

南极 Amery 冰架近海 Envisat 测高 波形重构海面高评价

赵 健^{1,2,3}, 沈云中^{1,3}

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;
3. 同济大学 空间信息科学及可持续发展应用中心, 上海 200092)

摘要: 波形重构能够有效改善近岸海域卫星测高数据精度。以南极 Amery 冰架附近海域为研究区域, 采用 OCOG, Threshold, β -5 和 Sea-ice 波形重构算法对 Envisat 高度计 4 条轨迹的测高波形数据进行了计算分析, 并对重构后的海面高精度进行评价。结果表明, Threshold 和 Sea-ice 算法能显著提高重构后海面高的精度, 其中 Sea-ice 算法的重构精度最高, Threshold 算法的精度也较好, 这两种算法的结果都比较稳定, 均适合于南极区域近海的测高波形重构。

关键词: 卫星测高; 波形重构; Amery 冰架; 近岸海域

中图分类号: P715

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)03-0071-06

Assessment of Waveform Retracked Envisat Altimetry Sea Surface Heights Near Antarctic Amery Ice Shelf Coastal Ocean

Zhao Jian^{1,2,3}, Shen Yunzhong^{1,3}

(1. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;

3. Center for Spatial Information Science and Sustainable Development, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Waveform retracking can effectively improve the accuracy of sea surface height (SSH) measurements of the satellite altimetry. The Offset Center of Gravity (OCOG), Threshold, β -5 parameter and Sea-ice retracking algorithms were used to retrack the Envisat waveform data over Antarctic Amery Ice Shelf coastal ocean and then the accuracy of retracked SSHs was assessed by comparing the retracked SSHs with Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) geoid. The results show that the quality of the SSH measurements can be improved by Threshold and Sea-ice retracking algorithms, among which the accuracy of Sea-ice algorithm is the highest and the Threshold algorithm also performs better. In addition, both algorithms can have very stable results and they are more suitable for the Envisat waveform retracking over Antarctic coastal ocean.

Key words: Satellite altimetry; waveform retracking; Amery Ice Shelf; coastal ocean

卫星测高技术能在全局范围内准确提供星下点瞬时平均海平面高度的观测值, 在深海区域测得海面高的精度可以达到 $\pm 2 \sim 3$ cm, 其观测数据被广泛应用于海平面变化、地球重力场、海底地形、海洋环流等方面的研究^[1]。1992 年以来, 先后有 T/P、ERS-1/2、GFO、Envisat、Jason-1/2 等测高卫星投入运行, 中国自行研制的首颗海洋动力环境卫星 HY-2 也已于 2011 年 8 月成功发射^[2]。根据高度计数据的质量控制条件, 离岸

收稿日期: 2012-06-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB957700); 国家自然科学基金项目(41074018, 40874016)

作者简介: 赵 健(1981—), 男, 山东齐河人, 讲师, 博士研究生, 主要从事卫星测高及海平面变化等方面的研究。

E-mail: zhjianupc@163.com

约 20 km 以内的近岸海域大部分测高数据均不可用,但近岸海域的测高数据仍包含了大量有价值的信息。造成近岸海域测高数据无法使用的原因主要有两方面:一是高度计在近岸海域的回波波形受陆地回波的污染,无法精确提供卫星与星下点之间的距离,影响到离岸约 20 km 的范围;二是近海测高校正量,如大气湿对流层、海洋潮汐以及大气高频因数等校正不准确^[3]。

目前,欧空局(European Space Agency, ESA)的 COASTALT 项目和法国航天局(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)的 PISTACH 项目旨在通过区域性的潮汐和大气逆压模型以及多颗卫星的轨道校正,研究和建立适用于近海的高度计数据处理方法,重新处理以往测高卫星在近海的历史数据,生成新的数据产品^[4]。

Envisat 为 ESA 于 2002 年 3 月发射的太阳同步卫星,是 ERS-1/2 的后续卫星,其主要载荷之一为高度计 RA-2 (Radar Altimetry-2),轨道高度 800 km,轨道倾角 98°,重复周期 35 天,测量频率 Ku 波段和 S 波段,在赤道上相邻轨道的间隔约为 80 km,18 Hz 测高波形数据对应地面轨迹上采样点间距约 400 m^[5]。为改善近岸海域的卫星测高数据质量,本文对 Envisat 在南极 Amery 冰架近岸海域的 18 Hz 测高波形数据进行波形重构研究,并与 Envisat 利用 Sea-ice 算法重构后的海面高及大地水准面高进行比较,评价波形重构后南极近岸海域海面高(sea surface height, SSH)的质量。

