

鞠晓蕾,沈云中,张子占. 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, 2013, 56(9): 2918-2927, doi: 10. 6038/cjg20130906.

Ju X L, Shen Y Z, Zhang Z Z. Antarctic ice mass change analysis based on GRACE RL05 data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(9): 2918-2927, doi: 10. 6038/cjg20130906.

基于 GRACE 卫星 RL05 数据的 南极冰盖质量变化分析

鞠晓蕾^{1,2}, 沈云中^{1,2*}, 张子占³

1 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

2 同济大学空间信息科学及可持续发展应用中心, 上海 200092

3 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

摘 要 CSR(Centre for Space Research)最近发布了 RL05 数据,其空间分辨率、精度和周期变化特性等都优于 RL04 数据. 本文采用 300 km 的扇形滤波及 P5M11 去相关滤波削弱南北条带等重力场模型误差,并采用 Paulson2007 模型进行冰川均衡模型改正,利用 CSR RL05 与 RL04 数据计算分析了南极 2002 年到 2012 年的质量变化序列及其变化趋势的空间分布特性,并选取 8 个特征点进一步分析了其质量变化序列. 同时,对 CSR、JPL(Jet Propulsion Laboratory)、GFZ (GeoForschungsZentrum)三个机构发布的 RL05 数据采用相同的滤波方法进行计算,得到整个南极的质量变化分别为 -195.7 ± 20.5 Gt/a、 -203.8 ± 23.1 Gt/a、 -133.2 ± 29.9 Gt/a,对全球海平面变化的影响分别为 0.54 ± 0.06 mm/a、 0.56 ± 0.06 mm/a、 0.37 ± 0.09 mm/a.

关键词 南极质量变化, GRACE 卫星, 扇形滤波, 去相关滤波

doi: 10. 6038/cjg20130906

中图分类号 P223

收稿日期 2012-11-14, 2013-03-06 收修定稿

Antarctic ice mass change analysis based on GRACE RL05 data

JU Xiao-Lei^{1,2}, SHEN Yun-Zhong^{1,2*}, ZHANG Zi-Zhan³

1 College of Surveying and Geo-Informatics Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2 Center for Spatial Information Science and Sustainable Development, Tongji University, Shanghai 200092, China

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

Abstract The spatial resolution, accuracy and periodical characteristics of the latest release RL05 data by CSR (Centre for Space Research) are all superior to RL04 data. In this paper, the north-south stripe errors and other model errors of RL05 and RL04 data are reduced by using Fan filtering of 300 km radius and P5M11 decorrelated filtering, and the Paulson2007 model is used for the GIA (Glacial Isostatic Adjustment) correction. Both RL05 and RL04 data are used to analyze the Antarctic mass change series and the spatial distribution characteristics from 2002 to 2012. Meanwhile the mass change series of 8 characteristic points are further analyzed. Moreover the Antarctic mass changes are also processed and analyzed using the RL05 data of JPL (Jet Propulsion Laboratory) and GFZ (GeoForschungsZentrum). The Antarctic mass change rates

基金项目 重点基础研究计划(973 计划)项目(2012CB957703)、国家自然科学基金(41274035, 41074018)资助.

作者简介 鞠晓蕾,女,博士研究生,主要从事 GRACE 时变重力场研究. E-mail: leilei_0410@hotmail.com

* **通讯作者** 沈云中,男,教授,主要从事大地测量数据处理及卫星重力和卫星定位应用. E-mail: yzshen@tongji.edu.cn

derived from the RL05 data of CSR, JPL and GFZ are -195.7 ± 20.5 Gt/a, -203.8 ± 23.1 Gt/a, and -133.2 ± 29.9 Gt/a, the correspondent sea rising rates are 0.54 ± 0.06 mm/a, 0.56 ± 0.06 mm/a, and 0.37 ± 0.09 mm/a, respectively.

Keywords Antarctic mass change, GRACE, Fan filter, Decorrelated filter

1 引言

全球最大的南极冰盖(AIS)面积达到 1400 万平方公里,其质量变化直接影响全球海平面变化。GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 卫星于 2002 年 3 月升空,其观测数据能够每月解算一个空间分辨率达到 400 km^2 ,精度达到 1 cm 等效水柱高的时变重力场模型^[2]。Wahr 等提出了利用 GRACE 的时变重力场模型估计地球表面质量变化的算法^[3],许多研究者利用该算法分析了南极冰盖的质量变化,其范围从 -80 Gt/a 到 -152 Gt/a ^[4-6],存在比较大的不确定性,主要原因在于所分析的时间区间不同和所用的 GIA (Glacial Isostatic Adjustment) 模型不同^[7]。Chen 等分析了 2002 年 4 月至 2005 年 8 月西南极和整个南极的质量变化为 $-148 \pm 21 \text{ Gt/a}$ 和 $-152 \pm 80 \text{ Gt/a}$ ^[8],Velicogna 等利用 CSR_RL01 数据分析得到 2002 年 4 月到 2005 年 11 月的西南极质量变化为 $-77 \pm 14 \text{ Gt/a}$ ^[4],而 Zwally 等给出的 2002 年 4 月到 2008 年 12 月西南极的质量变化约为 -87 Gt/a ,并认为东南极的质量变化的不确定性非常大^[9]。Luo 等利用 CSR_RL04 2002 年 8 月至 2010 年 6 月的数据分析整个南极的质量变化为 -80 Gt/a (西南极为 -78.3 Gt/a ,东南极为 -1.6 Gt/a),对全球海平面上升的贡献为 0.22 mm/a ^[10],这与通过 ICESat 块域分析法求得到的南极冰盖质量变化非常相符^[11]。根据 Chen 等的结果整个南极的质量变化在 2006—2009 年期间比 2002—2006 年增长约 137%,南极冰盖自 2006 年后呈现出加速融化趋势^[7]。

CSR、JPL 和 GFZ 三个 GRACE 产品发布机构公布了 RL05 数据,该数据采用了新的地球物理背景模型(海洋、大气、潮汐等),其空间分辨率、精度和周期性变化特性等都优于先前公布的 RL04 数据^[12],利用该数据能够求得可靠性更高的南极质量变化。因此,本文利用这三个机构的 RL05 数据计算分析了南极 $1^\circ \times 1^\circ$ 格网点的质量变化及其对全球海平面变化的影响,并与 RL04 数据的结果进行了对比。

