

南极冰盖冻融的时空分析

王星东^{1*}, 李新武², 梁雷² (1.河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2.中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘要: 采用改进的小波变换的南极冰盖冻融探测算法, 利用微波辐射计 1978~2013 年的 SMMR 和 SSM/I 数据对南极冰盖冻融状况进行监测, 分析了南极冰盖近 34 年的整体冻融时空变化特征, 结果表明: 从空间分布来看, 南极冰盖的融化区域主要分布在南极边缘的各个冰架区, 融化强度受地物覆盖类型、地理位置和海拔等因素的影响; 从时间分布上来看, 南极冰盖的融化面积年际变化较大, 1991 年的融化面积最大, 为 1518750km², 1999 年融化面积最小, 为 565000km², 且融化面积的年际变化具有周期性; 南极冰盖的融化具有很强的季节性, 融化一般集中在 11 月至次年 2 月, 在 1 月达到融化顶峰。

关键词: 融化探测; 微波辐射计; 小波变换; 南极; 时空变化特征

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2014)05-1303-07

Spatio-temporal analysis of Antarctic ice-sheet freeze-thaw variation. WANG Xing-dong^{1*}, LI Xin-wu², LIANG Lei² (1.College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2.Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of sciences, Beijing 100094, China). *China Environmental Science*, 2014,34(5): 1303~1309

Abstract: Antarctic ice-sheet freeze-thaw variation was monitored based on improved wavelet transform and microwave radiometer SMMR and SSM/I data (1978~2013), and Antarctic 34-year ice-sheet freeze-thaw spatio-temporal variety characteristics was analyzed. Melt spatial distribution showed that the majority of melt areas were located on the edge of Antarctic ice shelves. They were affected by land cover type, altitude and geographic location. The melt temporal distribution showed that the Antarctic melt-area annual variation had regularity. The surface melt area was the largest for 1518750 km² in 1991. The surface melt area was the smallest for 565000 km² in 1999. In addition, Antarctic ice-sheet melt varied with seasonal changes, and the snowmelt generally concentrated in November, December, January and February, and there was the largest melt extent in January.

Key words: snowmelt detection; microwave radiometer; wavelet transform, Antarctica; spatio-temporal variety characteristics

全球的气候和环境变化是当今国际关注的热点问题, 南极地区是全球气候和环境变化的关键地区, 南极冰雪变化是影响全球气候和环境变化最重要的因子之一. 极地地区对全球气候和环境变化有“放大器”的作用, 历史和现代的观测结果都表明, 极地气候和环境变化的幅度是中、低纬度地区的 2 倍, 这说明在极地更易于监测到在中、低纬区不易察觉到的细微变化. 观测和模拟结果显示, 南极冰雪范围、表面特征(主要是反射率)的年际变化对全球水气环流的强度、全球热平衡和气候变化如温度、降水分布等都有明显的影响. 极区控制着大气与地表的热量、水汽和

动量交换, 直接影响着全球大气环流和气候, 是全球气候和环境变化的关键因素. 南极冰盖与相邻地球圈层的相互作用对全球气候和环境都有巨大影响. 南极冰盖的消融将引起雪表湿度的变化, 进而引起边缘冰架的崩塌和改变冰流的运动. 通过遥感手段有效检测南极冰盖冻融的分布, 对全球气候和环境变化研究具有极大的促进作用.

长时间序列的大尺度微波辐射计 SMM/I 和

收稿日期: 2013-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(41076129); 河南省教育厅自然科学基金项目(14A420003); 河南工业大学博士基金(150525)

* 责任作者, 讲师, zkywxid@163.com

SMMR 数据在北极格陵兰岛已开展了大量的冰盖表面冻融探测方法研究和全球变化相关研究,取得了较好的成果^[1-7].在南极地区利用微波辐射计 SMM/I 和 SMMR 数据也开展了不少冰盖表面冻融探测研究,并结合全球变化进行了相关分析^[8-11].