1 波形重构算法

卫星测高在远海的回波波形遵循 Brown 海洋模型,因此可获得高精度的测高距离。而近岸海域测高回波波形由于受到陆地地形、潮汐、地球物理因素和仪器响应等的影响,求得的距离包含较大误差,甚至错误。为了得到精确的测高距离观测值,必须对高度计原始波形数据重新处理,确定波形前缘中点的位置,对地球物理数据记录(geophysical data record, GDR)中给出的卫星到海面的距离进行改正,该过程称为波形重构^[6]。

波形重构算法主要用来确定波形实际前缘中点与波形预设门之间的偏移量,然后根据公式计算出距离改正值。目前常用的波形重构算法可分为函数拟合法和统计法两类,主要有 Beta 参数拟合法、重心偏移算法(offset center of gravity, OCOG)、阈值(threshold)算法等。

为提高近岸海域的卫星测高数据质量,近年来国内外许多学者对波形重构算法进行了大量研究。如鲍李峰、杨乐等^[1,3]分别利用 Beta-5 算法(β -5)、OCOG 算法等对中国南海区域 T/P、Jason-1 测高数据进行波形重构处理,并用于近海海平面变化的研究。郭金运等^[6-8]和 HWANG^[9-10]提出了多子波参数重构算法,并对阈值算法进行改进,从有多个上升沿的回波中提取子波形,再确定与大地水准面模型最合适的海面高。

Envisat 高度计 RA-2 发布的测高数据产品中 SGDR (sensor geophysical data record)为传感器数据,它除了 GDR 数据外,还包含离散傅里叶变换和快速傅里叶变换两种算法分别处理得到的 18 Hz 波形数据。GDR 数据中不仅包含常规数据,还包含了 Envisat 利用 Ice-1、Ice-2、Sea-ice 和 Ocean1 等 4 种波形重构算法改正后的海面高,但没有给出 4 种结果的比较说明以及在近岸海域海面上测高结果的选取标准。Ice-1 和 Ice-2 算法主要针对冰面回波进行波形重构;Sea-ice 算法针对海冰面回波进行波形重构;Ocean1 算法针对海洋面回波进行波形重构^[6]。

本文在研究已有波形重构算法的基础上,对南极 Amery 冰架近岸海域的 Envisat RA-2 18 Hz 测高波形数据采用 β -5、OCOG 和 Threshold 算法进行重构研究,并与 Envisat 利用 Sea-ice 算法重构的海面高及 Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)大地水准面高进行比较,对不同重构算法得到的海面高进行评价。

2 研究区域

Amery 冰架是南极三大冰架之一,也是东南极最大的冰架,是东南极内陆冰盖物质流向大西洋的主要通道。Amery 冰架由 Lambert 冰川盆地的冰流大量涌入而形成,冰架面积为 6.9 万 km²,冰流从不到 200 km 的狭窄冰架前缘排出,出口宽度仅为南极洲海岸线长度的 1/60,这使得该冰流系统活动较强。在目前全球气

候变暖的背景下,Amery 冰架对全球气候变化和海平面变化极为敏感^[11]。

选取 Envisat RA-2 高度计的 4 条轨迹(Pass)进行分析,如图 1 所示,分别为 Pass157,271,386,500。利用 4 种波形重构算法对 4 条轨迹的 18 Hz 测高回波波形进行波形重构,并将重构海面高与 EGM2008 大地水准面高进行对比,通过计算 IMP(improvement percentage)值判断重构结果的精度。

