言

全球气候变暖虽仍有争议,但极端天气和气候事件(如:干旱、洪涝、持续高温、雪灾和飓风等)频发,冰川融化及海平面上升,气候变化已经严重威胁着人类的生存环境(IPCC, 2013). 南极冰盖作为地球上最大的大陆冰川,约占全球陆地冰量的90%,淡水总量的70%(Huybrechts et al., 2000),南极冰盖质量平衡与全球海平面和气候变化紧密相关,因此精确评估南极冰盖质量变化具有显著的科学、社会和经济效益(Velicogna and Wahr, 2006).

目前关于南极冰盖质量变化的估算方法主要有四种(丁明虎, 2013),分别为物质平衡法(Rignot et al., 2011; van den Broeke et al., 2006; Arthern et al., 2006; van de Berg et al., 2006)、卫星测高法(Rignot and Thomas, 2002; Rignot et al., 2008; Gunter et al., 2009; Pritchard et al., 2009; Helsen et al., 2008; 史红岭等, 2009, 2011; 沈强等, 2011; 李建成等, 2008)、卫星重力法(Velicogna and Wahr, 2006, 2013; Gunter et al., 2009; Velicogna, 2009; Chen et al., 2009; Sasgen et al., 2012; Jacob et al., 2012; King et al., 2012; Luthcke et al., 2013; 鄂栋臣等, 2009; 贾路路等, 2011; 罗志才等, 2012; 鞠晓蕾等, 2013)和模式模拟法(Turner et al., 1999; van de Berg et al., 2005; Krinner et al., 2007),大部分研究结果显示南极冰盖整体正在呈融化且加速融化的趋势(如:Rignot et al., 2008; Gunter et al., 2009; 史红岭等, 2011; Velicogna and Wahr, 2006, 2013; Gunter et al., 2009; Velicogna, 2009; Chen et al., 2009; Sasgen et al., 2012; Jacob et al., 2012; King et al., 2012; Luthcke et al., 2013; 鄂栋臣等, 2009; 贾路路等, 2011; 罗志才等, 2012; 鞠晓蕾等, 2013). 特别是2002年GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)重力卫星发射以来,其所提供的全球高精度时变重力场为研究南极冰盖质量平衡提供了新的技术手段和方法(即卫星重力法),可以说GRACE卫星为南极冰盖质量变化的研究开辟了重力探测的新纪元.

Velicogna和Wahr(2006)利用2002年4月到2005年8月间的GRACE月重力场模型(共34个月),采用最优平均核函数法估算了南极冰盖的质量变化,结果显示:南极冰盖在上述期间总体消融趋势明显,速率为 $-152 \pm 80 \text{ km}^3/\text{a}$ ,消融主要来

自于西南极,而东南极基本处于稳定状态,其结果最大的不确定性来自于GIA(Glacial Isostatic Adjustment)模型;Chen等(2009)利用2002年4月至2009年1月CSR(Center for Space Research)公布的GRACE RL04月重力场模型(共79个月),采用组合滤波法(去相关P4M6+高斯300 km平滑)估算得出南极冰盖质量变化速率为 $-190 \pm 77 \text{ Gt/a}$ ,其中西南极 $-132 \pm 26 \text{ Gt/a}$ ,东南极 $-57 \pm 52 \text{ Gt/a}$ ,其不确定性主要来源于数据处理过程和GIA模型;Velicogna和Wahr(2013)采用2003年1月到2012年11月间的GRACE RL05月重力场模型(共114个月),基于最优平均核函数法估算出南极冰盖在上述期间质量变化速率为 $-83 \pm 49 \text{ Gt/a}$ (IJ05\_R2模型)、 $-147 \pm 80 \text{ Gt/a}$ (ICE5G模型),西南极的东南沿海区域和南极半岛有加速消融趋势,文中不仅对不同处理中心的数据进行了比较分析,同时还对可能影响结果的各项误差和不确定性作了详细系统的分析和归纳.Luthcke等(2013)利用GRACE 2003年12月到2010年12月L1 K波段数据,基于全球迭代Mascon(mass concentration)法得到南极冰盖质量消融的年变化趋势为 $-81 \pm 26 \text{ Gt/a}$ ,其中东南极 $63 \pm 28 \text{ Gt/a}$ ,西南极 $-106 \pm 16 \text{ Gt/a}$ ,南极半岛 $-38 \pm 14 \text{ Gt/a}$ .国内方面,鄂栋臣等(2009)利用2002年7月到2007年9月GRGS(Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale)公布的EIGEN-GL04重力场数据估算了南极冰盖质量变化,速率为 $-78 \pm 37 \text{ Gt/a}$ ,其中西南极 $-75 \pm 50 \text{ Gt/a}$ ,东南极 $-3 \pm 46 \text{ Gt/a}$ ;罗志才等(2012)采用2002年8月到2010年6月CSR公布的RL04月重力场模型(共94个月),利用组合滤波法(去相关P3M6+扇形300 km平滑)估算南极冰盖质量变化速率为 $-80 \text{ Gt/a}$ ,南极冰盖2006—2010年相比2002—2005年有明显的加速消融趋势;鞠晓蕾等(2013)利用CSR、GFZ(GeoForschungs Zentrum)、JPL(Jet Propulsion Laboratory)最新公布的RL05版本GRACE数据采用组合滤波法(P5M11+扇形300 km平滑)估算了2004—2012年南极冰盖质量变化速率分别为 $-195.7 \pm 20.5 \text{ Gt/a}$ 、 $-133.2 \pm 29.9 \text{ Gt/a}$ 、 $-203.8 \pm 23.1 \text{ Gt/a}$ ,并对质量变化显著地区的特征点进行了详细的时间序列分析.

本文利用最优平均核函数法和组合滤波法两种GRACE后处理方法,处理CSR公布的RL05版本GRACE月重力场模型(2003年1月至2013年12月),处理过程中考虑一系列误差改正如:加入一

阶项、替代 C20 项、GIA 改正、泄漏误差改正等,并引入新的外泄漏改正方法——频域迭代恢复法以提高估算结果的空间分辨率,同时重点分析 GRACE 数据处理过程中可能影响冰盖质量平衡结果的各种误差特性及改正评估方法,以及探讨时间序列分析中拟合参数的合理选取方法,并对南极冰盖质量变化及其时空分布特征和趋势进行详细讨论与分析。

## 2 反演理论与数据处理方法

### 2.1 时变重力场的反演理论

根据 Wahr 等(1998)的理论,GRACE 时变重力场模型能够反演得到地球表面质量薄层上任意一点的面密度变化:

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

其中,  $\theta$  和  $\phi$  分别为地心余纬和东经,  $a$  为地球平均半径,  $\rho_{\text{ave}}$  为地球平均密度,  $l$  和  $m$  为阶和次,  $\tilde{P}_{lm}$  为正规化的连带勒让德函数,  $k_l$  为载荷勒夫(Love)数,  $\Delta C_{lm}$  和  $\Delta S_{lm}$  分别为时变重力场模型的无量纲正规化球谐系数。

质量变化的结果通常以等效水柱高  $H_w(\theta, \phi)$  表示:  $H_w(\theta, \phi) = \Delta\sigma(\theta, \phi)/\rho_w$ , 其中  $\rho_w$  为水密度。

