

利用最新 GOCE 重力场模型确定南极绕极流

彭利峰¹ 姜卫平¹ 金涛勇² 赵 倩¹

(1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:利用最新的纯 GOCE 重力场模型 GO_CONS_GCF_2_TIM_R4 及由多源多代卫星测高数据确定的精细平均海平面高模型 WHU2009,基于地转平衡方程确定了南极绕极流,其流幅的变化趋势与由海洋实测数据获取的 SAF 和 PF 锋面保持一致。将其分别与 GRACE、多源数据同化模型 CNES-CLS09 和 NOAA 海洋实测数据结果进行了比较分析,结果表明,确定南极绕极流在 u 、 v 方向与海洋实测结果差异分别为 10.1 cm/s 和 5.3 cm/s;在大尺度上,结果与同化模型和实测数据结果具有较好的一致性,明显优于 GRACE 结果,并且在大陆沿岸附近海域略优于多源数据同化模型 CNES-CLS09;此外,利用本结果还可有效探测威德尔旋回和罗斯旋回等中尺度涡。

关键词:南极绕极流;稳态海面地形;海洋环流;高斯滤波。

中图分类号:P228

南极绕极流 (Antarctic Circumpolar Current, ACC) 是南大洋最为重要的一支洋流,也是全球唯一真正意义上的“环流”,具有巨大的能量,对全球海洋和气候系统具有重要的影响^[1]。卫星大地测量技术的迅速发展,为高时空分辨率、高精度的南极绕极流研究提供了良好的条件^[2]。自 2009 年 3 月 17 日 GOCE (gravity field and steady-state ocean circulation explorer) 重力卫星探测任务成功实施之后,利用大地测量手段探测海洋环流进入了一个崭新的阶段。研究表明,新的 GOCE 重力场模型在海洋环流探测方面较以往的 GRACE 及其联合重力场模型具有较为明显的优势^[3-4]。Knudsen 等 (2011) 和 Albertella 等 (2012) 都分别利用 GOCE 和 GRACE 重力场模型分析了南极绕极流,结果表明 GOCE 结果优于 GRACE 的结果^[5-6],但受制于 GOCE 重力场模型中 GOCE 数据的时间长度,其结果较多源数据同化模型 Max09 有较明显的差异。

2013 年 3 月,ESA 发布了最新的纯 GOCE 重力场模型 GO_CONS_GCF_2_TIM_R4 (以下简称 GOCE-TIM4),利用该模型有望进一步提高海洋环流探测的能力。本文基于此模型,联合平

均海平面高模型 WHU2009 计算南极稳态海面地形,然后根据地转平衡方程确定南极绕极流,并与 GRACE、多源数据同化模型及海洋实测数据确定的结果进行了验证比较分析,为研究南极绕极流及其变化提供了高精度的参考模型。

1 稳态海面地形

1.1 模型选择

1) 平均海平面高模型

不断发展的卫星测高技术提供了高精度、高分辨率的海平面高度值^[7]。采用多源多代卫星测量数据确定的精细平均海平面高模型 WHU2009。WHU2009 全球平均海平面高模型由武汉大学研制而成^[8],空间分辨率为 $2' \times 2'$,其精度优于国际常用模型 CLS01。

2) 重力场模型

采用 2013 年最新的 250 阶次 GOCE-TIM4 纯 GOCE 重力场模型,该模型利用了 26.5 个月 (2009-11-01~2012-06-19) 的 GOCE 数据,采用时域法解算重力场^[9],参考潮汐系统为 tide free,是目前精度最高,有效数据周期最长的纯 GOCE

收稿日期:2013-07-12。

项目来源:国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB957703);地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室开放基金资助项目(201323);地球空间环境与大地测量教育部重点实验室测绘基础研究基金资助项目(11-02-07)。