2 数据处理过程及方法

2.1 数据来源

2012 年 4 月,CSR、JPL 和 GFZ 都发布了新的 RL05 数据,其空间分辨率和精度比 RL04 数据更高, C_{20} 系数更为可信,不需要用人卫激光的 C_{20} 系数进行替换。图 1 给出了 2004 年 2 月相对于 2004 年 1 月未经过任何滤波处理的全球质量变化的等效水柱高,可以看出 RL05 数据比 RL04 的条带误差要明显少,表明 RL05 数据能反演出更高精度的质量变化信号。

2.2 基本理论

Wahr 提出了时变重力场模型与地球表面密度之间的关系式^[13],进行扇形滤波后,以等效水柱高(EWH)表示质量变化的公式为:

$$\Delta h(\theta, \lambda) = \frac{2a\rho_{\text{ave}}}{3\rho_{\text{water}}} \sum_{l=0}^{N_{\text{max}}} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} W_{l,m} (\Delta C_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{lm} \sin(m\lambda)) \bar{P}_{lm}(\cos\theta), \quad (1)$$

式中, θ, λ 分别为余纬和经度, a 为地球平均半径 (6378.136 km), ρ_{ave} 为地球平均密度 (5517 kg/m^3), l, m 分别为重力场模型的阶和次, \bar{P}_{lm} 为完全规格化的勒让德函数, k_l 为 l 阶负荷勒夫数, N_{max} 为模型的最大阶数, $\Delta C_{lm}, \Delta S_{lm}$ 为 l 阶 m 次的完全规格化位系数变化值,通常为月位系数与其平均值之差, ρ_{water} 为水的密度 (1000 kg/m^3), $W_{l,m} = W_l W_m$, W_l, W_m 为扇形滤波函数, $W_0 = \frac{1}{2\pi}$, $W_1 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right]$, $W_{l+1} = -\frac{2l+1}{b} W_l + W_{l-1}$, $W_{m+1} = -\frac{2m+1}{b} W_m + W_{m-1}$, $b = \frac{\ln 2}{1 - \cos(r/a)}$, r 为扇形滤波函数半径, a 为地球平均半径。

2.3 滤波方法

2.3.1 扇形滤波

由于 GRACE 卫星数据反演重力场模型的误差随频率变大而增大,且存在明显的南北条带误差(图 1),因此需要进行空间滤波,来削弱这些误差的影响。目前常用的滤波方法有高斯滤波、维纳滤波、扇

形滤波等^[2,14]. 扇形滤波对时变重力场模型的阶系数与次系数都要进行平滑, 在与高斯滤波取相同半径的情况下, 能有效削弱误差的影响^[10,14]. GRACE 时变重力场模型的空间分辨率是 400 km, 滤波半径要取到 400 km 以上才能有效地控制噪声, 但由于 GRACE 卫星在极地观测数据密度大, 且时变重力场模型在极地的空间分辨率也要高于其它地区, 因此滤波半径取到 300 km 已经可以很好地达到削弱误差及保持信号的目的, 是普遍应用的滤波半径^[15].

2.3.2 去相关误差滤波

Swenson 和 Wahr 提出了能够有效滤掉南北条带误差的去相关误差滤波算法, 称为 P_nM_m 方法^[16], 其含义是: 前 $m \times m$ 阶的位系数保持不变, 用

n 阶多项式拟合大于等于 m 阶次的位系数, 奇数阶与偶数阶分开拟合. 多项式的拟合值刻画了南北条带误差项, 从原时变重力场位系数中扣除拟合值, 可滤除南北条带误差. 经验证 P5M11 去条带误差的效果比较好, 因此本文采用 P5M11 方法进行去相关误差滤波.

2.3.3 滤波分析

依然选用 2004 年 2 月相对于 2004 年 1 月的 CSR RL05 数据进行分析. 从图 1b 可以看出, 未滤波时存在明显的条带误差和其它噪声, 几乎看不出质量变化的信号. 通过滤波处理后, 全球质量变化的等效水柱高分布如图 2 所示, 其中图 2a 为去相关误差滤波结果, 图 2b 为扇形滤波结果, 图 2c 为去相关

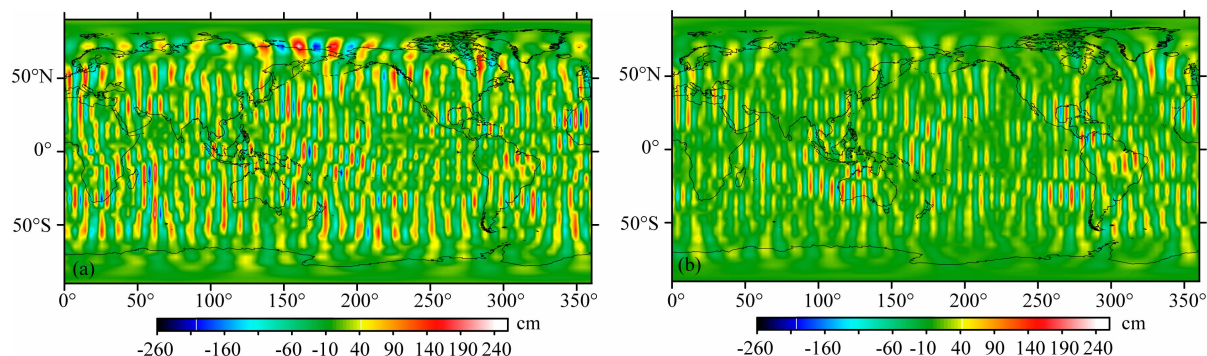


图 1 CSR RL04 数据(a)与 CSR RL05 数据(b)的精度比较
Fig. 1 Accuracy comparison of (a) CSR RL04 data and (b) CSR RL05 data