本研究采用基于改进的小波变换的冰盖冻融探测方法^[12],获得了时间跨度为 34 年的南极地区冰盖的平均融化开始时间、结束时间和持续时间分布及融化面积年际变化图和融化像元随季节的变化,以此为基础得出南极冰盖冻融时空变化特征.结合南极地区的地表观测,对南极冰盖冻融时空变化的机制进行了分析.

1 研究区域概况与数据源

南极总面积约 1400 万 km²,约占世界陆地面积的 9.4%.全球冰雪量的 90%冻结在南极,南极大陆冰盖的平均厚度约 2400m,最大厚度达 4200m.南极大陆是世界最冷的陆地,冬季月平均气温达-59.8℃.南极大陆 98%的面积常年被冰雪覆盖,部分冰盖延伸到海洋,形成冰架.近年来,在全球变暖的趋势下,冰架前缘崩裂正导致冰架形态发生剧烈的变化.卫星观测的结果显示,南极半岛冰架前缘存在突然崩裂现象,在过去 20 多年来,已造成冰架面积减少了 12500 km² 以上^[13-14].

微波辐射计被动的接收地面物体的温度辐射,微波辐射亮温对冰盖液态水含量的变化非常敏感,随着融化的开始和结束,亮温均发生剧烈变化.目前广泛使用的微波辐射计主要有 SMMR、SSM/I、AMSR-E 3 种,本文主要使用 1978 年 10 月 26 日~2013 年 3 月 31 日的 SMMR 和 SSM/I 微波辐射计数据,皆来自 NSIDC(美国冰雪研究中心).选择的数据通道为传感器 SMMR 的 18GHz 水平极化通道和分别搭载于 F8、F11、F13 和 F17 平台上的传感器 SSM/I 的 19GHz 水平极化通道,它们的行列号和数据精度均相同,并以相同的格式存储.不同的是,34 年间有 SMMR 和 SSM/I 2 种传感器且传感器 SSM/I 分别搭载于 F8、F11、F13 和 F17 不同平台上.因此,需要对不同的传感器数据和不同平台上的传感器数据

归一化为同一平台的数据,才能做长时间序列的连续监测研究^[13,15].

已知这 5 种数据的重叠时间为 1987 年 7 月 9 日至 8 月 20 日、1991 年 12 月 3 日至 12 月 30 日、1995 年 5 月 3 日至 9 月 30 日和 2009 年 1 月 1 日至 4 月 29 日,利用这些重合数据,可对这 5 种数据进行回归处理,利用公式(1)计算从 SMMR 校准到 F8 平台、F11 校准到 F8 平台、F13 校准到 F8 平台和 F17 校准到 F8 平台的数据值,其中 T_1 为平台 F8 的水平极化 19GHz 波段的亮温数据, T_2 为 SMMR 亮温数据及平台 F11、F13 和 F17 对应的亮温数据, a 、 b 分别为回归得到的系数.

$$T_1 = a \cdot T_2 + b \quad (1)$$

2005 年, Liu 等^[9]分别对 SMMR 与 SSM/I 的转换、SSM/I F11 与 F8 的转换,以及 SSM/I F13 与 F8 的回归系数进行了计算.不同传感器和平台数据转换系数如表 1 所示,本文采用其中的回归系数将所有数据统一回归到 F8 平台.

表 1 不同传感器和平台数据的回归系数

Table 1 Regression coefficient from different sensor and platform data

数据转化	斜率	截距	相关系数
SMMR 18H	1.06	-2.79	$R > 0.99$
SSM/I F11F 13 19H	1.008	-1.17	$R > 0.99$
SSM/I F17 19H	1.0286	-3.0094	$R > 0.99$

数据归一化后,利用改进的小波变换冰盖冻融探测算法对逐年的微波辐射计数据进行处理,提取 34 年的南极冰盖冻融信息(由于在 1987 年 8 月 21 日~1988 年 1 月 12 日没有数据,所以没有提取 1987~1988 年的极地冰盖冻融信息).南极的夏季为本年的 12 月到次年的 2 月,为研究的方便,将本年的 7 月 1 日到次年的 6 月 31 日记为一年且采取靠前的原则,比如 1991 年是指 1991 年 7 月 1 日~1992 年 6 月 31 日.