重力场模型。

1.2 数据处理

利用大地测量学方法计算南极绕极流等海洋表层地转流的关键是确定高精度的稳态海面地形 (mean dynamic topography, MDT), MDT 定义为平均海平面高和大地水准面高之差。由于平均海平面高模型一般以空间格网的形式表示,并且只定义在海洋上,而大地水准面通常以球谐系数的形式表示,因此要计算两者的差值必须将其中一者转换到另一者的域中,通常有球谐函数法(谱域中求解)和直接法(空间域中求解)两种计算方法^[10]。对于局部海域,直接法具有计算方便、效率高等特点,且不需对陆地上的点进行补值,本文采用直接法计算南极附近海域的 MDT。计算时,需要将平均海平面高模型转至与大地水准面模型相同的空间尺度,还需将大地水准面进行潮汐系统转换和基准变换,以保证与平均海平面高相同的潮汐系统(mean tide)和参考椭球(T/P 参考椭球)。

影响 MDT 精度的主要误差源包括截断误差(omission error)和代表误差(commission error),前者是由平均海面高和大地水准面空间尺度不一致引起的,后者是重力场模型本身所具有的误差。受上述两种误差源的影响,直接得到的 MDT 初始估计值将含有大量高频噪声。为了获得高质量的 MDT 结果,通常采用一定的滤波方法对其进行降噪,本文采用 200 km 半径的高斯滤波^[11]对 MDT 初始估计值进行平滑处理,高斯滤波是一种低通滤波技术,其作用是让 MDT 的低频成份通过,滤过高频成分,处理结果见图 1。

2 南极绕极流的确定

忽略加速度、摩擦力以及大气的水平压力梯度时,则可利用 MDT 计算海洋表层地转流^[12]:

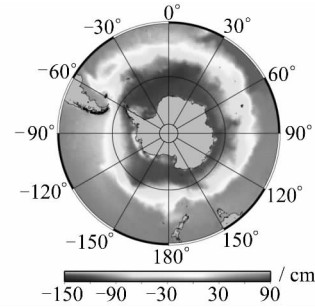


图 1 经 200 km 高斯滤波后的 GOCE-TIM4 MDT 结果
Fig. 1 GOCE-TIM4 MDT with 200 km Filter Radius

$$\left. \begin{aligned} u &= -\frac{g}{fR} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \\ v &= \frac{g}{fR \cos \theta} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, u 、 v 分别表示地转流的東西分量和南北分量; $f = 2\omega_e \sin \theta$ 为科式力系数; ω_e 为地球自转角速度; R 为地球平均半径; φ 和 λ 分别表示纬度和经度; g 为重力加速度; ζ 表示 MDT。基于 GOCE-TIM4 MDT, 利用式(1)计算了相应的南极绕极流, 如图 2(a)所示。

图 2(a)中的两条灰色线分别为利用海洋实测数据确定的 SAF (subantarctic front) 和 PF (polar front) 锋面^[13], 尽管 GOCE-TIM4 的南极绕极流结果与 Orsi 等确定的 ACC 锋面相比具有一定的北向偏移, 但其流幅的变化与 SAF、PF 锋面具有较好的一致性。南极绕极流的主流是自西向东运动的风生漂流, 然而由于西风并非绝对稳定, 同时南极绕极流受海底地形起伏以及与陆地之间的距离变化等因素的影响, 导致其并非平行纬向流动。由图 2(a)可知, GOCE-TIM4 确定的南极绕极流的平均速度约为 20 cm/s, 并且在印度洋南部的凯尔盖朗群岛 (Kerguelen Islands) 附近流速整体最强, 此处也是厄加勒斯回流 (The Agulhas Return Current) 和南极绕极流的交汇处, 这与已知研究结果保持一致 (Knudsen 等, 2011)。本文结果在南极大陆沿岸表现出了较强的