### 2.2 GRACE 数据及预处理

本文采用的 GRACE 数据为 CSR 公布的 2003 年 1 月到 2013 年 12 月期间(共 124 个月)的 Level-2(RL05 版本)月重力场模型数据,其中 2003.06、2011.01、2011.06、2012.05、2012.10、2013.03、2013.08、2013.09 月份数据缺失,所有月重力场模型球谐系数截断到 60 阶,并且扣除了非潮汐大气、高频海洋信号、各种潮汐、固体潮和固体极潮等的影响(Bettadpur, 2007)。受 GRACE 卫星轨道设计的制约,模型中球谐系数 C20 项解算精度较低(Tapley et al., 2004),因此由 SLR(Satellite Laser Ranging)所解算的 C20 项所替代(Cheng and Tapley, 2004)。GRACE 无法解算球谐系数的一阶项,本文加入 Swenson 等(2008)计算的地心改正项(即一阶项)。由于我们研究的对象是地球表层质量的变化,因此需将所有球谐系数扣除上述时间段的平均值(Wahr et al., 1998)。

### 2.3 计算方法

理论上,根据公式(1)可以得出地球表面任意

一点的面密度变化,然而研究人员往往感兴趣的是某个区域的质量变化(例如:本文感兴趣的是南极地区)。GRACE 任务 K 波段测距的设计特点会造成测距系统对南北方向的重力变化相比东西方向更为敏感,使卫星脚点有了明显的不对称性误差,此外,在月数据采集期内,卫星轨迹覆盖并不理想(特别是赤道地区),再加上卫星仪器的测量误差和时间解算的混频误差等,导致目前利用 GRACE 观测数据恢复的时变重力场高阶系数中存在显著的南北方向“条带(stripes)”误差(Swenson and Wahr, 2006)。为了从 GRACE 时变重力场中提取有效的局部区域质量变化,需要采用合适的方法进行处理。

本文采用“最优平均核函数法”和“组合滤波法”两种处理方案来估算南极冰盖质量平衡,最优平均核函数法可以估算南极冰盖质量变化的时间序列,组合滤波法既可以估算冰盖质量变化的时间序列又可以得出冰盖质量变化的空间分布。

#### 2.3.1 最优平均核函数(VW)法

最优平均核函数法最早是由 Swenson 和 Wahr(2002)、Swenson 等(2003)提出,用于从 GRACE 时变重力场提取区域质量变化信号,随后 Velicogna 和 Wahr(2006)将其用于冰盖质量平衡的估算中,因此该方法也简称为 VW 法(Velicogna and Wahr, 2013)。最优平均核函数法根据高斯平滑压制时变重力场球谐系数高阶误差时,泄漏误差会随之增加的矛盾而设计,是基于最小二乘原理实现区域信号提取的总误差最小化。首先,定义一个完全(Exact)平均核函数(见图 1a),在南极内为 1,南极外为 0,即

$$\vartheta(\theta, \phi) = \begin{cases} 0, & \text{南极外} \\ 1, & \text{南极内} \end{cases} \quad (2)$$

那么,南极内的平均面密度变化为:

$$\Delta\bar{\sigma}_{\text{Antarctica-Exact}} = \frac{1}{\Omega_{\text{Antarctica}}} \int \Delta\sigma(\theta, \phi) \vartheta(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi, \quad (3)$$

式中  $\Omega_{\text{Antarctica}}$  为南极区域的角面积:  $\Omega_{\text{Antarctica}} = \text{南极面积}/a^2$ 。

将式(1)代入式(3)得:

$$\Delta\bar{\sigma}_{\text{Antarctica-Exact}} = \frac{a\rho_{\text{ave}}}{3\Omega_{\text{Antarctica}}} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} (\vartheta_{lm}^C \Delta C_{lm} + \vartheta_{lm}^S \Delta S_{lm}), \quad (4)$$

其中  $\vartheta_{lm}^C$  和  $\vartheta_{lm}^S$  为完全平均核函数  $\vartheta(\theta, \phi)$  的球谐展开系数。

由于 GRACE 重力场模型系数误差随阶数的增

加而迅速增大, 导致信号误差较大, 因此 Wahr 等 (1998) 提出了利用高斯滤波来进行平滑, 其中高斯平滑函数:

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

式中,  $\gamma$  为两点  $(\theta, \phi)$  和  $(\theta', \phi')$  之间的夹角,  $\cos\gamma = \cos\theta\cos\theta' + \sin\theta\sin\theta'\cos(\phi - \phi')$ ,  $b = \ln 2 / (1 - \cos(r/a))$ ,  $r$  为平滑半径.

将高斯平滑函数级数展开, 得到:

$$W_l = \frac{1}{\sqrt{2l+1}} \int_0^\pi W(\gamma) \tilde{P}_l(\cos\gamma) \sin\gamma d\gamma, \quad (6)$$

$W_l$  可以通过迭代计算:

$$W_0 = \frac{1}{2\pi}, W_1 = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right], \quad (7)$$

$$W_{l+1} = -\frac{2l+1}{b} W_l + W_{l-1}.$$

经过推算得出高斯(Gaussian)平均核函数(见图 1b)的球谐展开系数为:

$$\begin{Bmatrix} W_{lm}^C \\ W_{lm}^S \end{Bmatrix} = 2\pi W_l \begin{Bmatrix} \mathcal{G}_{lm}^C \\ \mathcal{G}_{lm}^S \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

那么由高斯平均核函数得出的南极平均面密度变化为:

$$\Delta\bar{\sigma}_{\text{Antarctica-Gaussian}} = \frac{a\rho_{\text{ave}}}{3\Omega_{\text{Antarctica}}} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} (W_{lm}^C \Delta C_{lm} + W_{lm}^S \Delta S_{lm}). \quad (9)$$

虽然高斯平均核函数能够有效减少 GRACE 重力场的高阶误差, 但是随着平滑半径增大区域内质量变化信号的泄漏误差会随之增加, 为了克服这一矛盾, Swenson 和 Wahr(2002)、Swenson 等(2003) 基于最小二乘原理设计了最优(Optimizing)平均核函数(见图 1c), 其球谐展开系数为:

$$\begin{Bmatrix} \tilde{W}_{lm}^C \\ \tilde{W}_{lm}^S \end{Bmatrix} = \left[ 1 + \frac{2K_l^2 B_l^2}{\sigma_0^2 G_l (2l+1)} \right]^{-1} \begin{Bmatrix} \mathcal{G}_{lm}^C \\ \mathcal{G}_{lm}^S \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

其中,  $K_l = \frac{a\rho_{\text{ave}}}{3} \frac{2l+1}{1+k_l}$ ,  $B_l^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{m=0}^l [(\Delta\delta_{lm}^C(t_i))^2 + (\Delta\delta_{lm}^S(t_i))^2]$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $\Delta\delta_{lm}^C(t_i)$  和  $\Delta\delta_{lm}^S(t_i)$  为 GRACE 时变重力场中的测量误差 (Swenson et al., 2003),  $\sigma_0^2$  为信号方差,  $G_l$  为信号协方差函数  $G(\gamma, d)$  的展开系数,  $G(\gamma, d)$  可以采用高斯或指数形式, 其依赖于半波长  $d$ , 通过迭代法可以确定合适的  $\sigma_0^2$  和  $d$  (Swenson and Wahr, 2002).

那么由最优平均核函数得出的南极平均面密度变化为:

$$\Delta\bar{\sigma}_{\text{Antarctica-Optimizing}} =$$

$$\frac{a\rho_{\text{ave}}}{3\Omega_{\text{Antarctica}}} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} (\tilde{W}_{lm}^C \Delta C_{lm} + \tilde{W}_{lm}^S \Delta S_{lm}). \quad (11)$$

### 2.3.2 组合滤波法

受 GRACE 观测及背景模型的时空分辨率和精度等因素制约, 目前恢复的时变重力场高阶球谐系数存在较大噪声和“条带”误差, 无法直接应用. 为了消除上述误差, 国内外采用的方法主要有高斯平滑 (Wahr et al., 1998), 扇形平滑 (Zhang et al., 2009), “去相关”滤波 (Swenson et al., 2006; 詹金刚等, 2011; Duan et al., 2009), “近似去相关”滤波 (Kusche, 2007) 以及组合滤波法 (Chen et al., 2009; 罗志才等, 2012; 冯伟等, 2012). 由于单一滤波方法具有一定局限性, 目前通常采用组合滤波法 (Chen et al., 2009; 罗志才等, 2012), 基于南极地区卫星轨道密集空间分辨率较高的特性, 通过大量试算和比较, 本文采用组合滤波法(去相关滤波 P5M11+250 km 高斯平滑)进行数据处理. 采用组合滤波法不仅能得出冰盖质量变化的空间分布特征, 还可以得出冰盖质量变化的时间序列, 从而与最优平均核函数法的结果进行比较验证.

