

李田^{1,2} 程晓^{1,2,3,4} 关真富^{1,3} 刘岩^{1,3,4}

基于 SAR 数据的南极冰山分布监测

摘要

随着全球气候变暖,冰架崩解事件的发生愈益频繁.冰架崩解产生的冰山是南极冰盖-冰架-海洋系统中活跃的重要组成部分,冰山的运动特征和时空分布对南大洋洋流循环、海洋生态以及水文系统有着非常重要的影响.因此利用卫星遥感监测冰山运动与变化信息,探究冰山崩解和消融过程,研究南极冰山分布,以及冰山和周围海洋环境之间的相互作用机制,是理解南极冰山变化与全球气候变化之间关系的关键.本文利用覆盖全南极海岸线的 ENVISAT ASAR 影像,基于简译软件的面向对象的多尺度图像分割算法实现了全南极近岸海域冰山对象的提取.利用 2006 年 8 月 63 期 ENVISAT ASAR 影像提取了 32 267 座面积大于 0.06 km² 的冰山,统计了冰山空间分布特征,研究发现南极小型冰山在全南极淡水输入中扮演着重要的作用.

关键词

南极;冰山;ENVISAT ASAR;多尺度分割

中图分类号 TN957.52;P941.6

文献标志码 A

收稿日期 2019-10-22

资助项目 国家自然科学基金(41830536,41676176,41676182,41406211);国家重点研发计划(2016YFA0600103)

作者简介

李田,女,博士生,研究方向为极地遥感. litiansky@foxmail.com

刘岩(通信作者),女,博士,副教授,研究方向为极地遥感.liuyan2013@bnu.edu.cn

0 引言

南极冰山作为南大洋中重要的移动淡水水源,其时空分布对于南大洋的水文、生态将会产生重要的影响.除美国国家冰中心(National Ice Center, NIC)和杨百翰大学(BYU)对南极冰山进行定期监测外,受到遥感数据的限制,关于南极冰山分布的研究多集中在区域尺度上,例如 Gladstone 等^[1]利用 ERS-1/2 SAR 数据监测南极威德尔海的冰山分布,Young 等^[2]利用 ERS-1 SAR 数据提取 50°~145°E 区间范围内的冰山分布,冰山提取的最小面积尺度为 0.06 km².全南极尺度下冰山分布研究主要集中在近几年,Wesche 等使用 1997 年 100 m 分辨率的 Radarsat-1 全南极镶嵌图数据(Radarsat-1 Antarctic Mapping Project, RAMP)提取全南极面积大于 0.3 km² 的冰山并获取了南极周边海域冰山分布特征^[3].该研究只是获取了某一时间段内的南极冰山分布状况,实际上冰山处于不间断运动过程中,因此需要在雷达影像的基础上发展运动对象自动跟踪算法对冰山进行连续变化监测.此外, Tournadre 等^[4]利用多源卫星高度计数据提取了南极 1992—2014 年期间小型冰山分布特征.

随着卫星遥感技术的不断发展,利用遥感数据定量评估冰山变化成为可能.冰山研究过去几十年时间内发展迅速,但是仍有许多问题亟待解决.从全球气候变化的角度来看,冰山崩解和底部消融之间的关系、冰山分布对海洋环境的影响以及冰山和海洋之间的相互作用机制都需要进行深入的研究,这不仅可以提高并完善海洋模式模拟结果,还可以为全球变暖背景下的冰架和海洋环流研究提供重要参考.

南极冰盖边缘被多个冰架衔接,除了冰架底部消融以外,冰架崩解是南极冰盖物质损失的主要形式^[5].冰架崩解形成冰山,冰架底部消融会在南极近岸海洋表层形成淡水层,冰山的运动和消融可以释放淡水并将淡水扩散至远离南极大陆的其他海域,会对南大洋水文、生态、洋流循环等产生影响.为了准确计算和模拟海洋动力过程,分析南极冰山的淡水释放量以及冰山对于海洋动力过程的影响,需要获取南极冰山在南大洋中的数量和面积的时空分布特征^[6-7].Wesche 等利用 Radarsat-1 全南极镶嵌图 RAMP AMM 数据研究全南极冰架前端裂隙纹理特征发现,冰架崩解产生的冰山形状和冰架裂隙结构有关,说明了海洋、海冰模式以及冰山动力过程的研究需要考虑全南极冰