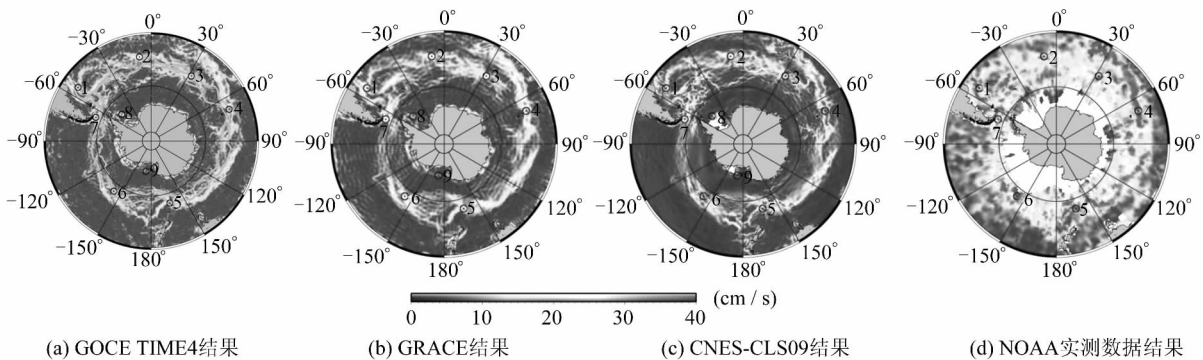


图 2 不同模型的南极绕极流结果

Fig. 2 Geostrophic Velocities from Different Models in the ACC Region

洋流速度,可能是由于近岸处高斯滤波效率较低引起的噪声误差。

3 比较分析

为了评价本文结果的真实性与可靠性,分别与 GRACE、多源数据同化模型和海洋实测数据结果进行比较分析。其中,纯 GRACE 结果由本文计算得到,处理方法同上,采用了 7 a 数据的 ITG-GRACE 2010S 纯 GRACE 重力场模型^[14](最高阶次为 180)与 WHU2009 平均海面高模型,经 280 km 半径的高斯滤波和地转平衡计算后确定了南极绕极流;多源数据同化模型结果为 CNES-CLS09 MDT 的南极绕极流结果^[15];海洋实测数据结果选择 NOAA 提供的利用浮标等海洋现场观测数据确定的全球海洋表层流场模型^[16]。图 2(b)~2(d)分别为三者的南极绕极流结果,对比图 2(a),图 2(b)~2(d)与 GOCE-TIM4 南极绕极流结果在大尺度上具有良好的相似性,整体流幅保持一致,但不同模型的速度差异较为明显,其中 GOCE-TIM4 速度明显高于 GRACE 结果,与 CNES-CLS09 较为接近但低于 NOAA 结果。尽管采用了更大滤波半径的高斯滤波,GRACE 结果仍然存有大量的条纹误差,主要是 GRACE 卫星轨道设计缺陷所导致的;而同样采用了 GRACE 重力场模型的 CNES-CLS09 结果却没有明显噪声,是因为 CNES-CLS09 采用直接法处理卫星资料模型时,重点关注 MDT 中的长波信息,采用了 500 km 半径的高斯滤波,其短波信息由海洋现场观测数据恢复。

本文分别统计了南极绕极流中 9 个特征区域的速度(图 2 中的 1~9),如表 1 所示。在南美洲东侧,绕极流北边界(SAF)表现为北向突起,在绕极流 SAF 锋面的最北端区域 1,NOAA 实测数据结果达 41.1 cm/s,而 GRACE 结果最弱,仅为 14.8 cm/s,GOCE-TIM4 结果略强于 CNES-CLS09;绕极流在穿过大西洋时明显向北延伸,在区域 2,GOCE-TIM4 结果为 26.3 cm/s,与 CNES-CLS09 结果较为接近且弱于 NOAA 实测数据的 33.3 cm/s;绕极流的南北边界 PF 和 SAF 在区域 3 接近于重合,即此处绕极流最为狭窄,该区域 GOCE-TIM4 结果为 30.1 cm/s,仍强于 GRACE 但弱于 CNES-CLS09 和 NOAA 结果;在厄加勒斯回流与绕极流交汇的区域 4,4 种模型结果的整体流速均为最强,GOCE-TIM4 结果接近 40 cm/s,而 GRACE 仅为 31.6 cm/s,均弱于