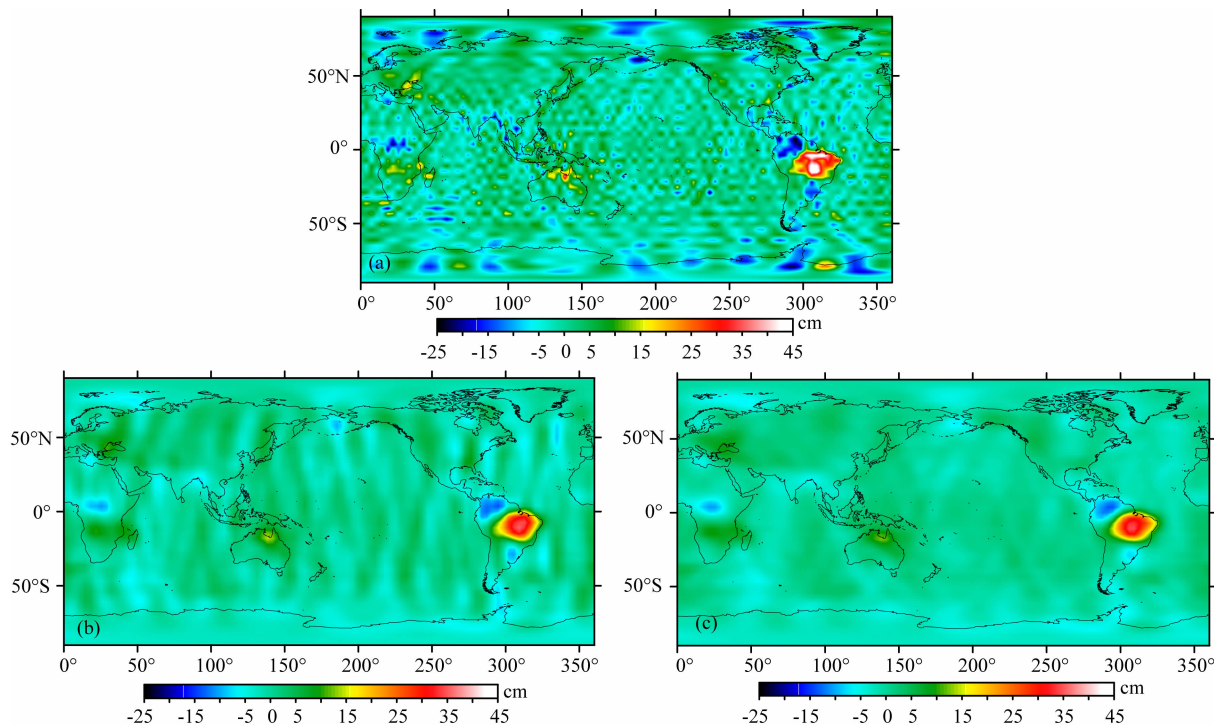


图 2 不同滤波处理后的全球质量变化
(a) 去相关滤波 (P5M11); (b) 扇形滤波 (半径 300 km); (c) 去相关滤波 + 扇形滤波 (P5M11+300 km).

Fig. 2 Global mass changes after different filtering methods

(a) Decorrelated filtering (P5M11); (b) Fan filtering (300 km); (c) Decorrelated filtering and Fan filtering (P5M11+300 km).

误差滤波加上扇形滤波结果.可以看出只采用去相关滤波,尽管南北条带误差被滤除,但高频误差依然显著;只采用扇形滤波可有效滤掉高频误差,但南北条带误差依然存在.只有通过去相关误差滤波加上扇形滤波两步滤波处理后,才能有效地降低各类噪声的影响,很好地反映出全球质量变化的信号.如果从数值上分析,只进行去相关滤波后全球质量变化区间为 $-32\sim 59$ cm(EWH,图 2a),而经过扇形滤波(图 2b)或两步滤波(图 2c)后的全球质量变化区间为 $-14\sim 35$ cm(EWH),两者的差别主要在低纬度区域(小于北纬 83° 及南纬 83°),在高纬度的极地两者基本相符,信号并不减弱.但两步滤波后条带误差明显减少,因此,本文在分析南极冰盖质量变化时,采用两步滤波处理.

2.4 GIA 改正

GIA 是影响 GRACE 时变重力场模型反演质量变化的一个重要的因素^[17],目前有多种 GIA 模型,如 Ice5G,Paulson2007^[18]等.本文采用比较新的 Paulson2007 模型,该模型可从 grace.jpl.nasa.gov/data/pgr/ 下载,Bur 认为是比较好的 GIA 模型^[19].Paulson2007 模型在南极地区的年改正值如图 3 所示,可以看出南极的大部分区域 GIA 年改正值是负值,变化呈上升趋势,只有在东南极的毛德皇后地 Dronning Maud Land(DML)的沿海区域有小幅度的下降,西南极的变化最为明显,尤其是玛丽·伯德地 Marie Byrd Land(MBL)区域.

3 南极质量变化结果分析

3.1 CSR RL04 与 CSR RL05 数据的质量变化分析

3.1.1 质量变化序列分析

CSR RL04 数据公布的时间段为 2002 年 4 月到 2012 年 1 月,共有 113 个月的数据;CSR RL05

数据公布的时间段为 2004 年 1 月到 2012 年 6 月,共有 99 个月的数据.图 4 和表 1 给出了由这两个版本数据反演的南极地区质量变化.由图 4 可见,两个版本的数据所得到的南极质量变化序列(以等效水柱高表示)在 2006 年后呈现出明显的下降趋势,与 Chen 等(2009)^[7]的结果一致.表 1 给出了整个南极以及西南极和东南极扣除 GIA 影响后的质量变化,由 CSR RL04 数据和 CSR RL05 数据求得的整个南极质量变化分别为 -212.4 ± 30.9 Gt/a 和 -195.7 ± 23.1 Gt/a,对应的等效水柱高变化分别为 -1.58 ± 0.23 cm/a 和 -1.44 ± 0.17 cm/a,对全球平均海平面变化的贡献分别为 0.59 ± 0.09 mm/a 和 0.54 ± 0.06 mm/a;西南极的质量下降速度要明显快于东南极.两版本数据变化趋势是相符合,但 RL05 数据求得的质量变化误差明显要比 RL04 数据小,而且 RL04 数据在 2010 年之后出现较大的上下波动,其数据质量明显不如 RL05 数据.图 4 表明西南极质量变化速度明显大于东南极,表 1 数据表明西南极质量变化对海平面的影响不仅数值比东南极大,而且其不确定性也明显要小.