1 北京师范大学 全球变化与地球系统科学研究院/遥感科学国家重点实验室,北京,100875

2 中山大学 测绘科学与技术学院,珠海,519000

3 中国高校极地联合研究中心,北京,100875

4 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海,519000

山尺寸的时空分布^[8].Tournadre 等研究发现冰山底部消融量和冰山二次崩解所产生的小型冰山总质量相比只占大约 15%,认为小型冰山的质量分布是南大洋淡水输入量计算的关键参数^[9].Tournadre 等在 ALTIBERG 计划的支持下利用 1992—2014 年期间的卫星高度计数据识别并提取了南极小型冰山(面积介于 0.1~8 km²)的地理位置、尺寸以及体积等物理参数,研究发现南极小型冰山的年际分布特征和大型冰山密切相关,小型冰山主要通过大型冰山二次崩解产生^[4].除小型冰山外,大型冰山的运动和分布对于南大洋海洋环境也有重要影响.Wesche 等基于雷达信号强度的阈值分析方法,使用 1997 年 9—10 月间的 Radarsat-1 RAMP 全南极镶嵌图数据提取了南极沿岸海域一共 6 912 个冰山对象,面积分布为 0.3~4 717.6 km²,该研究还分析了冰山尺寸在南极的空间分布特征,发现冰山面积空间分布存在很大的区域性差异,冰山主要聚集在大型冰山和易崩解的冰架附近^[3].该研究证明了合成孔径雷达数据 SAR 在冰山提取研究中的可靠性,但是受到 RAMP 数据空间覆盖度的限制,该研究只能提取距离南极海岸线 200 km 海域内的冰山对象.

ENVISAT 先进的合成孔径雷达(Advanced Synthetic Aperture Radar, ASAR)宽幅模式数据由于自身所具备的高辐照宽度,可以保证在 3 d 内覆盖南极沿岸一次,并且影像的覆盖范围最远可达到 60°S,为南极沿岸冰山识别和跟踪提供了基础.本文将在 Wesche 等^[3]研究的基础上,扩展研究区域,以 63 景 2006 年 8 月覆盖全南极海岸线的 ENVISAT ASAR 影像为例,基于简译软件的多尺度图像分割算法提取全南极近岸海域冰山对象,并分析冰山面积空间分布特征.

1 研究数据和预处理

欧空局(ESA)于 2002 年 3 月 1 日发射极轨卫星 ENVISAT,是欧洲建造的最大的环境卫星^[10],该卫星于 2012 年 4 月 8 日停止运行.ENVISAT 卫星搭载有 10 种探测设备,其中最大的设备是 C 波段的先进的合成孔径雷达 ASAR,可以对陆地、海洋、极地冰盖进行监测,拍摄高质量遥感影像^[11].ENVISAT ASAR 具有全天时、全天候、穿透性强、多种入射角、宽幅成像等优势^[10],ASAR 传感器具有 7 个入射角度和 5 种工作模式,包括 Image 成像模式、Global Monitoring 全球监测模式、Alternating Polarisation 交替

极化模式、Wave 波模式和 Wide Swath 宽幅模式.这 5 种工作模式中 Image、Wide Swath、Global Monitoring 和 Wave 4 种工作模式可以提供 HH 和 VV 极化影像,Alternating Polarisation 模式可以提供 HH、VV、HV 和 VH 4 种极化方式的影像^[10].通过组合极化方式和入射角,ASAR 传感器可以提供 9 m×6 m、30 m×30 m、150 m×150 m、450 m×450 m、1 800 m×1 800 m 等分辨率的产品^[12].WSM 宽幅模式采用 ScanSAR 技术可以达到 405 km 的辐照宽度,大约 3 d 可以覆盖全南极海岸线一次,ASAR 广阔的地面覆盖能力可以为南极冰山的研究提供便利^[13-14].HH 极化模式适合于区分海冰和海水,可以提高这两种目标的识别精度^[15].因此本文使用 ENVISAT ASAR WSM 宽幅模式 Level 1B HH 极化数据,该数据的空间分辨率为 150 m,地理编码后两个像素之间的间距为 75 m^[16].