NOAA 实测数据和 CNES-CLS09 的结果;由于新西兰边界流的影响,绕极流穿过新西兰岛南部海域时速度减弱,4 种结果在区域 5 的东西两侧均表现出了洋流速度的变化趋势,但 GRACE 趋势较不明显;在经区域 6 时,绕极流速度增强后又迅速减弱,且流幅逐渐变窄,CNES-CLS09 和 NOAA 实测数据结果均达到流速峰值,而 GOCE-TIM4 和 GRACE 的结果则较区域 5 有所降低,但该区域的整体流速不如区域 4;环流在穿过德雷克海峡时,南美大陆南端迫使环流一部分沿智利海岸北上,另一部分向东北偏向后继续东流,表现为 SAF 锋面向北突起至区域 1,PF 锋面则偏向东北与向南折回后的 SAF 锋面汇合,在南美大陆南端的区域 7,4 种结果较为接近。在绕极流南边界以南的亚极区,还存在着威德尔旋回(Weddel Gyre)和罗斯旋回(Ross Gyre)两个著名的亚极区环流(区域 8、9),此区域 NOAA 实测数据结果缺失,GOCE-TIM4 结果明显强于 GRACE 和 CNES-CLS09 的结果。在大中尺度上,4 种模型所确定的南极绕极流具有一定的相似性,但不同模型结果的速度差异明显。若将 NOAA 实测数据结果视为真实值,CNES-CLS09 在开阔海域与真实值最为接近,但在近岸或岛屿附近海域,由于采用的海洋现场数据较少并且其采用的卫星资料模型精度不如本文所采用的模型,其结果弱于 GOCE-TIM4 结果,而 GRACE 在整体速度上均小于 GOCE-TIM4 结果,并且与 NOAA 实测数据结果偏差较大。

表 1 不同模型结果在各特征区域的速度统计/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Tab. 1 Geostrophic Velocities at Nine Regions from Different Models/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

| | Lat | Lon | GOCE | GRACE | CLS09 | NOAA |
|---|-----|------|------|-------|-------|------|
| 1 | -42 | -54 | 29.7 | 14.8 | 26.6 | 41.1 |
| 2 | -45 | -8 | 26.3 | 20.5 | 29.7 | 33.3 |
| 3 | -49 | 32 | 30.1 | 23.6 | 34.0 | 43.0 |
| 4 | -45 | 68 | 38.5 | 31.6 | 43.1 | 49.7 |
| 5 | -55 | 163 | 43.2 | 33.8 | 40.7 | 60.8 |
| 6 | -56 | -143 | 38.8 | 27.5 | 53.6 | 63.2 |
| 7 | -57 | -67 | 26.1 | 23.1 | 24.1 | 27.7 |
| 8 | -68 | -48 | 20.8 | 12.9 | 8.2 | - |
| 9 | -73 | -170 | 11.2 | 8.2 | 4.7 | - |

表 2 为不同模型确定的 MDT 及南极绕极流的差值统计结果,为避免粗差干扰,剔除了大于 3 倍标准差的模型差值。对于 ACC 区域的 MDT 差值结果,GRACE 表现出与 CNES-CLS09 模型更好的数值一致性,其 RMS 略优于 GOCE-TIM4,主要原因是 CNES-CLS09 模型和本文的

GRACE MDT 均采用了 GRACE 重力场模型,其大地水准面高具有更好的相关性;在南极绕极流 u 方向(东西方向)上,卫星数据结果与 NOAA 实测数据结果差异较大,同时 GOCE-TIM4 的结果