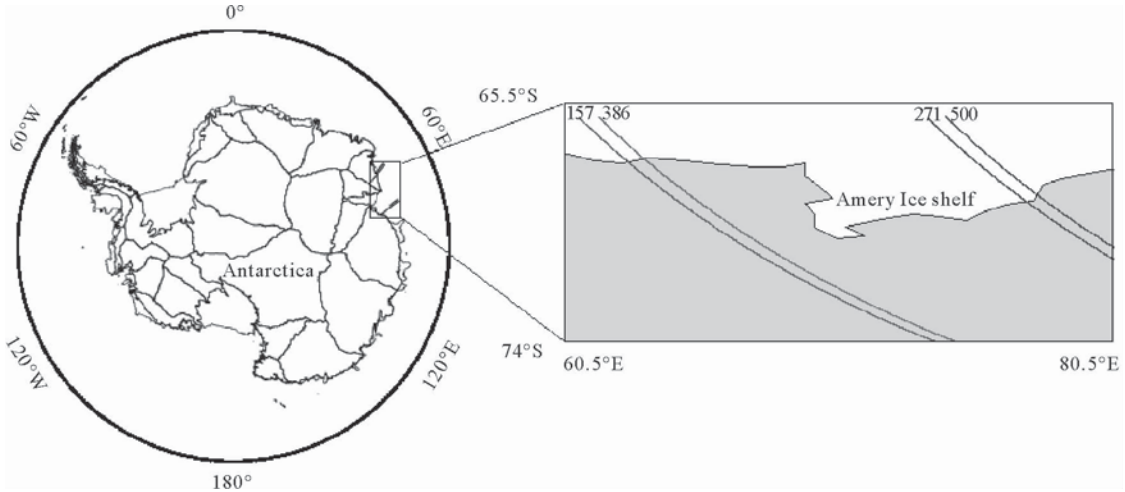


图 1 研究区域的 4 条 Envisat 轨迹图

Fig.1 The 4 passes of Envisat in the study area

3 计算过程及结果

利用 IMP 值来判断重构海面高精度的计算公式为^[9-10]：

$$IMP = \frac{\delta_{\text{raw}} - \delta_{\text{retracked}}}{\delta_{\text{raw}}} \times 100\% \quad (1)$$

其中： δ_{raw} 为重构前海面高与大地水准面高差值的标准差； $\delta_{\text{retracked}}$ 为重构后海面高与大地水准面高差值的标准差。若 IMP 为负值，表明波形重构后的海面高比重构前的海面高精度低。

δ_{raw} 的计算过程：根据重构前各条轨迹上每一点的海面高及大地水准面高，计算该点海面高与大地水准面高的差值 Δh ， δ_{raw} 为 Δh 的标准差，其计算公式为：

$$\delta_{\text{raw}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \Delta \bar{h})^2} \quad (2)$$

其中， $\Delta \bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i$ 。 $\delta_{\text{retracked}}$ 的计算方法与 δ_{raw} 类似，利用重构后的海面高计算与大地水准面高的差值。表 1 为 4 条轨迹重构前海面高与大地水准面高差值的均值 $\Delta \bar{h}$ 和标准差 δ_{raw} 。

表 1 4 条轨迹重构前海面高与大地水准面高差值的均值 ($\Delta \bar{h}$) 及标准差 (δ_{raw}) 表

Tab.1 Mean values and standard deviations of the differences between raw SSHs and geoidal heights of the 4 passes

Pass	经度范围	$\Delta \bar{h}/\text{m}$	$\delta_{\text{raw}}/\text{m}$
025-157	61.07°E~62.07°E	-1.682	0.199
035-271	74.01°E~75.0°E	-1.665	0.205
024-500	76.2°E~77.2°E	-1.701	0.217
045-386	62.27°E~63.17°E	-1.472	0.255

重构成功率指根据重构算法计算重构海面高的波形数占总波形数的百分比。表 2—表 5 给出了研究区域 4 条轨迹不同重构算法的成功率及 IMP 值,其中 Sea-ice 的结果由 Envisat GDR 数据中 Sea-ice 重构算法得到的 18 Hz 海面高计算得到,Threshold 算法的阈值选用 50%。除 β -5 参数法在研究区域的波形重构成功率不足 100%外,其他算法的重构成功率均为 100%,但不同重构算法的标准差差别较大。其中 OCOG 算法标准差最大,主要是由于该算法使用了全部波形数据,当波形位于海冰面时,由于海面、冰面属性不同,导致波形中含有较大的噪声,因此该算法一般用来为其他算法求定初始值。 β -5 算法采用基于模型的拟合算法,虽然该算法在海冰区域重构成功率相对偏低,但由于 4 条轨迹范围较小,因此 IMP 值均有提高。在 OCOG 算法基础上改进得到的 Threshold 算法在 4 条轨迹表现较为稳定,除在轨迹 025-157 的 IMP 值不足 10%外,其余 3 条轨迹均超过 20%;且与 GDR 数据中专门针对海冰面回波进行重构的 Sea-ice 算法结果较为一致,在轨迹 035-271 的 IMP 值甚至超过了 Sea-ice 算法。总体而言,Threshold 算法与 Sea-ice 算法计算得到的 IMP 值优于 β -5 参数算法与 OCOG 算法,表明在研究区域这两种算法的重构效果最好。