2 改进的小波变换冰盖冻融探测算法

2.1 小波变换的冰盖冻融探测算法

小波变换的极地冰盖冻融探测算法的基本

原理:长时间序列亮温数据(Tb)的剧烈变化边缘反应了雪的融化或者冻结的开始,每一年融化开始时间为时间轴上第一个亮温数据剧烈上升变化边缘,结束时间为时间轴上最后一个亮温数据剧烈下降变化边缘,而融化持续时间为一年中每段融化持续时间的总和.该方法可以探测每个像素是否经历过冻融以及冻融发生的时间.基本步骤如下:

(1) 对长时间序列亮温数据进行预处理;(2) 运用小波变换对预处理后的亮温数据进行小波多尺度分解,在不同尺度下对边缘信息进行分析;(3)为区分由噪声产生的边缘和由融化、冻结的开始产生的边缘,采用方差分析和双高斯曲线拟合的方法来确定最优边缘阈值;(4)利用最优边缘阈值得到每个像素的冻融开始时间、结束时间和持续时间;(5)基于空间自动纠错的原理,运用空间邻域纠错算子来探测和纠错由噪声引起的错误的像素,从而确定冻融的空间分布、融化开始时间、融化结束时间和融化持续时间.

双高斯模型拟合的方法主要缺点如下:

(1) 剧烈变化点和非剧烈变化点的分布模型不一定满足双高斯模型;(2)对于拟合采用的 Levenberg-Marquardt 算法,输入的初始值不同,得到迭代的结果不同,结果的好坏与初始值的输入有关;(3)算法过程繁琐.

由于双高斯模型拟合存在的问题,在这里引入基于广义高斯模型的自动阈值划分方法来进行干湿雪划分^[1].其优点如下:(1)较少的人工输入;(2)分类结果唯一(即阈值唯一).

2.2 广义高斯模型的自动阈值确定

在选定的样本区内通过广义高斯模型得到干湿雪分类的最优阈值,该方法引入形状因子,可处理更多不同形状的曲线,与双高斯模型相比有较大的进步,该模型的原理如下:

设 $h(X_i)(X_i=0,1,K,L-1)$ 为一幅灰度图像的直方图, L 表示图像可能的灰度级.如果将图像二值化,则直方图 $h(X_i)$ 可以看成是灰度图像中干雪和湿雪点的混合概率密度函数 $p(X_i)$.为了求出干湿雪划分的最优阈值 T^* ,将灰度图像二值化,引入广义高斯模型的 KI 判别准则方程:

$$J(T) = \sum_{X_i=0}^T h(X_i) [b_1(T) | X_i - m_1(T)]^{\beta_1(T)} + \sum_{X_i=T+1}^{L-1} h(X_i) [b_2(T) | X_i - m_2(T)]^{\beta_2(T)} + H(\Omega, T) - [P_1(T) \ln a_1(T) + P_2(T) \ln a_2(T)] \tag{2}$$

$P_1(T)$ 和 $P_2(T)$ 分别表示干雪和湿雪的先验概率且:

$$P_1(T) = \sum_{X_i=0}^T h(X_i), \quad P_2(T) = 1 - P_1(T)$$

$m_1(T)$ 和 $m_2(T)$ 分别表示干雪和湿雪的均值且:

$$m_1(T) = \frac{1}{P_1(T)} \sum_{X_i=0}^T X_i h(X_i)$$

$$m_2(T) = \frac{1}{P_2(T)} \sum_{X_i=T+1}^{L-1} X_i h(X_i)$$

$\sigma_1^2(T)$ 和 $\sigma_2^2(T)$ 分别是干雪和湿雪的的方差

且: $\sigma_1^2(T) = \frac{1}{P_1(T)} \sum_{X_i=0}^T [X_i - m_1(T)]^2 h(X_i)$

$$\sigma_2^2(T) = \frac{1}{P_2(T)} \sum_{X_i=T+1}^{L-1} [X_i - m_2(T)]^2 h(X_i)$$