略优于 GRACE,而 v 方向(南北方向)上差异较小,是因为南极绕极流的主要能量集中在 u 方向,该方向的洋流速度量级更大。

表 2 不同模型的稳态海面地形及南极绕极流差值统计结果

Tab. 2 Statistics Summarising the Differences of MDT Height and Geostrophic Velocities Between Different Models

| Models | MDT/cm | | | $u/(cm \cdot s^{-1})$ | | | $v/(cm \cdot s^{-1})$ | | |
|-------------|--------|-----|-----|-----------------------|------|-----|-----------------------|-----|-----|
| | Mean | RMS | STD | Mean | RMS | STD | Mean | RMS | STD |
| GOCE-CLS09 | 2.3 | 5.3 | 4.8 | -0.2 | 3.8 | 3.8 | 0.1 | 3.9 | 3.9 |
| GRACE-CLS09 | 0.9 | 5.1 | 5.0 | -0.3 | 4.0 | 4.0 | -0.1 | 3.6 | 3.6 |
| GOCE-GRACE | 1.5 | 3.0 | 2.6 | 0.1 | 3.3 | 3.3 | 0.2 | 3.6 | 3.6 |
| GOCE-NOAA | | | | -7.58 | 10.1 | 6.7 | -2.0 | 5.3 | 4.9 |
| GRACE-NOAA | | | | -7.61 | 10.2 | 6.8 | -2.1 | 5.8 | 5.4 |

4 结 语

本文利用最新的纯 GOCE 重力场模型 GOCONS_GCF_2_TIM_R4,基于平均海平面高模型 WHU2009 计算了 ACC 区域的稳态海面地形及相应的南极绕极流,分别与 GRACE、多源数据同化模型和 NOAA 实测数据结果进行了比较分析。分析表明,本文确定的南极绕极流明显优于 GRACE 结果,在近岸的部分海域略优于 CNES-CLS09,但在开阔海域与实测数据结果有一定的差异。尽管 CNES-CLS09 所采用的卫星资料模型精度不如本文所用模型,但由于其在开阔海域采用了大量的现场海洋实测数据,所以其开阔海域的结果略优于本文模型,但与 Knudsen(2011)结果相比,本文缩小了与同化模型结果的差距。相信在不久的将来,联合高精度平均海平面高模型,更长时间跨度数据确定的 GOCE 重力场模型及水文、浮标等现场海洋实测数据,基于多源数据同化的思想探测海洋环流,可以在更高的精度和分辨率水平上实现对中小尺度洋流的研究。

参 考 文 献

- [1] Zhang Linlin, Sun Che, Hu Dunxi. Interannual Variability of the Antarctic Circumpolar Current Strength Based on Merged Altimeter Data[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(16): 2 015-2 021
- [2] 张子占,陆洋,许厚泽,等. 联合卫星重力和卫星测高确定南极绕极流[J]. 极地研究, 2003, 20(1): 14-22
- [3] Janjić T, Schroter J, Savcenko R, et al. Impact of Combining GRACE and GOCE Gravity Data on Ocean Circulation Estimates[J]. Ocean Sci. Discuss, 2011, 8: 1 535-1 573
- [4] Bingham R, Knudsen P, Andersen O, et al. An In-