## 3 误差改正与分析

由于 GRACE 卫星测量技术的局限性和不确定性, GRACE 时变重力场估算的南极质量变化不可避免的存在着误差. 这些误差可以归纳为四大类 (Velicogna and Wahr, 2013): ①垂直方向非冰盖质量变化信号引起的误差, 如: GIA 误差、大气误差; ②水平分辨率不足引起的误差, 如: 泄漏误差; ③时间分辨率有限引起的误差, 如: 混频(aliasing)误差; ④GRACE 月时变重力场模型的测量误差.

### 3.1 GIA 改正

GIA 主要是指黏弹地球对末次冰退期和冰进期地表冰和海水负荷改变的响应, 伴随着冰退, 地表负荷的强烈变化打破了地球的平衡构形, 不仅引起地球表面的变形和海平面的变化, 而且导致地球内部密度的调整, 进而引起全球重力场的变化 (贾路路等, 2011; Wang and Hu, 2006). 由于 GRACE 在垂直方向无法分辨质量变化是来自地球表面还是地球内部, 由 GRACE 估算南极冰盖质量变化需要扣除南极的 GIA 信号. GIA 信号对 GRACE 估算南极冰盖质量变化的结果影响十分显著 (Velicogna and Wahr, 2006), 然而目前对冰盖历史变化和地

幔黏滞度结构缺乏足够的认识, 现有的 GIA 模型不可避免存在着很大的误差和不确定性 (Velicogna and Wahr, 2013). 因此本文采用三个 GIA 模型分别进行估算, 两个南极局部模型: W12a (Whitehouse, 2012a, 2012b)、IJ05 (Ivins and James, 2005) 和一个全球模型: GW13 (Geruo et al., 2013) (见图 2), 其中 GW13 模型是 Geruo 等 (2013) 基于 ICE5G 冰负荷模型 (Peltier, 2004) 和 VM2 黏度剖面利用 3D 有限元计算所得. 局部模型南极外无数据地区由全球模型替代, 将模型球谐展开到 60 阶并从 GRACE 球谐系数中扣除:

$$\begin{cases} \Delta C_{lm}^{\text{after}} \\ \Delta S_{lm}^{\text{after}} \end{cases} = \begin{cases} \Delta C_{lm}^{\text{GRACE}} \\ \Delta S_{lm}^{\text{GRACE}} \end{cases} - \frac{d_{t_i} - d_{t_{\text{ref}}}}{365.25} \begin{cases} \Delta C_{lm}^{\text{GIA}} \\ \Delta S_{lm}^{\text{GIA}} \end{cases}, \quad (12)$$

其中,  $d_{t_i} - d_{t_{\text{ref}}}$  为距离参考时间的天数.

### 3.2 泄漏误差改正

GRACE 卫星轨道高度约为 450km, 这样造成卫星对重力场的短波信息相对不敏感, 这一局限性导致 GRACE 时变重力场空间分辨率有限, GRACE 时变重力场球谐系数截断到 60 阶. 球谐截断以及 GRACE 后处理滤波技术会导致冰盖质量估算结果产生偏离: 一方面南极区域外的非冰盖质量变化信号会泄漏到南极冰盖内, 形成内泄漏 (leakage-in) 误差; 另一方面南极区域内的冰盖质量变化信号会削弱或泄漏到区域外, 造成外泄漏 (leakage-out) 误差, 两者统称为泄漏误差.

内泄漏误差主要来源于冰盖以外的陆地水文信号、非潮汐的海洋质量变化以及冰盖附近冰帽等的质量变化, 另外由于南极冰盖位于地球极轴且面积较大, 一阶项的缺失对泄漏影响很大 (Velicogna and Wahr, 2013), 因此在 GRACE 数据预处理中加入一阶项能有效降低泄漏影响. 对于南极冰盖外的陆地水文信号泄漏采用 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 模型 (Rodell et al., 2004) 进行改正, 该模型得到的陆地水质量变化与 GRACE 有很好的一致性 (Syed et al., 2008), 将 GLDAS 模型球谐展开到与 GRACE 时变重力场系数同阶次, 并采用 GRACE 数据相同的后处理方法, 由于 GLDAS 原模型中南极地区没有数据, 故处理后南极地区的质量变化即为陆地水文泄漏 (罗志才等, 2012), 从 GRACE 结果中扣除; 非潮汐的海洋质量变化主要包含海洋环流和海洋与大陆、海洋与冰盖之间水交换引起的质量变化 (Velicogna and Wahr, 2013), 海洋环流 GRACE 数据在公布前已采用 OMCT (Ocean Model for Circulation and

Tides) 模型 (Thomas, 2002) 扣除, 海洋与冰盖之间的质量交换较为复杂, 冰盖融化的水进入海洋会引起海面地形的变化, 但由于重力等作用冰盖周围的海平面并不是升高反而是下降即形成所谓的“指纹”效应, 本文采用自洽方法进行改正 (Tamisiea et al., 2001); 南极冰盖外围的冰川冰帽等质量变化产生的泄漏因缺乏相关的独立数据因此无法分离, 所以冰盖的最终估算结果包含了这一部分.

GRACE 卫星空间分辨率的限制以及 GRACE 数据后处理等原因会导致南极区域内冰盖质量变化信号损失和泄漏到区域外, 从而使计算结果出现偏差, 这种偏差称之为外泄漏. 外泄漏误差改正需要根据 GRACE 数据处理方法的不同而进行相应的信号恢复, 对于平均核函数方法本文采用尺度因子 (Velicogna and Wahr, 2006) 进行外泄漏误差改正, 对于组合滤波法本文利用频域迭代恢复法 (Zhang et al., 2013) (见图 3) 和尺度因子相结合的方法进行外泄漏改正. 尺度因子的计算过程如下: ①在南极地区平铺 10 mm/a 的等效水柱高变化; ②选取与 GRACE 数据时间相同的 GLDAS 模型数据进行时间序列分析得出趋势项; ③将第一步生成的模拟数据与第二步生成的趋势项合并, 然后展开为与 GRACE 重力场模型阶次相同的球谐系数; ④利用第三步生成的球谐系数采用与 GRACE 数据相同的最优平均核函数和组合滤波法计算得出南极地区的平均面密度变化; ⑤由 10 mm/a 除以第四步计算所得的平均面密度变化即可得出尺度因子. 最优平均核函数和组合滤波法计算所得的尺度因子分别为 1.47 和 1.44. 表 1 给出了两种后处理方法分别计算的内泄漏和外泄漏改正量, 其中内泄漏是需要从结果中扣除, 而外泄漏是需要加回, 由于组合滤波法采用了迭代恢复法, 故内泄漏改正结果大于最优平均核函数法.