ENVISAT ASAR WSM 数据预处理过程首先要从原始的 N1 格式数据中提取地理信息,建立数据的空间索引^[16],在数据索引的基础上根据研究目标选取 ASAR 影像,利用从 ESA 网站下载的精密轨道文件通过 ENVI 软件进行辐射校正和几何纠正.通过对比 RADARSAT 影像和进行几何纠正后的 ASA_WSM_1P 影像的空间位置,发现进行预处理后的 ASAR 影像空间位置精度优于 75 m(1 个像元)^[14].

全南极冰山分布特征研究和分析,选取了 2006 年 8 月覆盖全南极海岸线的 63 景 ENVISAT ASAR 影像,数据分布如图 1 所示.

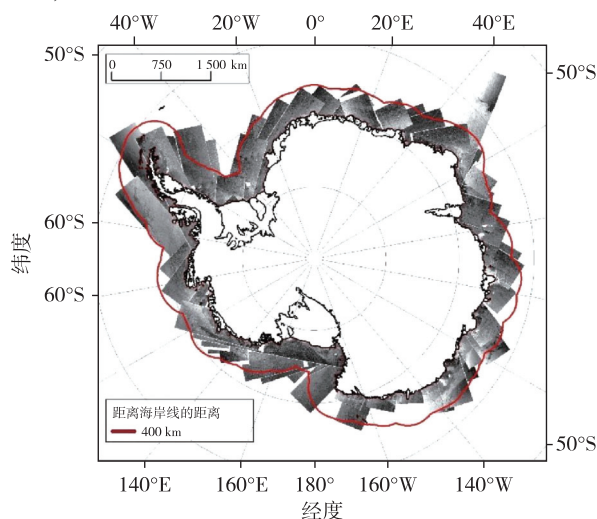


图 1 2006 年 8 月全南极 ENVISAT ASAR 影像分布,图中红色实线表示离南极海岸线 400 km 的缓冲区
Fig. 1 Distribution of the Antarctic coast in August 2006 based on ENVISAT ASAR image. The red solid line represents a buffer zone of 400 kilometers from the Antarctic coastline

2 冰山对象目标识别提取方法

基于 ENVISAT ASAR 的影像的冰山提取使用北京治元景行科技有限公司的简译软件(Easy Interpretation),所使用的图像分割方法为面向对象的多尺度分割方法.图像分割的本质是将 $M \times N$ 阵列的一幅数字影像划分为若干个互不交叠区域的过程.面向对象的多尺度图像分割原理是首先利用对象信息例如图像色调、形状、纹理和层次,结合类间信息进行图像分割.在此基础上,利用多尺度信息获取多尺度的分割结果,形成不同分辨率等级的图斑,其中大尺度分割形成的对象是由小尺度分割形成的对象组合而成.多尺度分割可以保证高度同质性的影像区域,可以在合适的尺度下对对象进行图像分割,选择的分割要素是影像亮度值.首先使用 MOA2009 海岸线数据对 ENVISAT ASAR 影像进行批量裁剪,获取海洋图层,然后选取几景不同的 ENVISAT ASAR 影像,手动随机选取 250 个冰山以获取冰山的平均亮度值作为图像分割的阈值,在简译软件中设置最大尺度数 3、尺度间隔 0.6、最大尺度 45 进行多尺度分割,对于部分过度分割的冰山对象,手动进行冰山对象合并.最终我们获取了 2006 年 8 月面积大于 0.06 km^2 (10 个像素)的冰山总数量为 32 267.不同日期的 ASAR 影像之间可能会存在影像重叠,对于重叠影像,通过人工目视解译判读不同日期影像重叠部分冰山之间的位移量和冰山形状,删除冗余冰山.如图 2 所示,图 2a 和图 2c 分别为 Stanjukovicha 冰川和 Thwaites 冰川雷达影像,图

2b 和图 2d 中黑色区域为使用简译软件提取的两条冰川前端海域冰山矢量.