3.1.2 质量变化趋势分布分析

将南极地区划分成 $1^\circ\times 1^\circ$ 的格网,计算每个格网质量变化的时间序列,扣除年变化、半年变化以及 161 天变化等周期项的影响后^[20],其变化趋势的分布如图 5 所示.其中,图 5a 与图 5c 分别是 RL04 数据与 RL05 数据未经 GIA 改正的质量变化趋势分布,图 5b 与图 5d 分别是经过 GIA 改正后的质量变化趋势分布.显然,扣除 GIA 影响前,东南极的大部分区域和西南极的部分区域质量呈现增长的趋势;扣除 GIA 影响后,整个南极绝大部分地区的质量呈现减小的趋势,特别在 Amundsen Sea Embayment (ASE)区域的质量减少速度非常快,Antarctic Peninsula (AP)同样呈现出明显的质量减少;然而在南极北部

表 1 CSR RL05 与 CSR RL04 的南极质量变化比较

Table 1 Antarctic mass change comparison of CSR RL05 and CSR RL04

数据	时间段	滤波 GIA 模型	南极质量变化		对全球海 平面的贡献 (mm/a)	
			区域	EWH(cm/a)		Gt/a
CSR RL04	2002-04—2012-01	Fan 300 km+P5M11 Paulson2007	整体	-1.58 ± 0.23	-212.4 ± 30.9	0.59 ± 0.09
			西南极	-2.66 ± 0.29	-137.8 ± 15.9	0.38 ± 0.04
			东南极	-0.84 ± 0.21	-74.6 ± 20.1	0.21 ± 0.06
CSR RL05	2004-01—2012-06	Fan 300 km+P5M11 Paulson2007	整体	-1.44 ± 0.17	-195.7 ± 23.1	0.54 ± 0.06
			西南极	-2.69 ± 0.18	-139.3 ± 9.5	0.39 ± 0.03
			东南极	-0.57 ± 0.19	-56.4 ± 18.4	0.15 ± 0.05

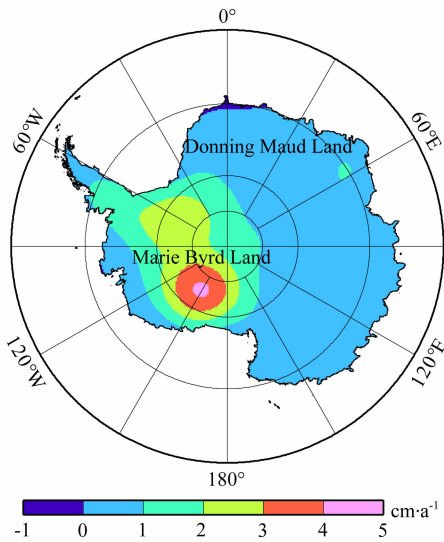


图 3 南极 GIA 模型改正 (Paulson2007)

Fig. 3 Antarctic GIA model correction (Paulson2007)

的部分区域,主要是东南极北部如 Donning Maud Land (DML),其质量仍然呈现增长趋势。

3.1.3 特征点的质量变化序列分析

选取质量变化比较明显的 8 个特征点,其分布

如图 5d 所示,扣除 GIA 影响后,这些特征点的质量变化序列如图 6 所示.各特征点的变化趋势及其与 Chen 等^[7]和 Luo 等^[10]结果的比较见表 2.

表 2 特征点的质量变化比较

Table 2 Mass change comparisons of characteristic points

点 位置	结果对比			Chen 结果
	本文结果		Luo 结果	
	CSR RL04	CSR RL05	CSR RL04	CSR RL04
2003-04—	2004-01—	2002-08—	2002-04—	
2012-01	2012-06	2010-06	2009-01	
Fan+P5M11	Fan +P5M11	Fan+ P3M6	Gaussian+	
(cm/a)	(cm/a)	(cm/a)	P4M6	
			(cm/a)	
A AG	-10.90	-12.25	-12.20	-9.78
B GL	-3.16	-2.91	-3.75	-4.01
C RIS	-1.32	-1.22	2.25	—
D NSL	0.88	1.54	1.44	—
E EL	1.16	1.22	2.36	1.21
F WL	-1.17	-1.68	-0.39	-2.03
G MBL	-2.15	-2.49	—	—
H VL	-1.80	-1.96	—	—

注: AG (Amundsen Gulf), GL (Graham Land), RIS (Rome Ice Sheet), NSL (New Schwaben Land), EL (Enderby Land), WL (Wilkes Land), MBL (Marie Byrd Land), VL (Victoria Land); 滤波半径都为 300 km.