### 3.3 误差估算

本文对上述四类误差分别进行了估算: ① GIA 模型误差: W12a 模型误差由模型公布的最低最高界限值计算所得, GW13 和 IJ05 模型误差取总量级

表 1 泄漏误差的影响

Table 1 Effect of leakage errors

改正	最优平均核函数法		组合滤波法	
	趋势 (Gt/a)	加速度 (Gt/a <sup>2</sup> )	趋势 (Gt/a)	加速度 (Gt/a <sup>2</sup> )
内泄漏	11	-1	12	-1
外泄漏	-3	-1	-13	-3

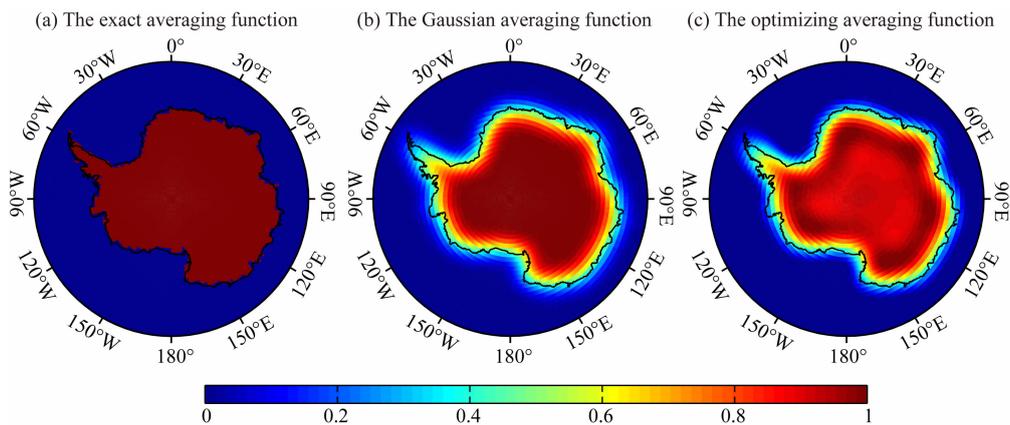


图 1 用于估算南极冰盖总体质量变化的平均核函数

(a)完全; (b)高斯; (c)最优.

Fig. 1 The averaging function used to estimate the change in total Antarctic mass

(a) Exact; (b) Gaussian; (c) Optimizing.

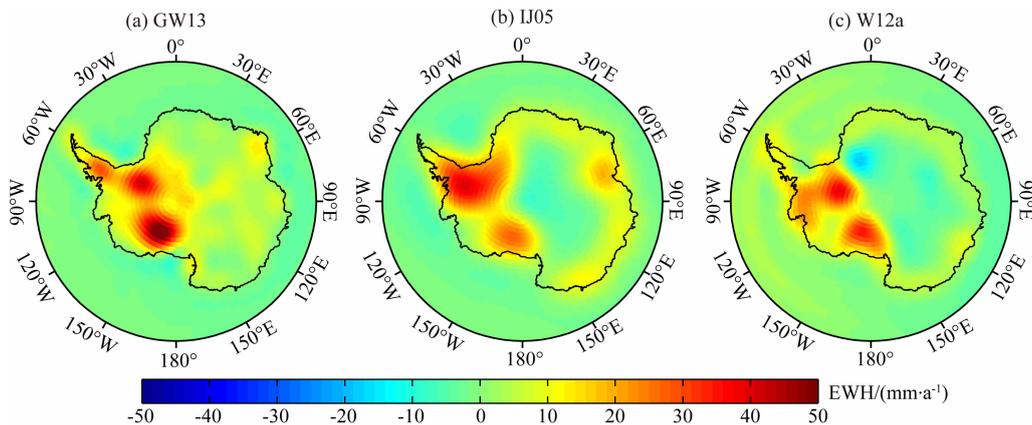


图 2 南极 GIA 影响(等效水柱高, EWH)

Fig. 2 Antarctic GIA effect (equivalent water height, EWH)

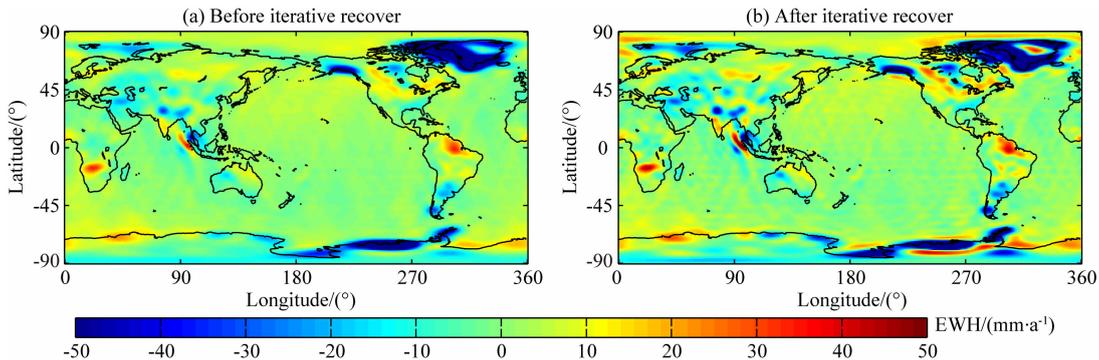


图 3 GRACE 反演的 2003 年 1 月至 2013 年 12 月全球等效水柱高变化

(a) 频域迭代恢复前; (b) 频域迭代恢复后.

Fig. 3 The equivalent water height change over global from GRACE for the period

between January of 2003 and December of 2013

的 30%; ②GLDAS 陆地水文、OGCM 海洋环流和大气模型的误差目前无法精确评估, 本文假设其误差为模型总量级的 100%; ③GRACE 月重力场模型的测量误差由 Wahr 等(2006)提供的方法进行估

算; ④GRACE 数据解算月重力场模型时已经扣除大气和非潮汐海洋等背景信号, 但这些扣除的背景模型本身具有误差, 与重力信号发生混频的称之为混频误差, 其中 161 天的 S2、3.7 年的 K2 和 7.5 年

的 K1 等潮汐混频项会影响冰盖质量平衡的估算结果(Ray and Luthcke, 2006), 通过对拟合中是否加入上述周期项进行比较, 从而估算出混频误差; ⑤由于南极地区缺乏足够的先验信息, 尺度因子的误差无法进行有效估计, 本文假设尺度因子误差也为其量级的 100%; ⑥将上述误差采用最优平均核函数法和组合滤波法统一归算到年变化趋势和加速度并求出总和, 结果列于表 2。

表 2 误差估算结果

Table 2 The results of error estimation

误差源	最优平均核函数法		组合滤波法	
	趋势 (Gt/a)	加速度 (Gt/a <sup>2</sup> )	趋势 (Gt/a)	加速度 (Gt/a <sup>2</sup> )
GIA	±44(GW13)	—	±44(GW13)	—
	±34(IJ05)	—	±34(IJ05)	—
	±12(W12a)	—	±12(W12a)	—
陆地水文泄漏	±6	±2	±6	±2
大气和海洋环流	±17	±2	±18	±2
月重力场模型	±15	±9	±14	±8
混频	±2	±1	±2	±1
尺度因子	±3	±1	±3	±1
总和	±50(GW13)	—	±50(GW13)	—
	±41(IJ05)	±10	±42(IJ05)	±9
	±27(W12a)	—	±27(W12a)	—

## 4 南极冰盖质量平衡结果

### 4.1 时间序列分析

由 GRACE 时变重力场资料, 采用上述两种后处理方法经过一系列误差改正即可得到南极冰盖质量变化的时间序列, 但为了估算质量变化的趋势, 还需要对时间序列进行多项式拟合, 其趋势拟合模型(Baur, 2012)为:

$$y(\Delta t_i) = \sum_{j=0}^N x_j \Delta t_i^j + \sum_{k=1}^M \left[ C_k \cos(2\pi f_k \Delta t_i) + S_k \sin(2\pi f_k \Delta t_i) \right] + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中,  $y(\Delta t_i)$  为  $t_i$  时的剩余质量,  $\Delta t_i = t_i - t_{\text{ref}}$ ,  $t_i$  为时间点,  $t_{\text{ref}}$  为参考时间,  $x_j (j = 0, \dots, N)$  为待估多项式系数,  $C_k, S_k (k = 1, \dots, M)$  分别为待估的余弦、正弦振幅,  $f_k$  为频率,  $\varepsilon_i$  为误差项。