3 全南极冰山数量分布特征分析

本文一共提取了 32 267 个冰山对象,冰山最小面积为 0.06 km^2 ,面积最大为 $3 695.96 \text{ km}^2$.按照冰山面积,本文将全南极冰山面积划分为 5 个尺度,分别为 A1 级别:冰山面积为 $[0.06 \ 1) \text{ km}^2$;A2 级别:冰山面积为 $[1 \ 10) \text{ km}^2$;A3 级别:冰山面积为 $[10 \ 100) \text{ km}^2$;A4 级别:冰山面积为 $[100 \ 1 000) \text{ km}^2$;A5 级别: $[1 000 \ 3 695.96] \text{ km}^2$.A1 ~ A5 不同面积尺度下的冰山数量分别为 28 202、3 886、137、33 和 9,分别占冰山总数的 87.4%、12.04%、0.42%、0.1%、0.03%(表 1,图 3),面积低于 10 km^2 的小型冰山数量在全南极冰山占比达到 99.44%.如表 1 所示,A1 等级冰山总面积为 $8 631 \text{ km}^2$,占全南极冰山总面积的 19%,说明除大型冰山外,小型冰山对南大洋淡水输入有着重要的贡献.

表 1 不同面积等级下冰山数量和面积

Table 1 Number and area of different sized Antarctic icebergs

等级	面积/ km^2	数量	百分比/%	总面积/ km^2
A1	$[0.06 \ 1]$	28 202	87.40	8 631
A2	$[1 \ 10)$	3 886	12.04	7 537
A3	$[10 \ 100)$	137	0.42	3 827
A4	$[100 \ 1 000)$	33	0.10	9 092
A5	$\geq 1 000$	9	0.03	17 412

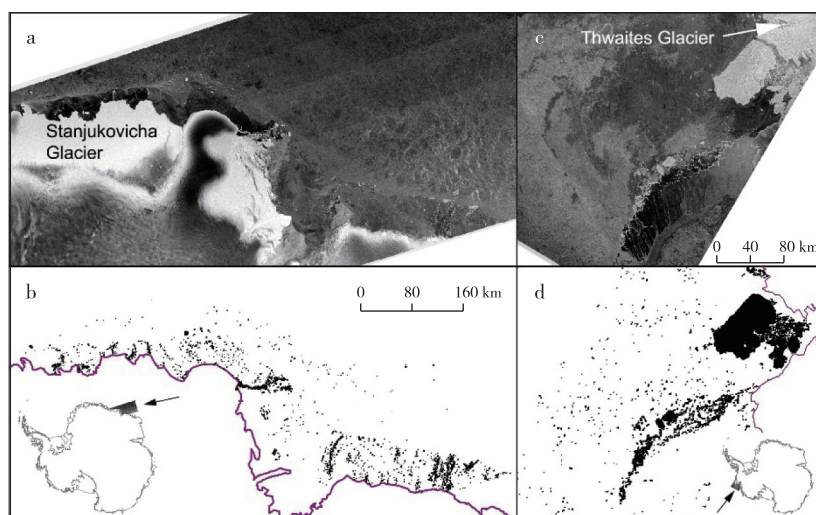


图 2 Stanjukovicha 和 Thwaites 冰川前端海域冰山对象提取结果(a),(c)分别为 Stanjukovicha 和 Thwaites 冰川雷达影像,(b),(d)分别为两条冰川前端海域冰山对象提取结果

Fig. 2 Icebergs extracted in front of the Stanjukovicha Glacier and Thwaites Glacier, (a),(c) for ENVISAT ASAR images, and (b),(d) for the extracted icebergs

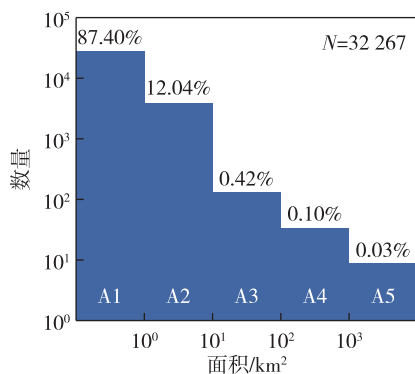


图3 南极冰山面积和数量分布

Fig. 3 Area and number distribution of Antarctic icebergs

图4为不同面积尺度的冰山在南极海岸海域的空间分布特征,可以看出不同面积尺度的冰山分布具有很强的区域性特征.面积小于 10 km^2 的A1和A2等级的小型冰山在南极近岸海域均有分布,位于A3~A5等级的大中型冰山则零散分布于南极近岸海域,冰山位置可能和冰架位置有关.此外,通过研究发现不同面积尺度内的冰山都主要聚集在离南极海岸 250 km 内的海域中(图5),在离南极海岸线 100 km 的海域内的冰山数量最高,在该区域大中型冰山的数量也最多,这样进一步证明了Tournadre等^[3]和Wesche等^[4]关于小型冰山主要由大型冰山二次崩解产生的结论.