$H(\Omega, T)$ 是 $\Omega = \{\omega_1, \omega_2\}$ 的熵; β_i 是 $p(X_i | \omega_i) = a_i e^{-[b_i | X_i - m_i]^{\beta_i}}$ ($i = 1, 2$) 的形状参数,其中 a_i, b_i 为正常量. a_i, b_i, β_i 的求解步骤见具体文献.为了得到最优化的自动划分阈值 T^* ,对(2)进行概率错误最小的优化,即:

$$T^* = \arg \min_{T=0,1,\dots,L-1} J(T) \tag{3}$$

当式(3)的值取最小时的 T 值即为干湿雪划分的最优阈值.

2.3 改进的小波变换的冰盖冻融探测方法

改进方法^[6-7]与原方法^[1]最大的不同在于原方法利用双高斯模型来确定干湿雪划分的最优阈值,改进方法是利用广义高斯模型来确定干湿雪划分的最优阈值.

由多尺度小波分解方法与实测温度数据可知,对于时间分辨率为 1d 的长时间序列的微波辐射计亮温数据,改进的基于小波变换的冰盖冻融探测方法对亮温值升高和降低幅度最大时刻的探测精度为 $\pm 1d$ ^[15].

3 结果与讨论

3.1 南极冰盖冻融的空间分析

通过以上处理过程,得到了 1978~2013 年南极冰盖的平均融化开始、持续和结束时间图(图 1),总的融化面积达 1621875 km²,占南极总面积的 11.67%.由图 1 可知,融化区域大部分分布于南极边缘,包括罗斯冰架(Ross Ice Shelf)、埃默里冰架(Amery Ice Shelf)、龙尼冰架(Ronne Ice

Shelf)、拉森冰架(Larsen Ice Shelf)、盖茨冰架(Getz Ice Shelf)、阿伯特冰架(Abbot Ice Shelf)、威尔金斯冰架(Wilkins Ice Shelf)、布兰特冰架(Brunnt Ice Shelf)、里瑟拉森冰架(Riiser-Larsen Ice Shelf)、芬布尔冰架(Fimbut Ice Shelf)、西冰架(West Ice Shelf)、沙克尔顿冰架(Shackleton Ice Shelf)等,总体来说,越靠近最外边缘的融化区域的融化开始时间越早、融化持续时间越长和融化结束时间越晚。