表 2 轨迹 025-157 波形重构结果对比表 (61.07°E~62.07°E)

Tab. 2 Statistics of waveform retracking of pass 025-157 over 61.07°E~62.07°E

Pass	重构方法	总波形个数	重构成功率/%	$\delta_{\text{retracked}}/\text{m}$	IMP/%
025-157	β -5	305	100.0	0.178	10.6
	OCOG	305	100.0	0.253	-27.1
	Threshold	305	100.0	0.180	9.5
	Sea-ice	305	100.0	0.127	36.2

表 3 轨迹 035-271 波形重构结果对比表 (74.01°E~75.0°E)

Tab. 3 Statistics of waveform retracking of pass 035-271 over 74.01°E~75.0°E

Pass	重构方法	总波形个数	重构成功率/%	$\delta_{\text{retracked}}/\text{m}$	IMP/%
035-271	β -5	302	100.0	0.148	27.8
	OCOG	302	100.0	0.228	-11.2
	Threshold	302	100.0	0.137	33.2
	Sea-ice	302	100.0	0.144	29.8

表 4 轨迹 024-500 波形重构结果对比表 (76.2°E~77.2°E)

Tab. 4 Statistics of waveform retracking of pass 024-500 over 76.2°E~77.2°E

Pass	重构方法	总波形个数	重构成功率/%	$\delta_{\text{retracked}}/\text{m}$	IMP/%
024-500	β -5	254	92.0	0.172	20.7
	OCOG	276	100.0	0.314	-44.7
	Threshold	276	100.0	0.170	21.7
	Sea-ice	276	100.0	0.140	35.5

表 5 轨迹 045-386 波形重构结果对比表 (62.27°E~63.17°E)

Tab. 5 Statistics of waveform retracking of pass 045-386 over 62.27°E~63.17°E

Pass	重构方法	总波形个数	重构成功率/%	$\delta_{\text{retracked}}/\text{m}$	IMP/%
045-386	β -5	227	85.0	0.238	6.7
	OCOG	267	100.0	0.354	-38.8
	Threshold	267	100.0	0.198	22.4
	Sea-ice	267	100.0	0.169	33.7

除了 IMP 值外,还应考虑波形重构后海面高的平滑度,即相邻点海面高之间的差值要小,不能产生突变,应保持良好的光滑性^[12]。图 2—图 5 是利用几种重构算法计算得到的海面高与 EGM 2008 大地水准面高及 Envisat 利用 Sea-ice 算法重构海面高的对比。由图中可以看出,Sea-ice 算法与 Threshold 算法得到的海面高最为平滑,其中 Threshold 算法重构后的海面高与大地水准面高更为相似,表明 Threshold 算法与 Sea-ice 算法是目前最适合该研究区域的重构算法。今后还可对 Threshold 算法进行进一步研究,如采用不同阈值参数、利用子波形阈值算法等^[6]计算重构海面高,从而进一步提高波形重构后海面高的质量。

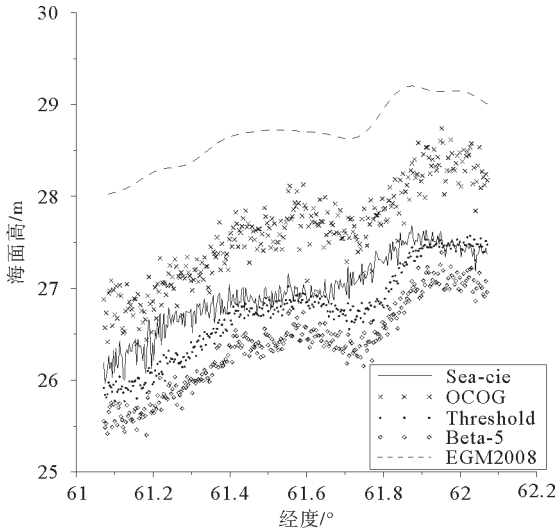


图 2 轨迹 025-157 波形重构海面高 SSH 与 EGM2008 大地水准面高的对比图 (61.07°E~62.07°E)