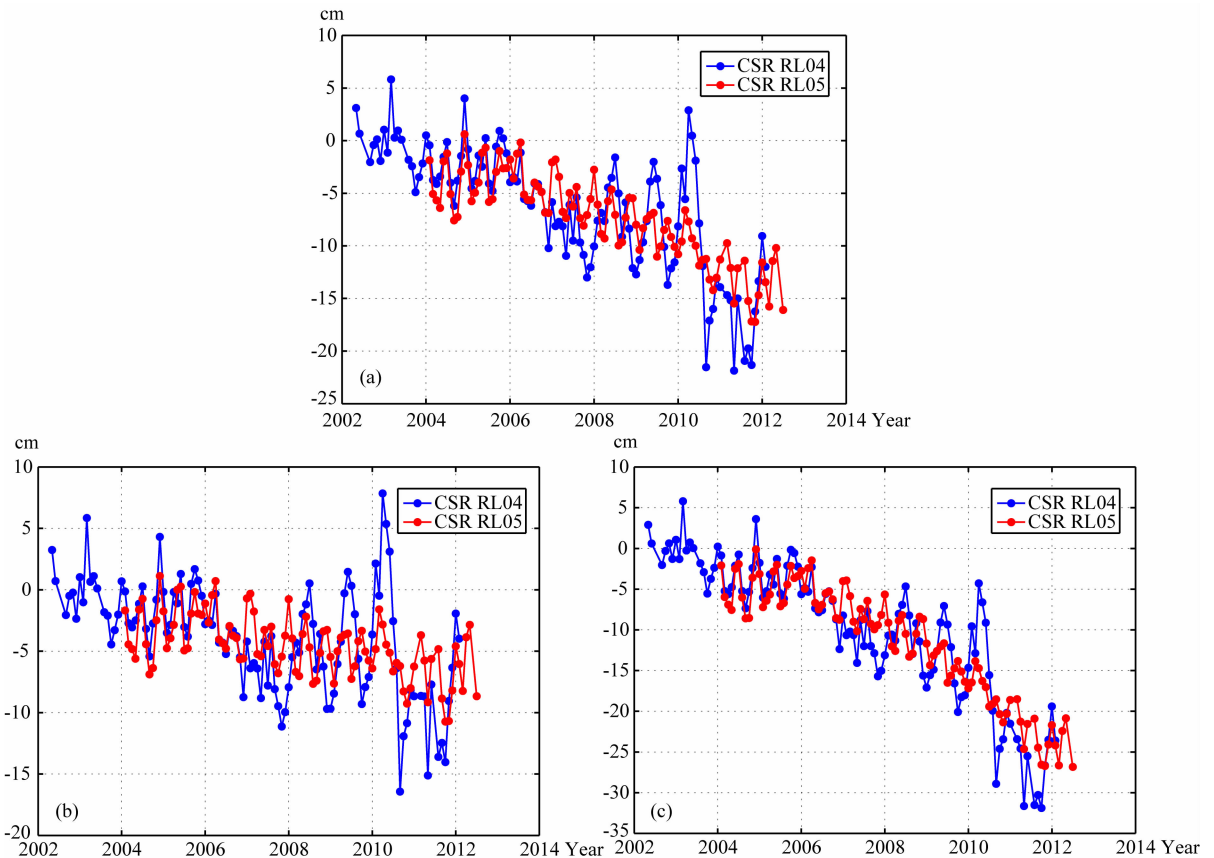


图 4 扣除 GIA(Paulson2007)影响后南极质量变化序列

(a) 整个南极质量变化序列; (b) 东南极质量变化序列; (c) 西南极质量变化序列.

Fig. 4 Antarctic mass change series after GIA correction (Paulson2007)

(a) Entire Antarctic mass change series; (b) East Antarctic mass change series; (c) West Antarctic mass change series.

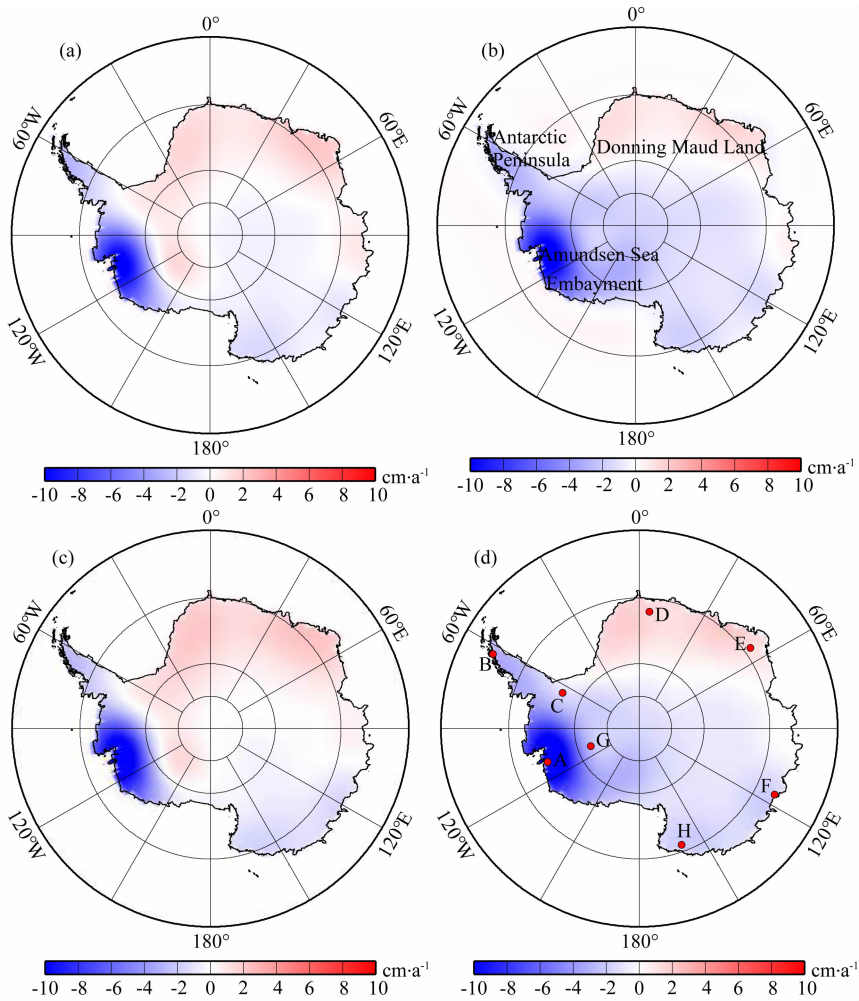


图5 CSR RL04 与 CSR RL05 数据南极质量变化趋势分布

(a) RL04 未经 GIA 改正; (b) RL04 经过 GIA 改正; (c) RL05 未经 GIA 改正; (d) RL05 经过 GIA 改正.

Fig. 5 Distribution of Antarctic mass change trend from CSR RL04 and CSR RL05 data

(a) RL04 data before removing GIA; (b) RL04 data after removing GIA;

(c) RL05 data before removing GIA; (d) RL05 data after removing GIA.

从图 6 可以看出,所选取特征点的 RL04 与 RL05 数据质量变化序列的特性和趋势一致;从表 2 可见,除 Ronne Ice Shelf 区域外,本文结果与 Luo 等和 Chen 等结果的变化趋势相同,其数值差异是因所用数据的时间段不同,以及滤波方法和 GIA 模型不同引起.东南极的 New Schwaben Land, Enderby Land 呈现质量增加趋势, Wilkes Land 和 Victoria Land 呈现质量降低趋势.质量下降趋势最明显的区域为西南极的 Amundsen Gulf 和 Graham Land,这两个地区也是研究南极质量变化的重点. Rome 冰架附近及 Marie Byrd Land 质量也呈现减小的趋势.