公式(13)中总共有  $N + 1 + 2M$  个未知参数需要通过最小二乘原理(即  $\varepsilon_i$  平方和最小)进行估算, 待估参数选取的不同对南极冰盖质量变化的趋势估

算也有很大影响(Baur, 2012)。回归参数  $x_j$  的选取是通过假设检验和信息准则 AIC (Akaike Information Criterion) 和 BIC (Bayesian Information Criterion) 进行评估确定(Baur, 2012)。假设检验可以判断回归参数选取的统计显著性, 作原假设  $H_0: x_j = 0$ , 设置置信区间为 95%, 置信水平  $\alpha = 5\%$ , 那么可以通过 t 检验和 F 检验判断是否拒绝  $H_0$ , 从而检验参数  $x_j (j = 1, 2, 3, 4, \dots)$  回归效果是否显著。信息准则是根据后验概率大小进行最优选择的一种决策方法。假设检验和信息准则的计算模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_j = \frac{\hat{x}_j}{\hat{\sigma}_{x_j}} \sim t_{1-\frac{\alpha}{2}}(d), F_j = \frac{Q_{j-1} - Q_j}{Q_j/d} \sim F_{1-\alpha}(1, d) \\ \text{AIC} = n \ln(\hat{\sigma}^2) + 2c, \text{AIC}_c = \text{AIC} + \frac{2c(c+1)}{n-c-1}, \\ \text{BIC} = n \ln(\hat{\sigma}^2) + c \ln n \end{array} \right. \quad (14)$$

式中,  $\hat{x}_j$  为估算的回归参数值,  $\hat{\sigma}_{x_j}$  为参数的标准差,  $d$  为自由度,  $Q_j$  为残差平方和,  $\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y(\Delta t_i) - \hat{y}(\Delta t_i)]^2$ ,  $c = N + 2$ 。

通过假设检验和信息准则(信息准则通常以  $\Delta \text{IC} = \text{IC} - \min(\text{IC})$  最小作为最优选择)可以确定  $N = 2$  (即二项式拟合)为南极地区质量变化时间序列的最佳拟合模型(见表 3), 其中 t 检验同时支持线性和二项式拟合, F 检验和信息准则确定二项式拟合为最优选择。

表 3 回归参数选择的统计评价结果

Table 3 Results of regression parameter selection criteria evaluation

多项式系数	$\Delta \text{AIC}$	$\Delta \text{AIC}_c$	$\Delta \text{BIC}$	t 检验	F 检验
$x_0, x_1$	15.12	14.95	12.30	显著	不显著
$x_0, x_1, x_2$	0	0	0	显著	显著
$x_0, x_1, x_2, x_3$	1.52	1.73	4.34	不显著	不显著

此外, 周期项  $1/f_k$  则依据 Ray 等(2006)、Velicogna 和 Wahr (2013)等的研究结论进行选取, 包括周年项、半年项、161 天的 S2 潮汐混频项、1362.7 天的 K2 潮汐混频项和 2725.4 天的 K1 潮汐混频项。表 4 给出了上述周期和混频项对趋势和加速度的影响, 其中周期项对趋势估算的影响并不大, 仅有 0~1 Gt/a, 对加速度估算的影响只有 K1 项稍大, 影响达到 3 Gt/a, 而其他项则只有 0~1 Gt/a。图 4a 给出了加入 K1 项前后拟合曲线的变

化,其中冰盖质量变化的时间序列(未扣 GIA)由组合滤波法计算所得(见图 4 蓝线),图 4b—4d 给出了考虑 K1 项前后加速度空间分布及其差值,可以看出:K1 项主要对恩德比地(Enderby Land)、马里伯德地(Marie Byrd Land)和南极半岛北部格雷厄姆地(Graham Land)的加速度值有较大影响.但根据 Nyquist 抽样定理,仅有 11 年的 GRACE 时间序列考虑约 7.5 年的 K1 项并不是十分可靠,因此 K1 项的影响仍需后续数据进一步观察研究.

表 4 不同周期项对南极冰盖质量变化率的影响  
(2003-01—2013-12, 未扣 GIA)

Table 4 The impacts of Antarctica mass change from different co-estimated sinusoids (2003-01—2013-12, before GIA correction)

拟合项	趋势 (Gt/a)	加速度(Gt/a <sup>2</sup> )
二项式拟合	-6	-13
+周年项	-7	-13
+半年项	-8	-12
+S2 项	-8	-12
+K2 项	-9	-12
+K1 项	-10	-9

#### 4.2 南极冰盖质量变化(2003-01—2013-12)

本文利用 2003 年 1 月至 2013 年 12 月 CSR 公布的 RL05 版本 GRACE 时变重力场数据,采用上述最优平均核函数法和组合滤波法,并经过一系列误差改正,最后估算出南极冰盖质量变化的时间序列(见图 5),通过统计学方法确定最佳拟合模型后进行时间序列分析,获得质量变化的年趋势和加速度变化率(见表 5).从图 5 和表 5 可以看出:①两种 GRACE 后处理方法的计算结果都显示南极冰盖近十年来质量消融明显;②两种差异很大的计算方法,结果却相差不大,不仅相互验证了计算方法的可靠性,而且表明不同的 GRACE 处理方法对冰盖质量平衡估算结果影响并不大;③不同的 GIA 模

表 5 南极冰盖质量变化速率的趋势和加速度值  
(2003-01—2013-12)

Table 5 The trends and accelerations of mass change for Antarctica (January 2003 to December 2013)

GIA	最优平均核函数法		组合滤波法		平均值	
	趋势 (Gt/a)	加速度 (Gt/a <sup>2</sup> )	趋势 (Gt/a)	加速度 (Gt/a <sup>2</sup> )	趋势 (Gt/a)	加速度 (Gt/a <sup>2</sup> )
GW13	-156±50		-169±50		-163±50	
IJ05	-123±41	-6±10	-136±42	-9±9	-129±41	-8±10
W12a	-74±27		-88±27		-81±27	

型改正,结果最大相差 2 倍之多,说明 GRACE 探测南极冰盖质量平衡最大的不确定因素是 GIA 改正,南极 GIA 模型的准确与否对冰盖质量平衡的精确估算至关重要;④将两种方法得出的结果进行数值平均,得出南极冰盖质量年变化趋势为 $-163 \pm 50$  Gt/a(GW13)、 $-129 \pm 41$  Gt/a(IJ05)、 $-81 \pm 27$  Gt/a(W12a),加速度为 $-8 \pm 10$  Gt/a<sup>2</sup>.

为了更好了解南极冰盖质量消融的区域分布,图 6 给出了由组合滤波法估算的 2003 年 1 月至 2013 年 12 月南极冰盖质量年变化趋势和加速度的空间分布图,可以看出:①虽然不同的 GIA 改正导致结果数量级上差异较大,但空间分布形态上差异不大;②南极冰盖质量消融最大的区域集中在南极半岛和西南极阿蒙森(Amundsen)海岸的松岛(Pine Island)以及特怀特(Thwaites)冰川周围,并且消融有加速趋势;③东南极的 Totten、Ninnes 和 Mertz 冰川也有明显的消融趋势,但消融量相比南极半岛和西南极阿蒙森海岸明显较小;④东南极的毛德皇后地(Queen Maud Land)和恩德比地有显著的质量增加且呈加速趋势,据 Boening 等(2012)分析,质量增加主要来源于 2008—2009 年突增的降雪;⑤在紧邻阿蒙森海岸消融区南部和横贯南极山脉(Transantarctic Mountains)北部之间的区域出现了明显的质量增加趋势,质量增加可能是由于 Kamb 冰流受阻滞增厚所引起(史红岭等,2009);⑥西南极阿蒙森海岸和东南极威克斯地海岸冰质量呈现加速消融状态,而毛德皇后地以及南极内陆的广大地区质量却呈加速增加状态(图 6d);⑦由于冰架漂浮于海上,冰架本身的质量变化 GRACE 并不能直接探测到,理论上在扣除海洋大气质量变化信号,GRACE 在冰架地区监测到的质量变化信号应该就是 GIA 信号,因此扣除 GIA 后 Ross 冰架显示的质量减小信号很有可能是 GIA 或海洋大气信号的误差所造成.