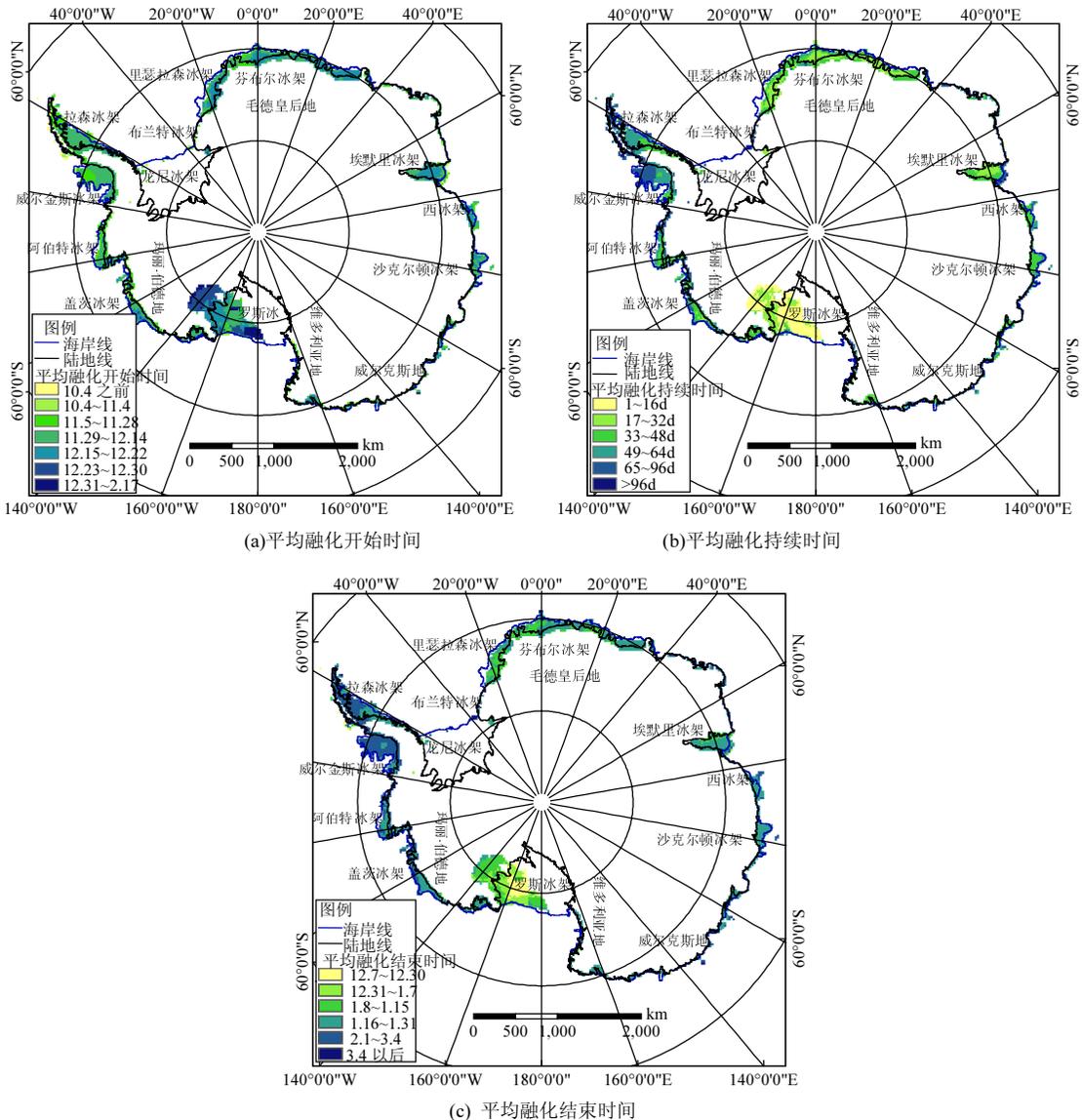


图 1 1978~2013 年南极冰盖的平均融化开始、持续和结束时间

Fig.1 Antarctic ice-sheet average melt onset date, duration and end date for 1978~2003

南极冰盖的融化存在明显的区域差异.总体来说,南极半岛的融化强度最大,其中威尔金斯冰架和拉森冰架的平均融化开始时间在 12 月中旬前、融化持续时间超过 60d、融化结束时间在 2 月 1 日之后.而 2 个最大的冰架-龙尼冰架和罗斯冰架,其平均融化持续时间相对较短,基本在 10d 以下.南极内陆的大部分区域 34 年来都没有发生融化.