3.2 CSR RL05, JPL RL05, GFZ RL05 数据南极质量变化的比较分析

3.2.1 质量变化序列分析

JPL RL05 数据的时间段为 2004 年到 2012 年,

共有 99 个月的模型数据;GFZ RL05 数据的时间段为 2005 年到 2012 年,共有 87 个月的模型数据.扣除 GIA 影响后,CSR、JPL 和 GFZ 三个机构的 RL05 数据求得的南极质量变化序列如图 7 所示,三个机构数据求得的整个南极质量都呈下降趋势,东南极质量下降速度要明显比西南极慢,GFZ 数据结果的质量变化周期项的幅度要明显小于 CSR 和 JPL 数据结果周期项的变化幅度.表 3 给出了三个机构数据质量变化的统计结果.

其中,对于整个南极的质量变化,CSR RL05、JPL RL05、GFZ RL05 所得到的结果分别为 -195.7 ± 20.5 Gt/a (2004—2012), -203.8 ± 23.1 Gt/a (2004—2012), -133.2 ± 29.9 Gt/a (2005—2012), 对海平面变化的贡献分别为 0.54 ± 0.06 mm/a, 0.56 ± 0.06 mm/a, 0.37 ± 0.09 mm/a. 表 3 的结果

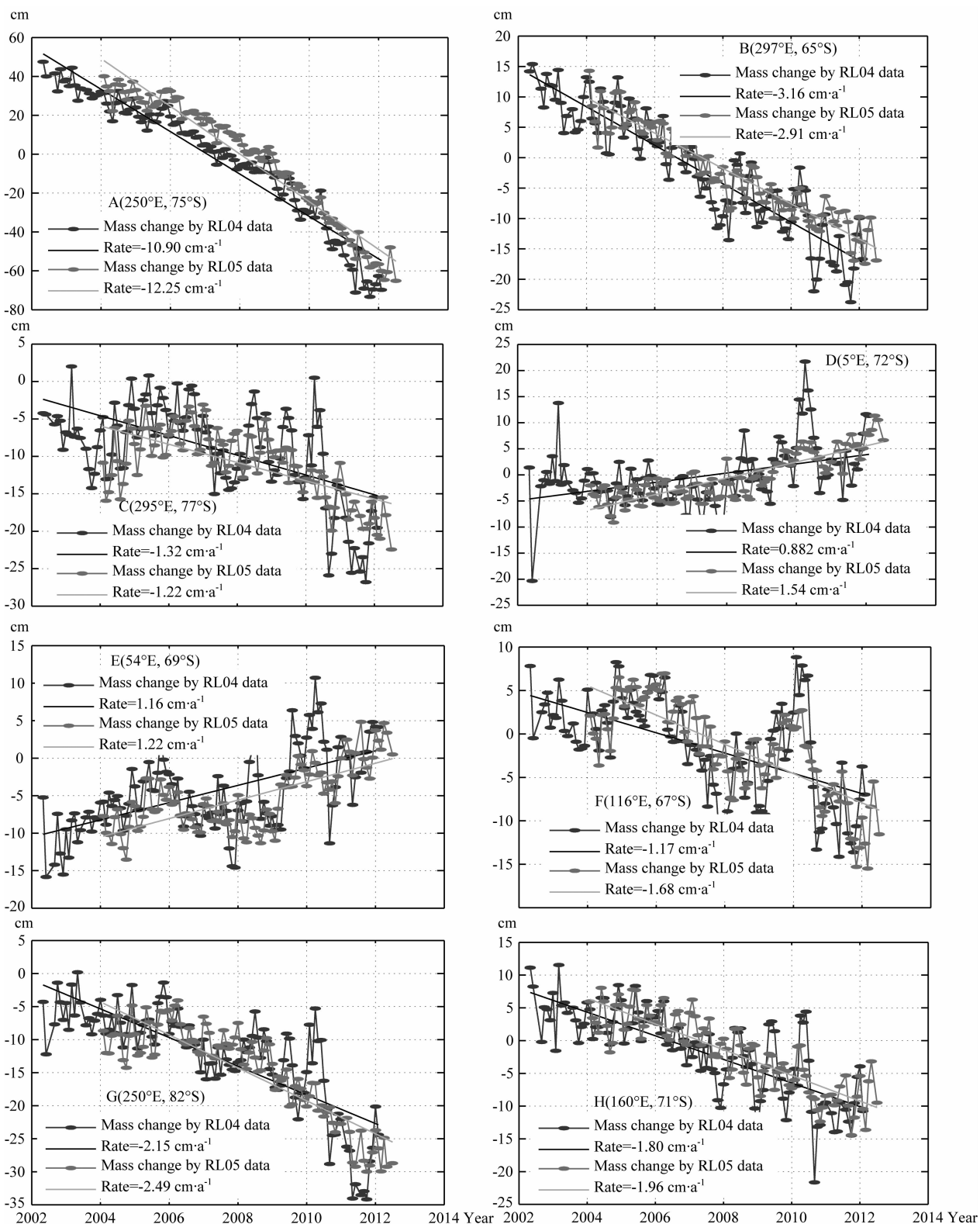


图 6 特征点质量变化序列

Fig. 6 Mass change series of characteristic points

表明, CSR 与 JPL 的 RL05 数据求得的南极质量变化非常接近, GFZ RL05 数据求得的南极质量变化比 CSR 和 JPL 的结果要小 50% 左右, 尤其在东南极地区, 三个机构 RL05 数据的结果相差非常明显。

由于在处理数据的过程中采用相同的处理方法, 上述结果差异应该归因于不同机构模型本身的差异。如果考虑到这些数据的差异而采用相应的数据处理策略, 这将是以后研究的重点所在。