Fig. 2 Comparison of retracked SSHs and geoidal heights of pass 025-157 over 61.07°E~62.07°E

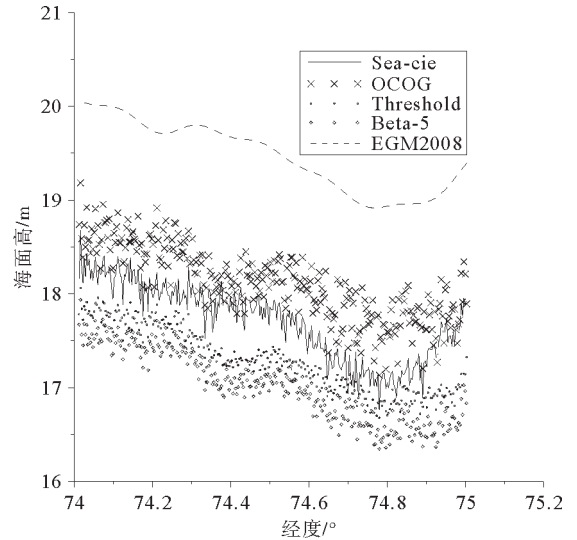


图 3 轨迹 035-271 波形重构后海面高 SSH 与 EGM2008 大地水准面高的对比图 (74.01°E~75.0°E)

Fig. 3 Comparison of retracked SSHs and geoidal heights of pass 035-271 over 74.01°E~75.0°E

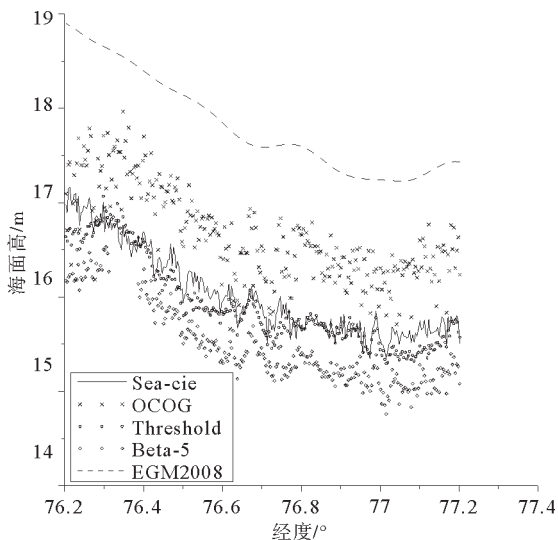


图 4 轨迹 024-500 波形重构后海面高 SSH 与 EGM2008 大地水准面高的对比图 (76.2°E~77.2°E)

Fig. 4 Comparison of retracked SSHs and geoidal heights of pass 024-500 over 76.2°E~77.2°E

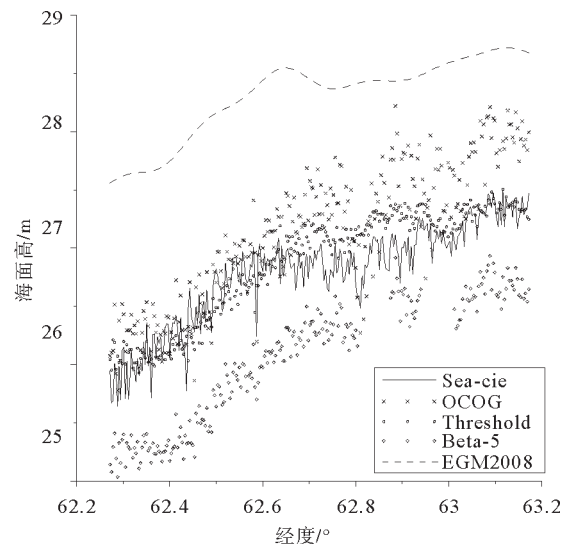


图 5 轨迹 045-386 波形重构后海面高 SSH 与 EGM2008 大地水准面高的对比图 (62.27°E~63.17°E)