岩石由于低比热容的属性,在同等太阳辐射的条件下,将比高比热的冰雪有更明显的温度变化,从而使得其周围的冰雪更容易发生融化.从南极地物覆盖类型来看,拉森冰架和威尔金斯冰架位于岩石众多的南极半岛,受岩石低比热的影响,因而比少岩石的罗斯冰架和龙尼冰架更易发生融化.平均融化持续时间代表了融化的强度,其受纬度的影响呈现出复杂的变化.一般而言,对于南极,高纬度地区的太阳辐照强度比较弱这将使得其地面温度低于低纬度地区.本文的试验结果表明,位于高纬度的南极内陆的大部分区域几乎没有融化过程发生,而位于相对较低纬度地区的南极半岛却持续发生高强度的融化.而横断山脉与南极半岛都是南极大陆上岩石分布广泛的区域,由于横断山脉大部分位于高纬度地区使得其与南极大陆的融化强度差异较大.

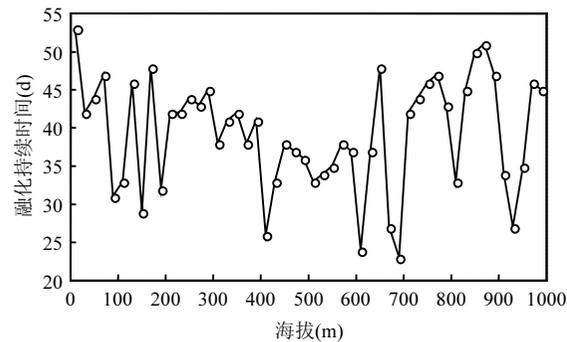


图 2 平均融化持续时间与海拔的关系

Fig.2 Relation between average melt duration and altitude

由图 2 可知,海拔为 0~500m 时,由于受大气垂直梯度的影响,海拔越高,平均融化持续时间越短.海拔低于 20m 的地区,平均融化持续时间超过 50d,以各冰架与海交界的边缘区域为主.海拔为 20~200m 的地区,平均融化持续时间在 50d 以下,

尤其在海拔为 100m 左右的地区,以芬布尔冰架、埃默里冰架和里瑟拉森冰架为代表,平均融化持续时间为 30d 左右.对于海拔为 200~500m 的地区,由于受大气垂直梯度的影响,平均融化持续时间随着海拔的增加而缩短,以盖茨冰架和阿博特冰架为代表,平均融化持续时间为 40 天左右.其中,海拔为 400m 左右的地区,平均融化持续时间减小至 25d 左右.海拔超过 500m 的融化区域主要分布在南极半岛,低比热容的岩石分布和低纬度使其得到更多的太阳辐照强度以至于使得该地区呈现出高强度的融化.

总之,地物覆盖类型、海拔和地理位置(纬度)的综合作用使得南极冰盖的冻融呈现了复杂的空间分布.

3.2 南极冰盖冻融的时间分析

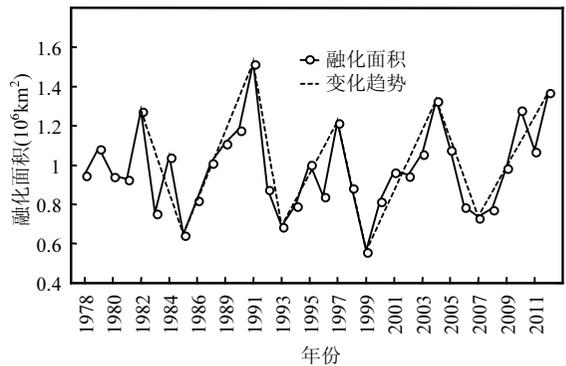


图 3 南极融化面积年际变化

Fig.3 Antarctic melt-area annual variation

由图 3 可知,南极融化区域的年际变化较大,融化面积最大的年份是 1991 年(1991 年 7 月 1 日~1992 年 6 月 31 日),其融化面积为 1518750 km²,1999 年融化面积最小为 565000 km²,则 1991 年的融化面积约是 1999 年融化面积的 3 倍.由图 3 中的融化趋势可看出下面的周期性融化规律:出现强度较大的融化后,第二年将会有有一个大幅度的下降并经一两年后将有一个强度较小的融化;而出现强度较小的融化后,经四五年将出现强度较大的融化,如 1985 年出现一个强度较小的融化,然后经过 5 年后在 1991 年出现了一个 34 年里强度最大的融化.从这个周期的变

化规律可以看出南极冰盖对气候变化具有一定 的调节作用,负反馈于气候的变化.