表 3 CSR RL05, JPL RL05, GFZ RL05 数据质量变化比较

Table 3 Mass change comparisons of CSR RL05, JPL RL05 and GFZ RL05 data

数据	时间段	滤波 GIA 模型	南极质量变化			对全球海平面的 贡献(mm/a)
			区域	EWB(cm/a)	Gt/a	
CSR RL05	2004-01—2012-06	Fan 300 km+P5M11 Paulson2007	整体	-1.44 ± 0.15	-195.7 ± 20.5	0.54 ± 0.06
			西南极	-2.69 ± 0.26	-139.3 ± 13.5	0.38 ± 0.04
			东南极	-0.57 ± 0.14	-56.4 ± 13.8	0.16 ± 0.04
JPL RL05	2004-01—2012-04	Fan 300 km+P5M11 Paulson2007	整体	-1.50 ± 0.17	-203.8 ± 23.1	0.56 ± 0.06
			西南极	-2.61 ± 0.24	-135.2 ± 12.5	0.38 ± 0.04
			东南极	-0.73 ± 0.17	-68.6 ± 15.9	0.18 ± 0.05
GFZ RL05	2005-01—2012-06	Fan 300 km+P5M11 Paulson2007	整体	-0.98 ± 0.22	-133.2 ± 29.9	0.37 ± 0.09
			西南极	-2.14 ± 0.16	-110.8 ± 8.3	0.31 ± 0.02
			东南极	-0.17 ± 0.27	-22.4 ± 25.5	0.06 ± 0.07

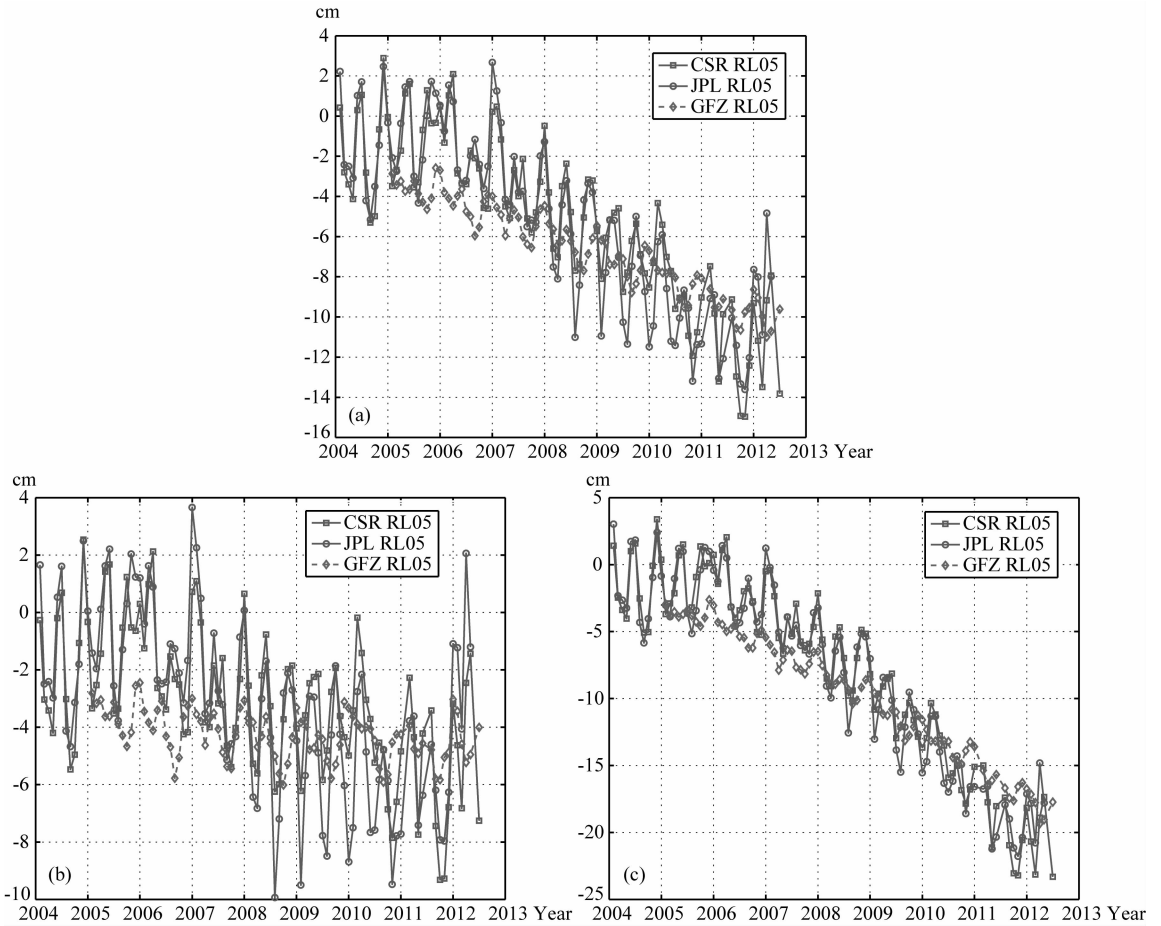


图 7 扣除 GIA 影响后南极质量变化分析序列

(a) 整个南极质量变化序列;(b) 东南极质量变化序列;(c) 西南极质量变化序列。

Fig. 7 Antarctic mass change series after removing GIA

(a) Entire Antarctic mass change series; (b) East Antarctic mass change series; (c) West Antarctic mass change series.

3.2.2 质量变化趋势分布分析

采用如 3.1 节同样的方法计算 JPL、GFZ RL05 数据的南极质量变化趋势分布。扣除 GIA 影响后，

由 CSR RL05 数据求得的南极质量变化趋势分布见图 5d, 由 GFZ RL05, JPL RL05 数据求得的南极质量变化趋势分布如图 8 所示。由图 5d 与图 8 可见，

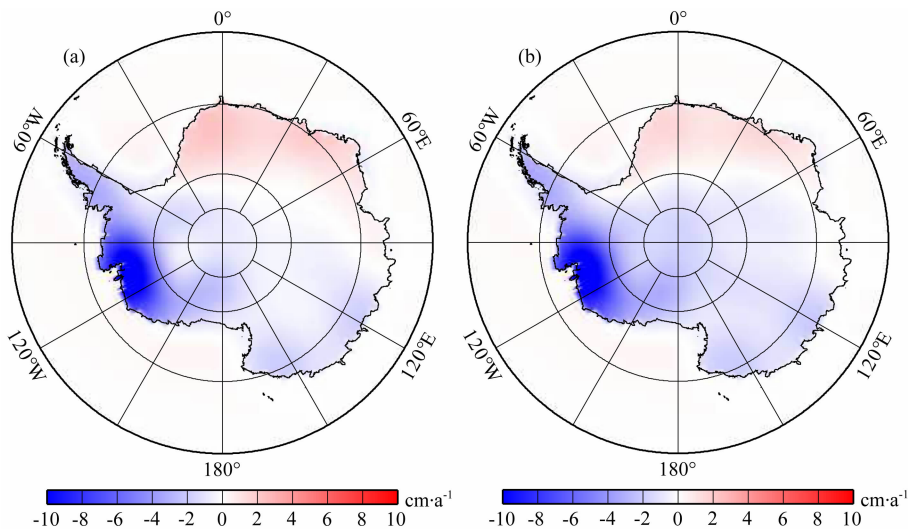


图 8 GFZ RL05 (a) 与 JPL RL05 (b) 数据的南极质量变化趋势分布

Fig. 8 Distribution of Antarctic mass change trend from (a) GFZ RL05 and (b) JPL RL05 data