Fig. 5 Comparison of retracked SSHs and geoidal heights of pass 045-386 over 62.27°E~63.17°E

4 结论

以南极 Amery 冰架附近海域为例,利用 OCOG, Threshold, β -5, Sea-ice 波形重构算法对 Envisat RA-2 测高波形进行重构研究,并对重构海面高进行评价。研究表明,采用合适的波形重构算法能够大大提高极地近岸海域的测高海面高数据质量,Sea-ice 算法和 Threshold 算法在研究区域的 4 条轨迹均取得较好的重构效果,且重构后海面高更光滑。由于 Amery 冰架附近海域复杂的海况,该区域的研究结果为极地近岸海域的波形重构提供了有价值的参考。波形重构能够有效改善极地近岸海域卫星测高数据质量,提高近岸海域测高数据的利用率,为近岸海域海平面变化、大地测量等研究提供更多有价值的信息。

致谢:感谢 ESA 提供 Envisat RA-2 SGDR 数据。

参考文献:

- [1] 鲍李峰,陆洋,许厚泽. 浅海区域 Topex/Poseidon 测高卫星数据波形重构方法[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 216-221.
Bao Lifeng, Lu Yang, Xu Houze. Waveform retracking of Topex/Poseidon altimeter in Chinese offshore[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2): 216-221.
- [2] 杨乐,林明森,张有广,等. 中国近岸海域高度计 JASON-1 测量数据的波形重构算法研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(6): 91-101.
Yang Le, Lin Mingsen, Zhang Youguang, et al. Improving the quality of JASON-1 altimetry data by waveform retracking in coastal waters off China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(6): 91-101.
- [3] CNES. Coastal and hydrology altimetry product (PISTACH) handbook [EB/OL]. (2010-10-04) [2012-05-16] <http://www.avisio.oceanobs.com/en/data/products/sea-surface-height-products/global/>.
- [4] ESA. European Space Agency-EnviSat RA2-MWR product handbook [EB/OL]. (2007-02-27) [2012-05-15] <http://envisat.esa.int/handbooks/ra2-mwr/>.
- [5] 郭金运,高永刚,常晓涛,等. 近岸海域 ENVISAT 卫星测高波形重定的 Threshold 优化算法[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 807-814.
Guo Jinyun, Gao Yonggang, Chang Xiaotao, et al. Optimal threshold algorithm of Envisat waveform retracking over coastal sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(4): 807-814.
- [6] 常晓涛,李建成,郭金运,等. 一种多前缘多阈值的波形重构算法[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1629-1634.
Chang Xiaotao, Li Jiancheng, Guo Jinyun, et al. A multi-leading edge and multi-threshold waveform retracker[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1629-1634.
- [7] Guo J Y, Gao Y G, Hwang C W, et al. A multi-subwaveform parametric retracker of the radar satellite altimetric waveform and recovery of gravity anomalies over coastal oceans[J]. Science China Earth Science, 2010, 53: 610-616.
- [8] Hwang C W, Guo J Y, Deng X L, et al. Coastal gravity anomalies from retracked Geosat/GM altimetry: Improvement, limitation and the role of airborne gravity data[J]. Journal of Geodesy, 2006, 80: 204-216.
- [9] Guo J Y, Hwang C W, Chang X T, et al. Improved threshold retracker for satellite altimeter waveform retracking over coastal sea[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16: 732-738.
- [10] 王亚凤,温家洪,刘吉英,等. Amery 冰架 DEM 及其海洋冰分布研究[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(6): 71-74.
Wang Yafeng, Wen Jiahong, Liu Jiying, et al. DEM of Amery ice shelf and distribution of its marine ice[J]. Geography and Geo-Information Science, 2006, 22(6): 71-74.
- [11] Deng X L, Featherstone W, Hwang C W, et al. Estimation of contamination of ERS-2 and Poseidon satellite radar altimetry close to the coasts of Australia[J]. Marine Geodesy, 2002, 25(1): 249-271.
- [12] Deng X L. Improvement of geodetic parameter estimation in coastal regions from satellite radar altimetry[D]. Perth: Curtin University of Technology, 2004: 169-193.

(责任编辑:高丽华)