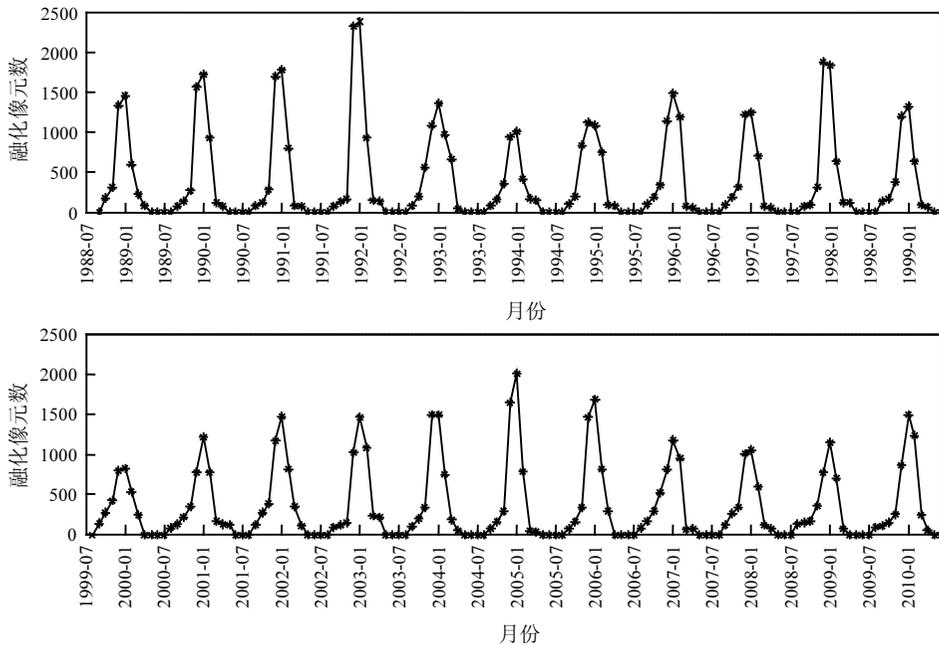


图4 平均融化像元数随月份的变化

Fig.4 Monthly variation of average melt pixels

由图4可知,南极冰盖的融化具有非常明显的季节性,夏季(12月至次年2月)融化剧烈,基本在12月份和1月达到顶峰.2月份开始,融化面积开始减少,到3月份发生融化的地区已极其稀少.这一结果表明,南极冰盖表面(主要是各个冰架表面)在夏季融化加剧之后会有重新冻结的过程.

随着冰雪的重新冻结,融化面积剧烈减小,到2月份,其平均融化面积仅为1月份的50%左右,而在3月份,融化面积进一步减小并基本趋于稳定.纵观22年间3月份的融化面积,基本稳定在 $7.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 左右.自5月起,南极进入冬季,极少融化事件发生,直到10月,南极冰盖重新进入融化事件多发季节.

4 结论

结合1978~2013年南极冰盖的时间分布与空间分布特点来看,南极冰盖总融化面积随空间的变化与地物覆盖类型、海拔高度以及纬度有

密切关系,此外,南极冰盖的冻融有非常明显的季节性,它因年份呈现出快速的起伏变化特点且具有周期性变化的特点.总的来说,南极冰盖融化面积随时间变化大的区域主要分布于罗斯冰架和龙尼冰架,这些地区的融化状况决定着南极冰盖融化面积的总体变化;与此不同的是,南极半岛上的拉森冰架和威尔金斯冰架则一直保持稳定大面积的融化,并且在夏季保持高强度的融化.