## 5 讨论与结论

本文采用 CSR 公布的 2003 年 1 月至 2013 年 12 月 RL05 版本 GRACE 月重力场模型,通过一系列误差改正和时间序列分析,最终得出南极冰盖质量变化趋势为 $-163 \pm 50$  Gt/a(GW13)、 $-129 \pm 41$  Gt/a(IJ05)、 $-81 \pm 27$  Gt/a(W12a),三者平均为 $-124 \pm 39$  Gt/a,对应的全球海平面升高速率为 $0.34 \pm 0.11$  mm/a,南极冰盖质量变化的加速度为

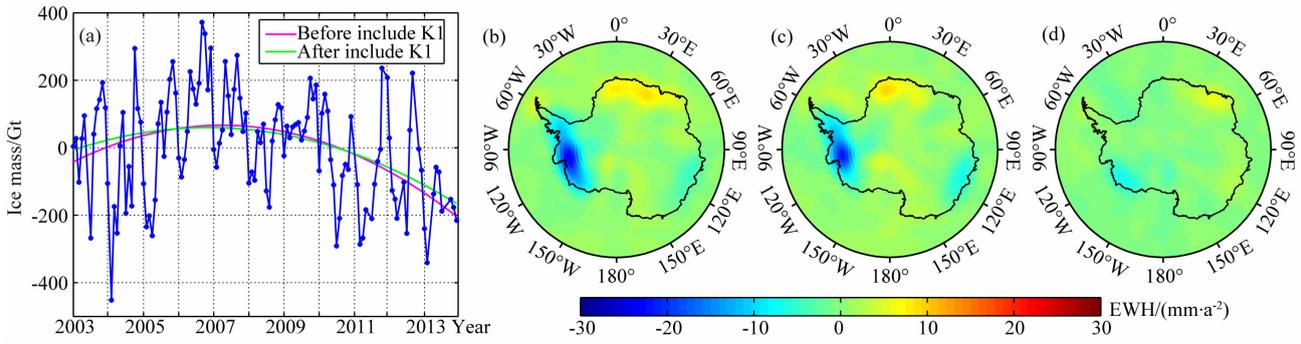


图 4 潮汐混频 K1 项对拟合结果的影响

(a) K1 项对时间序列拟合的影响。蓝线为 2003 年 1 月至 2013 年 12 月南极质量变化时间序列(未扣 GIA), 品红线和绿线分别为加入 K1 项前后的二项式拟合曲线; (b) 未考虑 K1 项时加速度空间分布; (c) 考虑 K1 项后加速度空间分布; (d) 两者之差。

Fig. 4 The impact of K1 tidal alias in the fit

(a) The impact of K1 tidal alias in the time-series fit. The blue line is time series of ice mass changes in Antarctica for January 2003 to December 2013 (GIA effect is uncorrected), the quadratic trend before and after include K1 tidal alias in the fit are shown in magenta and green; (b) Acceleration in the spatial distribution (not including K1 tidal alias); (c) Acceleration in the spatial distribution (including K1 tidal alias); (d) The difference between (b) and (c).

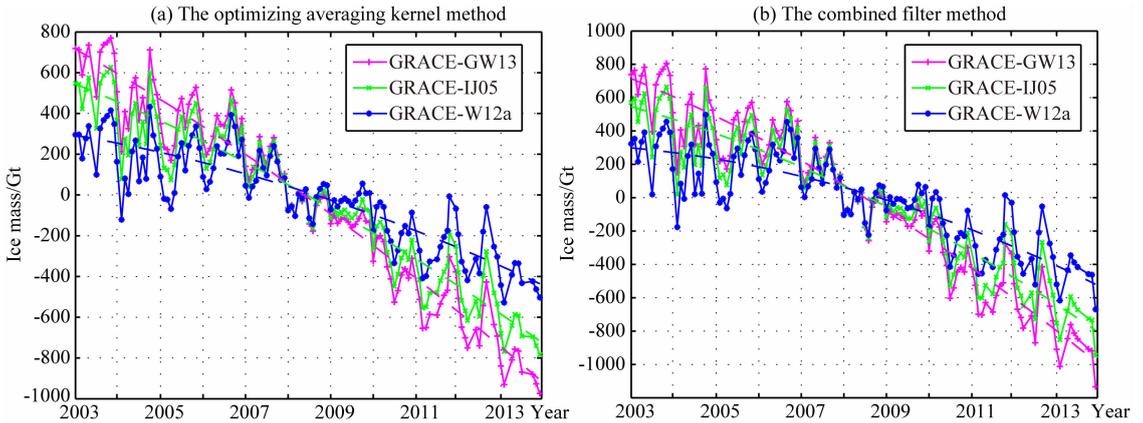


图 5 2003 年 1 月至 2013 年 12 月南极冰盖质量变化的时间序列

(a) 最优平均核函数法; (b) 组合滤波法。品红线、绿线、蓝线分别为扣除不同 GIA 模型(GW13、IJ05、W12a)的结果, 虚线为最佳多项式拟合。

Fig. 5 Time series of ice mass changes in Antarctica for January 2003 to December 2013

The results after removing a different GIA contribution (GW13, IJ05, W12a) are shown in magenta, green and blue, the dashed lines represent the best-fitting quadratic trend.

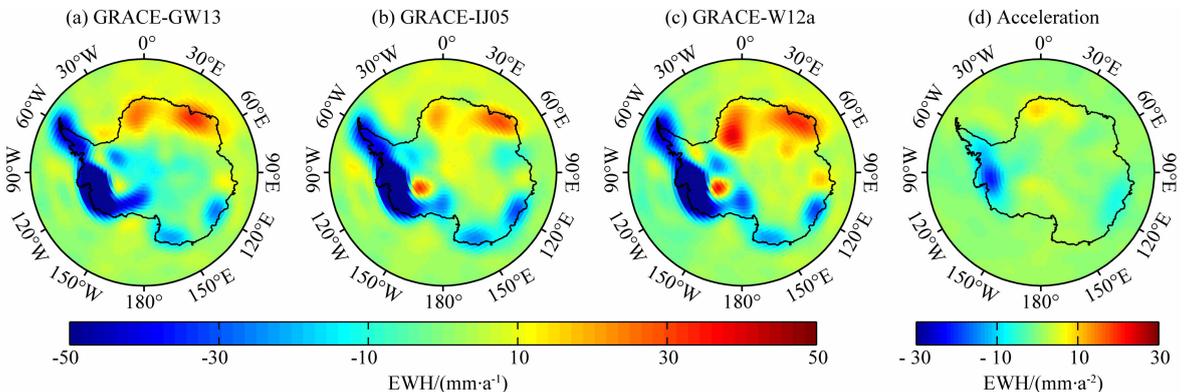


图 6 2003 年 1 月至 2013 年 12 月南极冰盖质量变化速率

(a—c) 分别为扣除不同 GIA 模型的年变化趋势; (d) 加速度。

Fig. 6 Rates of ice mass changes in Antarctica for January 2003 to December 2013

(a—c) The change trends after removing different GIA contribution; (d) acceleration.