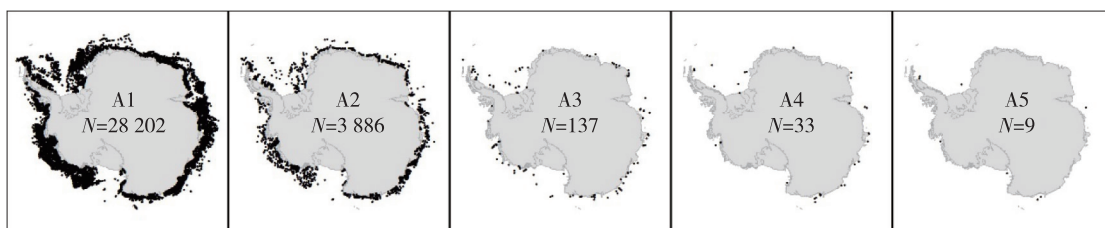


图4 不同面积尺度的冰山在南极沿岸海域中的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of icebergs with different sizes near the Antarctic coastline

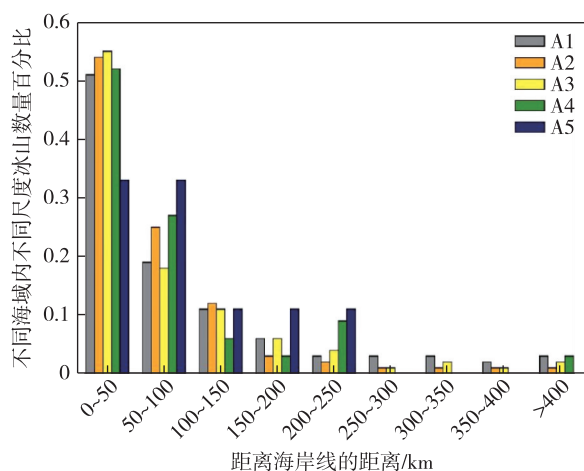


图5 不同面积尺度的冰山距南极海岸线的距离分布

Fig. 5 Percentage of different sized iceberg numbers distributed with distance from the Antarctic coastline

海域的ENVISAT ASAR影像,利用多尺度遥感图像分割算法提取全南极冰山分布.本文一共提取了32 267座面积大于 0.06 km^2 的冰山,研究发现南极冰山分布具有一定的区域性特征,面积小于 1 km^2 的冰山数量占全南极总冰山数量的87.4%,总面积占全南极冰山总面积的19%,这意味着小型冰山在全南极淡水输入量中扮演着重要的角色.本文提取的冰山最小尺度为 0.06 km^2 ,远小于Wesche等^[3]提取的最小尺度 0.3 km^2 ,本文进一步佐证了前人关于南极小型冰山分布的研究结果.目前关于南极冰山年际和季节性变化的研究较为缺乏,在2005—2012年ENVISAT ASAR数据的支撑下,冰山分布的时空变化有待进一步研究.

参考文献

References

- [1] Gladstone R, Bigg G R. Satellite tracking of icebergs in the Weddell Sea [J]. Antarctic Science, 2002, 14 (3): 278-287
- [2] Young N W, Turner D, Hyland G, et al. Near-coastal iceberg distributions in East Antarctica, $50\text{-}145^\circ\text{ E}$ [J]. Annals of Glaciology, 1998, 27: 68-74
- [3] Wesche C, Dierking W. Near-coastal circum-Antarctic

4 结论与讨论

全南极冰山分布对于海洋动力学机制和海洋模式研究有着重要的意义,本文在Wesche等^[3]利用1997 RAMP南极Radarsat-1雷达影像镶嵌图的基础上,扩展研究区域,使用2006年8月覆盖南极近岸