参考文献:

- [1] Wang L. Deriving spatially varying thresholds for real-time snowmelt detection from space-borne passive microwave observations [J]. *Remote Sensing Letters*, 2012,3(4):305-313.
- [2] Dupont F, Royer A, Langlois A, et al. Monitoring the melt season length of the Barnes Ice Cap over the 1979-2010 period using active and passive microwave remote sensing data [J]. *Hydrological Processes*, 2012,26(17):2643-2652.
- [3] Semmens K A, Ramage J, Bartsch A, et al. Early snowmelt events: detection, distribution, and significance in a major sub-arctic watershed [J]. *Environmental Research Letters*, 2013,8(1):1-11.

- [4] Tedesco M. Assessment and Development of Snowmelt Retrieval Algorithms over Antarctica from K-band Space Borne Brightness Temperature (1979–2008) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009,113(5):979–997.
- [5] Abdaati W, Steffen K. Snowmelt on the Greenland ice sheet as derived from passive microwave satellite data [J]. *Journal of Climate*. 1997,10 (2):165–175.
- [6] Abdaati W, Steffen K. Greenland ice sheet melt extent: 1979–999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001,106(D24):33983–33989.
- [7] Joshi M, Merry C J, Jezek K C, et al. An edge detection technique to estimate melt extent on the Greenland ice sheet using passive microwave data. *Geophysical [J]. Geophysica Research Letters*, 2001,28(18):3495–3500.
- [8] Torinesi O, Fily M, Genthon C. Interannual variability and trend of the Antarctic summer melting period from 20years of spaceborne microwave data [J]. *Journal of Climate*, 2003,16(7): 1047–1060.
- [9] Liu H X, Wang L, Jezek K C. Wavelet–transform based edge detection approach to derivation of snowmelt onset, end and duration from satellite passive microwave measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005,26(21):4639–4660.
- [10] Liu H X, Wang L, Jezek K C. Spatiotemporal variations of snowmelt in Antarctica derived from satellite scanning multichannel microwave radiometer and Special Sensor Microwave Imager data (1978–2004) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006,111(F1):1–20.
- [11] Picard G, Fily M. Surface melting observations in Antarctica by microwave radiometers: Correcting 26-year time series from changes in acquisition hours [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006,104(3):325–336.
- [12] 王星东,熊章强,李新武.基于改进的小波变换的南极冰盖冻融探测 [J]. *电子学报*, 2013,41(2):402–406.
- [13] 王星东.主被动微波遥感南极冰盖冻融探测 [D]. 长沙:中南大学, 2013.
- [14] 王星东,李新武,熊章强.物理模型结合小波变换的南极冰盖冻融探测 [J]. *中国矿业大学学报*, 2013,42(4):656–662.
- [15] 梁雷,郭华东,李新武.基于微波辐射计的南极冰盖冻融时空变化分析 [J]. *遥感学报*, 2013,17(2):423–438.
- [16] 叶玉芳.基于 TIMESAT 算法的南极冰盖冻融探测研究 [D]. 北京:北京师范大学, 2011.

作者简介: 王星东(1982-),男,陕西宝鸡人,讲师,博士,主要从事主被动遥感冰盖冻融探测研究.发表论文 5 篇.

《中国环境科学》获评“2012 中国最具国际影响力学术期刊”

2012 年 12 月,《中国环境科学》被评为“2012 中国最具国际影响力学术期刊”。

“中国最具国际影响力学术期刊”是中国科学文献计量研究中心、清华大学图书馆依据《CAJ 国际引证报告》,按 2011 年度中国学术期刊被 SCI 期刊、SSCI 期刊引用的总被引频次排序并经 40 多位期刊界专家审议,遴选出的 TOP5%期刊.获评“中国最具国际影响力学术期刊”的科技类期刊共 156 种.统计分析结果表明,从定量分析的角度看,“中国最具国际影响力学术期刊”的国际影响力已经达到国际中等以上水平,跨入了国际品牌学术期刊行列。

《中国环境科学》编辑部