三个机构 RL05 数据求得的质量变化趋势分布非常接近。

4 结 论

利用 CSR、JPL 和 GFZ 三个机构新发布的 RL05 数据,经去相关误差滤波和扇形滤波并进行 GIA 改正后,计算分析了整个南极质量变化序列及其分布,并与 CSR RL04 数据的结果进行了比较。根据本文结果,可归纳出如下结论:

(1) 利用新发布的 CSR RL05 数据与 CSR RL04 数据求得的整个南极区域的质量变化分别为 -195.7 ± 23.1 Gt/a, -212.4 ± 30.9 Gt/a, 对海平面的贡献分别为 0.54 ± 0.06 mm/a, 0.59 ± 0.09 mm/a。RL05 数据求得的南极质量变化的精度、分辨率及其周期特性都优于 RL04 数据的结果。

(2) CSR、JPL 和 GFZ 三个机构所公布的 RL05 数据求得的整个南极质量变化趋势的分布一致。CSR、JPL 和 GFZ RL05 数据计算整个南极的质量变化分别为 -195.7 ± 20.5 Gt/a (2004—2012), -203.8 ± 23.1 Gt/a (2004—2012), -133.2 ± 29.9 Gt/a (2005—2012), 对海平面做出的贡献分别为 0.54 ± 0.06 mm/a, 0.56 ± 0.06 mm/a, 0.37 ± 0.09 mm/a。CSR 与 JPL 数据求得的质量变化结果吻合良好,但 GFZ 数据的结果要小 50% 左右。

(3) 西南极的 Amundsen Gulf、Graham Land 和 Antarctic Peninsula 是质量变化最为显著的区域,整个南极的质量减少主要由西南极质量减少所贡献。

(4) 在 2006 年之后,南极冰盖呈现出加速融化的趋势,与 Chen 等(2009)^[7]的研究成果一致。

致 谢 感谢 CSR、JPL、GFZ 提供 RL05 及 RL04 数据。

参考文献(References)

- [1] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31(9): L09607.
- [2] Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, et al. Time-variable gravity from GRACE: first results. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31(11): L11501.
- [3] 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. Geophys. Res.*, 1998, 103(B12): 30205-30229.
- [4] Velicogna I, Wahr J. Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica. *Science*, 2006, 311(5768): 1754-1756.
- [5] Ramillien G, Lombard A, Cazenave A, et al. Interannual variations of the mass balance of the Antarctica and Greenland ice sheets from GRACE. *Global Planet Change*, 2006, 53(3): 198-208.
- [6] Luthcke S B, Rowlands D D, Arendt A, et al. GRACE observations of land ice evolution. 2008 GRACE Science Team Meeting, 2008: 617-631.
- [7] Chen J L, Wilson C R, Blankenship D D, et al. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nature Geoscience*, 2009, 2(12): 859-862.
- [8] Chen J L, Wilson C R, Blankenship D D, et al. Antarctic mass rates from GRACE. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33(11): L11502.
- [9] Zwally H J, Giovinetto M B. Overview and assessment of

- Antarctic ice-sheet mass balance estimates; 1992—2009. *Surveys in Geophysics*, 2011, 32(4-5): 351-376.
- [10] Luo Z C, Li Q, Zhang K, et al. Trend of mass change in the Antarctic ice sheet recovered from the GRACE temporal gravity field. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(1): 76-82.
- [11] 史红岭, 陆洋, 杜宗亮等. 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*, 2011, 54(4): 958-965.
- Shi H L, Lu Y, Du Z L, et al. Mass change detection in Antarctic ice sheet using ICESat block analysis techniques from 2003—2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(4): 958-965.
- [12] Dahle C, Flechtner F, Gruber C, et al. GFZ GRACE level-2 processing standards document for level-2 product release 0005. Potsdam; Deutsches Geo Forschungszentrum GFZ, 2012; 20.
- [13] Wahr J. Time variable gravity from satellites. *Treatise on Geophysics*, 2007, 3: 213-237.
- [14] Zhang Z Z, Chao B F, Lu Y, et al. An effective filtering for GRACE time-variable gravity: Fan filter. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36(17): L17311.
- [15] Tang J S, Cheng H W, Liu L. Using nonlinear programming to correct leakage and estimate mass change from GRACE observation and its application to Antarctica. *J. Geophys. Res.*, 2012, 117: B11410, doi: 10.1029/2012JB009480.
- [16] Swenson S, Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33(8): L08402.
- [17] Wang H S, Wu P. Role of background viscosity in the investigation of postglacial rebound induced crustal motion in a laterally heterogeneous mantle. *J. Geodyn.*, 2006, 42(1-3): 85-94.
- [18] Paulson A, Zhong S J, Wahr J. Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data. *Geophys. J. Int.*, 2007, 171(2): 497-508.
- [19] Baur O, Kuhn M, Featherstone W E. Continental mass change from GRACE over 2002—2011 and its impact on sea level. *J. Geod.*, 2012, 87(2): 117-125, doi: 10.1007/s00190-012-0583-2.
- [20] 鄂栋臣, 杨元德, 晁定波. 基于 GRACE 资料研究南极冰盖消减对海平面的影响. *地球物理学报*, 2009, 52(9): 2222-2228.
- E D C, Yang Y D, Chao D B. The sea level change from the Antarctic ice sheet based on GRACE. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(9): 2222-2228.

(本文编辑 何 燕)