- itial Estimate of the North Atlantic Steady-state Geostrophic Circulation from GOCE[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38: L01606
- [5] Knudsen P, Bingham R, Andersen O, et al. A Global Mean Dynamic Topography and Ocean Circulation Estimation Using a Preliminary GOCE Gravity Model[J]. J Geod, 2011, 85: 861-879
- [6] Albertella A, Savcenko R, Janjic T, et al. High Resolution Dynamic Ocean Topography in the Southern Ocean from GOCE[J]. Geophys. J. Int., 2012, 190: 922-930
- [7] 李建成,姜卫平,章磊. 联合多种测高数据建立高分辨率中国海平均海面高模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(1): 40-44
- [8] 金涛勇,李建成,姜卫平,等. 基于多源卫星测高数据的新一代全球平均海面高模型[J]. 测绘学报, 2011, 40(6): 723-729
- [9] Roland P, Sean B, Federica M, et al. First GOCE Gravity Field Models Derived by Three Different Approaches[J]. J Geod, 2011, 85: 819-843
- [10] Rory J, Bingham R, Keith H, et al. Calculating the Ocean's Mean Dynamic Topography from a Mean Sea Surface and a Geoid[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25: 1 808-1 822
- [11] 邓凯亮,暴景阳,章传银,等. 联合多代卫星测高数据确定中国近海稳态海面地形模型[J]. 测绘学报, 2009, 38(2): 114-119
- [12] Zhang Zizhan, Lu Yang, Hsu H. Detecting Surface Geostrophic Currents Using Wavelet Filter from Satellite Geodesy[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(6): 918-926
- [13] Orsi A H, Whitworth T, Nowlin W D Jr. On the Meridional Extent and Fronts of the Antarctic Circumpolar Current[J]. Deep-Sea Res, 1995, 42: 641-673
- [14] Torsten M, Annette E, Enrico K, et al. ITG-GRACE: Global Static and Temporal Gravity Field

- Models from GRACE Data[M]//Flechtner F, Gruber T, Guntner A, et al. System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques Advanced Technologies in Earth Sciences, Berlin: Springer, 2010: 159-168
- [15] Rio M H, Guinehut S, Larnicol G. New CNES-CLS09 Global Mean Dynamic Topography Computed from the Combination of GRACE Data, Altimetry, and In-situ Measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116: C07018
- [16] Lumpkin R, Garraffo Z. Evaluating the Decomposition of Tropical Atlantic Drifter Observations[J]. J. Atmos. Oceanic Techn, 2005, 22(9): 1 403-1 415
- 第一作者简介:彭利峰,博士生,主要从事卫星大地测量学研究。
E-mail: lfpeng@whu.edu.cn

The Antarctic Circumpolar Current Derived from the Newest GOCE Gravity Field Model

PENG Lifeng¹ JIANG Weiping¹ JIN Taoyong² ZHAO Qian¹

(1 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The Antarctic Circumpolar Current (ACC) is an important factor effecting global ocean and climate systems. Based on the WHU2009 mean sea surface height model derived from multi-altimetric data, the newest satellite-only GOCE gravity field model GO_CONS_GCF_2_TIM_R4 is used to determine the Antarctic Circumpolar Current through the geostrophic balance equation, the trend of its width variations is consistent with the Subantarctic and Polar fronts of the ACC derived from in situ measurements. To confirm that the ACC results in this paper are reliable, three different types of models were compared with our model. Comparative results show that: the difference between our model and the in-situ measurements provided by NOAA was 10.1 cm/s in u direction and 5.3 cm/s in v direction; The ACC results presented in this paper are consistent with the CNES-CLS09 model and the NOAA results at the large scale, as well as superior to the result from GRACE, and also slightly better than CNES-CLS09 in offshore areas. In addition, some meso-scale eddies like the Weddel Gyre and Ross Gyre are also determined from the ACC results presented in this paper.

Key words: Antarctic Circumpolar Current; mean dynamic topography; ocean current; Gaussian filter

About the first author: PENG Lifeng, Ph D candidate, majors in satellite geodesy.

E-mail: lfpeng@whu.edu.cn

第五届中国卫星导航学术年会 (CSNC 2014)将在南京召开

第五届中国卫星导航学术年会将于2014年5月在中国南京召开,该年会涵盖学术交流、高端论坛、展览展示和科学普及等内容。中国卫星导航学术年会(China Satellite Navigation Conference, CSNC)是一个开放的学术交流平台,旨在加强学术创新,促进卫星导航系统的合作与交流;加强技术创新,促进卫星导航系统的工程建设;加强理论创新,促进卫星导航理论进步;加强应用创新,促进卫星导航产业的科学发展。