$-8 \pm 10 \text{ Gt/a}^2$ , 对应全球海平面变化加速度为  $+0.02 \pm 0.03 \text{ mm/a}^2$ , 可见南极冰盖总体质量呈加速消融趋势. 在空间分布上, 质量消融主要集中在南极半岛北部和西南极的沿海地区等冰川消融显著的局部区域, 而南极内陆的广大地区质量呈增加趋势. 本文在信号外泄漏误差处理中引入了频域迭代恢复法和尺度因子来提高结果的空间分辨率和进行信号恢复, 但尺度因子和误差评估方法还不能精确构建, 需要进一步研究. 另外, 通过对最佳拟合模型选取的探讨和分析, 本文发现在现有时间序列长度内, K1 潮汐混频项相比其他周期项和混频项(如: S2、K2)对拟合的加速度结果影响稍大, 但 K1 项考虑的合理性还需更长 GRACE 时间序列来评估.

至今为止, 已公布的利用 GRACE 数据估算的南极冰盖质量平衡结果并不一致, 主要原因可以归纳为以下几个方面: ①采用数据版本不同; ②数据处理方法不同; ③测量时间段不同; ④采用 GIA 模型不同; ⑤泄漏误差处理方法不同. 本文采用同样的数据版本、时间跨度和误差改正方法利用不同的 GRACE 后处理方法, 得出的计算结果相差约  $13 \text{ Gt/a}$ , 而不同的 GIA 改正之间最大相差却达  $80 \text{ Gt/a}$  之多, 这表明不同的处理方法对估算结果远没有不同的 GIA 改正影响大, 因此南极 GIA 模型的精确与否直接决定着 GRACE 反演南极冰盖质量平衡结果的可靠性, 下一步需要联合其他测量技术如卫星测高、GPS 和 InSAR 等从多源信号中分离出南极 GIA 信号, 这样分离的南极 GIA 信号便不依赖于不确定性很大的冰负荷模型和地球模型, 从而完全基于实测数据获得, 这将进一步改善南极冰盖质量变化的估算结果. 此外, 不管是从时间序列分析的角度, 还是 GIA 信号有效分离的角度, 更长时间和持续的 GRACE 时变重力观测是非常必要的, 将有助于我们更好地理解南极冰盖质量平衡的状态和有效降低 GRACE 估算结果的不确定性.

**致谢** 感谢匿名评审专家和编辑提供的宝贵建议和帮助, 感谢美国德克萨斯大学 CSR 提供 GRACE 月重力场数据以及英国杜伦大学 P. L. Whitehouse 和美国科罗拉多大学 A. Geruo 提供 GIA 数据, 特别感谢中国科学院测量与地球物理研究所刘杰博士、冯伟博士和贾路路博士在本文完成中给予的帮助.

## References

- Arthern R J, Winebrenner D P, Vaughan D G. 2006. Antarctic snow accumulation mapped using polarization of 4.3-cm wavelength microwave emission. *J. Geophys. Res.*, 111(D6): D06107, doi: 10.1029/2004JD005667.
- Baur O. 2012. On the computation of mass-change trends from GRACE gravity field time-series. *J. Geodyn.*, 61: 120-128.
- Bettadpur S. 2007. UTCSR Level-2 gravity field product user handbook, GRACE 327-734, Center for Space Research, Austin; The University of Texas at Austin.
- Boening C, Lebsack M, Landerer F, et al. 2012. Snowfall-driven mass change on the East Antarctic ice sheet. *Geophys. Res. Lett.*, 39(21): L21501, doi: 10.1029/2012GL053316.
- Chen J L, Wilson C R, Blankenship D, et al. 2009. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nat. Geosci.*, 2(12): 859-862.
- Cheng M K, Tapley B D. 2004. Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years. *J. Geophys. Res.*, 109 (B9): B09402, doi: 10.1029/2004JB003028.
- Ding M H. 2013. An up to date review on the mass balance over Antarctica. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 28(1): 24-35, doi: 10.6038/pg20130104.
- Duan X J, Guo J Y, Shum C K, et al. 2009. On the postprocessing removal of correlated errors in GRACE temporal gravity field solutions. *J. Geod.*, 83(11): 1095-1106.
- E D C, Yang Y D, Chao D B. 2009. The sea level change from the Antarctic ice sheet based on GRACE. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(9): 2222-2228, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.005.
- Feng W, Lemoine J M, Zhong M, et al. 2012. Terrestrial water storage changes in the Amazon basin measured by GRACE during 2002-2010. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(3): 814-821, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.011.
- Feng W. 2013. Regional terrestrial water storage and sea level variations inferred from satellite gravimetry [Ph. D. thesis] (in Chinese). Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences.
- Geruo A, Wahr J, Zhong S J. 2013. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada. *Geophys. J. Int.*, 192(2): 557-572.
- Gunter B, Urban T, Riva R, et al. 2009. A comparison of coincident GRACE and ICESat data over Antarctica. *J. Geod.*, 83(11): 1051-1060.
- Helsen M, Van den Broeke M, Van de Wal R, et al. 2008. Elevation changes in Antarctica mainly determined by accumulation variability. *Science*, 320(5883): 1626-1629.
- Huybrechts P, Steinhage D, Wilhelms F, et al. 2000. Balance velocities and measured properties of the Antarctic ice sheet from a new compilation of gridded data for modelling. *Ann.*