- iceberg size distributions determined from Synthetic Aperture Radar images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156:561-569
- [4] Tournadre J, Bouhier N, Girard-Ardhuin F, et al. Antarctic icebergs distributions 1992—2014 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(1):327-349
- [5] Depoorter M A, Bamber J L, Griggs J A, et al. Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves [J]. *Nature*, 2013, 502(7469):89-92
- [6] Gladstone R M, Bigg G R, Nicholls K W. Iceberg trajectory modeling and meltwater injection in the Southern Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C9):19903-19915
- [7] Silva T A M, Bigg G R, Nicholls K W. Contribution of giant icebergs to the Southern Ocean freshwater flux [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(C3):C03004
- [8] Wesche C, Jansen D, Dierking W. Calving fronts of Antarctica: mapping and classification [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12):6305-6322
- [9] Tournadre J, Bouhier N, Girard-Ardhuin F, et al. Large icebergs characteristics from altimeter waveforms analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(3):1954-1974
- [10] 李苗, 臧淑英, 那晓东, 等. ENVISAT-ASAR 数据产品介绍与数据处理 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(1):63-65
LI Miao, ZANG Shuying, NA Xiaodong, et al. Introduction to ENVISAT-ASAR data production and data processing [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2012, 35(1):63-65
- [11] 匡燕, 李安, 李子扬, 等. ENVISAT 卫星综述 [J]. *遥感信息*, 2007, 22(1):90-92
KUANG Yan, LI An, LI Ziyang, et al. ENVISAT satellite overview [J]. *Remote Sensing Information*, 2007, 22(1):90-92
- [12] 郭广猛, 曹云刚, 马龙. ENVISAT-ASAR 数据处理介绍 [J]. *遥感信息*, 2006, 21(4):61-62, 36, 89
GUO Guangmeng, CAO Yungang, MA Long. Introduction to ENVISAT-ASAR data processing [J]. *Remote Sensing Information*, 2006, 21(4):61-62, 36, 89
- [13] Silva T A M, Bigg G R. Computer-based identification and tracking of Antarctic icebergs in SAR images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(3):287-297
- [14] 刘岩, 程晓, 惠凤鸣, 等. 利用 EnviSat ASAR 数据监测南极冰架崩解 [J]. *遥感学报*, 2013, 17(3):479-494
LIU Yan, CHENG Xiao, HUI Fengming, et al. Antarctic iceberg calving monitoring based on EnviSat ASAR images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(3):479-494
- [15] 黄庆妮, 唐伶俐, 戴昌达. 环境卫星 (ENVISAT-1) ASAR 数据特性及其应用潜力分析 [J]. *遥感信息*, 2004, 19(3):56-59
HUANG Qingni, TANG Lingli, DAI Changda. Envisat-1 ASAR data products' characteristics and the potential applications [J]. *Remote Sensing Information*, 2004, 19(3):56-59
- [16] 刘岩. 卫星测高与 SAR 南极冰架物质平衡研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2013:157
LIU Yan. Investigation of mass balance of Antarctic ice shelves using satellite altimetry and SAR data [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2013:157

Investigation of Antarctic iceberg distribution based on SAR images

LI Tian^{1,2} CHENG Xiao^{1,2,3,4} GUAN Zhenfu^{1,3} LIU Yan^{1,3,4}

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875

2 School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000

3 University Corporation for Polar Research, Beijing 100875

4 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000

Abstract In the context of global warming, the calving events of Antarctic ice shelves are becoming more and more frequent. The icebergs calved from ice shelves are an active component of Antarctic ice sheet-ice shelf-ocean system, while the drifting characteristics and temporal-spatial distribution of icebergs are very important in Antarctic ocean currents, ecology and hydrology. To better understand the underlying relationship between Antarctic icebergs and global climate change, it is essential to investigate the icebergs' drifting characteristics, mass loss due to calving and melting, icebergs distribution, and the interaction between icebergs and the ocean. Based on the object-oriented multiscale image segmentation algorithm of Easy Interpretation software, a total of 32 267 Antarctic icebergs in coastal waters with area larger than 0.06 km² were extracted from 63 ENVISAT ASAR images acquired in August 2006. The spatial distribution characteristics of icebergs were also analyzed, and it is found that small-sized icebergs play an important role in freshwater flux into the Southern Ocean.

Key words Antarctica; iceberg; ENVISAT ASAR; multiscale segmentation