- Glaciol.*, 30(1): 52-60.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Chapter 4: Observations; Cryosphere. Coordinating Lead Authors: Vaughan D G, Comiso J C; Lead Authors: Allison I, Carrasco J, Kaser G, et al. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), 102-124.
- Ivins E R, James T S. 2005. Antarctic glacial isostatic adjustment: a new assessment. *Antarctic Sci.*, 17(4): 541-553.
- Jacob T, John W, Pfeffer W T, et al. 2012. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 482(7686): 514-518.
- Jia L L, Wang H S, Xiang L W, et al. 2011. Effects of glacial isostatic adjustment on the estimate of ice mass balance over Antarctica and the uncertainties. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(6): 1466-1477, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.006.
- Ju X L, Shen Y Z, Zhang Z Z. 2013. Antarctic ice mass change analysis based on GRACE RL05 data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(9): 2918-2927, doi: 10.6038/cjg20130906.
- King M A, Bingham R J, Moore P, et al. 2012. Lower satellite-gravimetry estimates of Antarctic sea-level contribution. *Nature*, 491(7425): 586-589.
- Krinner G, Magand O, Simmonds I, et al. 2007. Simulated Antarctic precipitation and surface mass balance at the end of the twentieth and twenty-first centuries. *Climate Dyn.*, 28(2-3): 215-230.
- Kusche J. 2007. Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models. *J. Geod.*, 81(11): 733-749.
- Li J C, Fan C B, Chu Y H, et al. 2008. Using ICESat altimeter data to determine the Antarctic ice sheet elevation model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 33(3): 226-228, 248.
- Luo Z C, Li Q, Zhang K, et al. 2012. Trend of mass change in the Antarctic ice sheet recovered from the GRACE temporal gravity field. *Sci. China: Earth Sci.*, 55(1): 76-82.
- Lutcke Scott B, Sabaka T J, Loomis B D, et al. 2013. Antarctica, Greenland and Gulf of Alaska land-ice evolution from an iterated GRACE global mascon solution. *J. Glaciol.*, 59(216): 613-631.
- Pritchard H D, Arthern R J, Vaughan D G, et al. 2009. Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*, 461(7266): 971-975.
- Ray R D, Lutcke S B. 2006. Tide model errors and GRACE gravimetry: towards a more realistic assessment. *Geophys. J. Int.*, 167(3): 1055-1059.
- Rignot E, Bamber J, Van den Broeke M R, et al. 2008. Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nat. Geosci.*, 1(2): 106-110.
- Rignot E, Thomas R H. 2002. Mass balance of polar ice sheets. *Science*, 297(5586): 1502-1506.
- Rignot E, Velicogna I, Van den Broeke M, et al. 2011. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys. Res. Lett.*, 38(5): L05503, doi:10.1029/2011GL046583.
- Rodell M, Houser P R, Wilson C R, et al. 2004. The global land data assimilation system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(3): 381-394.
- Sasgen I, Konrad H, Ivins E, et al. 2012. Antarctic ice-mass balance 2002 to 2011: regional re-analysis of GRACE satellite gravimetry measurements with improved estimate of glacial-isostatic adjustment. *The Cryosphere Discuss*, 6: 3703-3732.
- Shen Q, Chen G, E D C, et al. 2011. Recent elevation changes on the Lambert-Amery system in East Antarctica from ICESat crossover analysis. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(8): 1983-1989, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.005.
- Shi H L, Lu Y, Bao L F, et al. 2009. Recent elevation change detection of Enderby land ice sheet using ICESat crossover analysis. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 34(4): 440-443.
- Shi H L, Lu Y, Du Z L, et al. 2011. Mass change detection in Antarctic ice sheet using ICESat block analysis techniques from 2003—2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(4): 958-965, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.010.
- Swenson S, Chambers D, Wahr J. 2008. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output. *J. Geophys. Res.*, 113(B8): B08410, doi: 10.1029/2007JB005338.
- Swenson S, Wahr J, Milly P. 2003. Estimated accuracies of regional water storage variations inferred from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resour. Res.*, 39(8): 1223, doi: 10.1029/2002WR001808.
- Swenson S, Wahr J. 2002. Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity. *J. Geophys. Res.*, 107(B9): ETG 3-1-ETG 3-13.
- Swenson S, Wahr J. 2006. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophys. Res. Lett.*, 33(8): L08402, doi: 10.1029/2005GL025285.
- Syed T H, Famiglietti J S, Rodell M, et al. 2008. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS. *Water Resour. Res.*, 44(2): W02433, doi: 10.1029/2006WR005779.
- Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. 2004. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305(5683): 503-505.
- Thomas M. 2002. Ocean induced variations of Earth's rotation—Results from a simultaneous model of global ocean circulation and tides [Ph. D. thesis]. Hamburg: University of Hamburg.
- Turner J, Connolley W M, Leonard S, et al. 1999. Spatial and temporal variability of net snow accumulation over the Antarctic from ECMWF re-analysis project data. *Int. J. Climatol.*, 19(7): 697-724.
- Van de Berg W J, Van den Broeke M R, Reijmer C H, et al. 2005. Characteristics of the Antarctic surface mass balance, 1958—2002, using a regional atmospheric climate model. *Ann.*

- Glaciol., 41(1): 97-104.
- Van de Berg W J, Van den Broeke M R, Reijmer C H, et al. 2006. Reassessment of the Antarctic surface mass balance using calibrated output of a regional atmospheric climate model. *J. Geophys. Res.*, 111(D11): D11104, doi: 10.1029/2005JD006495.
- Van den Broeke M R, Van de Berg W J, Van Meijgaard E. 2006. Snowfall in coastal West Antarctica much greater than previously assumed. *Geophys. Res. Lett.*, 33(2): L02505, doi: 10.1029/2005GL025239.
- Velicogna I, Wahr J. 2006. Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica. *Science*, 311(5768): 1754-1756.
- Velicogna I, Wahr J. 2013. Time-variable gravity observations of ice sheet mass balance: Precision and limitations of the GRACE satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, 40(12): 3055-3063, doi: 10.1002/grl.50527.
- Velicogna I. 2009. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. *Geophys. Res. Lett.*, 36(19): L19503, doi: 10.1029/2009GL040222.
- Wahr J, Molenaar M, Bryan F. 1998. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.*, 103(B12): 30205-30229.
- Wahr J, Swenson S, Velicogna I. 2006. Accuracy of GRACE mass estimates. *Geophys. Res. Lett.*, 33(6): L06401, doi: 10.1029/2005GL025305.
- Wang H S, Wu P. 2006. Effects of lateral variations in lithospheric thickness and mantle viscosity on glacially induced relative sea levels and long wavelength gravity field in a spherical, self-gravitating Maxwell Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 249(3-4): 368-383.
- Whitehouse P L, Bentley M J, Le Brocq A M. 2012a. A deglacial model for Antarctica: geological constraints and glaciological modelling as a basis for a new model of Antarctic glacial isostatic adjustment. *Quat. Sci. Rev.*, 32: 1-24.
- Whitehouse P L, Bentley M J, Milne G A, et al. 2012b. A new glacial isostatic adjustment model for Antarctica: calibrated and tested using observations of relative sea-level change and present-day uplift rates. *Geophys. J. Int.*, 190(3): 1464-1482.
- Zhan J G, Wang Y, Hao X G. 2011. Improved method for removal of correlated errors in GRACE data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 40(4): 442-446, 453.
- Zhang Z Z, Chao B, Lu Y, et al. 2009. An effective filtering for GRACE time-variable gravity: Fan filter. *Geophys. Res. Lett.*, 36(17): L17311, doi: 10.1029/2009GL039459.
- Zhang Z Z, Chen J L, Chao B F, et al. 2013. Recovering the filtered GRACE TVG signal by iterative method with application to mass change in Antarctic. *San Francisco: AGU*, 9-13, G23A-0777.

## 附中文参考文献

- 丁明虎. 2013. 南极冰盖物质平衡最新研究进展. *地球物理学进展*, 28(1): 24-35, doi: 10.6038/pg20130104.
- 鄂栋臣, 杨元德, 晁定波. 2009. 基于 GRACE 资料研究南极冰盖消融对海平面的影响. *地球物理学报*, 52(9): 2222-2228, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.005.
- 冯伟, Lemoine J M, 钟敏等. 2012. 利用重力卫星 GRACE 监测亚马逊流域 2002—2010 年的陆地水变化. *地球物理学报*, 55(3): 814-821, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.011.
- 贾路路, 汪汉胜, 相龙伟等. 2011. 冰川均衡调整对南极冰质量平衡监测的影响及其不确定性. *地球物理学报*, 54(6): 1466-1477, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.006.
- 鞠晓蕾, 沈云中, 张子占. 2013. 基于 GRACE 卫星 RL05 数据的南极冰盖质量变化分析. *地球物理学报*, 56(9): 2918-2927, doi: 10.6038/cjg20130906.
- 李建成, 范春波, 褚永海等. 2008. ICESAT 卫星确定南极冰盖高程模型研究. *武汉大学学报: 信息科学版*, 33(3): 226-228, 248.
- 罗志才, 李琼, 张坤等. 2012. 利用 GRACE 时变重力场反演南极冰盖的质量变化趋势. *中国科学: 地球科学*, 42(10): 1590-1596.
- 沈强, 陈刚, 鄂栋臣等. 2011. 基于 ICESat 轨道交叉点分析的东南极 Lambert-Amery 系统当前高程变化特征分析. *地球物理学报*, 54(8): 1983-1989, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.005.
- 史红岭, 陆洋, 鲍李峰等. 2009. 利用 ICESat 交叉点分析探测恩德比地冰盖近年高程变化. *武汉大学学报: 信息科学版*, 34(4): 440-443.
- 史红岭, 陆洋, 杜宗亮等. 2011. 基于 ICESat 块域分析法探测 2003—2008 年南极冰盖质量变化. *地球物理学报*, 54(4): 958-965, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.010.
- 詹金钢, 王勇, 郝晓光. 2011. GRACE 时变重力场系数误差的改进去相关算法. *测绘学报*, 40(4): 442-446, 453.

(本文编辑 何燕)