

南极地区 SSM/I 微波辐射计亮温时间序列分析

程 晓¹, 张艳梅², 李 震¹, 邵 芸¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国地震局分析预报中心, 北京 100036)

摘要: 简单介绍了微波辐射的原理与应用现状, 利用美国国防气象卫星计划 DMSP-F 系列卫星携带的 SSM/I 辐射计南极地区极投影网格亮温数据进行了分析与处理。结合微波亮温等温线和南极等高线图分析了南极地区亮温分布的特点。选取 8 个特征区域, 对 1992 - 2000 年的日亮温数据进行了时间序列分析, 分析了冰盖和冰架的亮温特性、季节和年度变化、短期波动等特征。研究表明南极大陆外围冰架和南极半岛地区的亮温呈增高趋势, 而内陆冰盖地区则保持相对稳定; 揭示了近年来随全球气候的变暖, 南极冰架和南极半岛的融化正在加剧的趋势。

关键词: SSM/I; 微波辐射计; 亮温; 时间序列分析; 冰盖; 南极

中图分类号: P343.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)02-0268-06

南极冰盖的过去、现在和未来是科学家们所共同关注的科学问题, 由于南极地处遥远的地球最南端, 地域广阔且气候恶劣, 虽然世界各国已经开展了许多考察活动, 但是对于庞大的南极来说这些只是点和线而已, 时间和空间分辨率都非常低, 大多数区域对于人类来说还是未知的。除了加大现场观测规模以外, 卫星遥感技术尤其是星载微波遥感技术将是解决这一难题的新途径, 其将成为人类了解南极现状和变化的最佳手段。本文采用星载微波辐射计技术对南极部分冰盖和冰架区域在 20 世纪末近 10 年中所发生的变化进行分析研究。

温度大于绝对温度 0 K (- 273.16) 的任何物体都具有发射电磁波的能力^[1]。自然表面的热辐射主要发生在远红外区, 但一直贯穿到亚毫米和微波区。在亚毫米和微波区域, 发射率可由普朗克定律的 Rayleigh-Jeans 近似给出^[1]。

$$S(\lambda) = \frac{2ckT}{4} \quad (1)$$

式中 $S(\lambda)$ 为分子谱辐射通量密度, W/m^2 ; k 为波兹曼常数; λ 为波长; c 为光速; T 为黑体的绝对温度。通过变换可得到下式:

$$S(\nu) = \frac{2}{c} S(\lambda) = \frac{2kT}{2} = \frac{2kT}{c^2} \nu^2 \quad (2)$$

式中 ν 为频率, $S(\nu)$ 为微波辐射亮度, $W/m^2/Hz$ 。

对于亮度不依赖于观测方向的朗伯面, $S(\nu) = B(\nu)$, 于是表面亮度为

$$B(\nu) = \frac{2kT}{2} = \frac{2kT}{c^2} \nu^2 \quad (3)$$

上式表明黑体的微波辐射亮度 $B(\nu)$ 与绝对温度 T 的一次方成正比^[1]。实际接收机所观测到的能量包括地面辐射(与温度和表面发射率有关)、大气向上的辐射、地面对天空辐射的反射、地面对大气向下辐射的反射等, 故所测表观亮度温度 T_A 与实际地物的温度直接相关, 但同时也包括其他成分。实际地物温度的波动、天空温度的变化、物体反射与发射特性的变化都将使表观温度发生变化。

收稿日期: 2003-12-16; 修订日期: 2004-03-02

基金项目: 中国科学院知识创新工程前沿领域资助项目 (CX020006)

作者简介: 程 晓 (1976 -), 男, 江苏南京人, 助理研究员, 博士, 主要从事极地与全球变化遥感研究。

E-mail: chengxiao @263.net

表面发射率 是表面成分和粗糙度的函数。由于冰面和无冰水面的发射率差别很大(介电常数分别为 3 和 80), 所以辐射计的一个重要应用就是测绘极地海冰的覆盖并监测其动态。冰盖表层雪湿度的变化将使得地表发射和反射特性发生变化, 在微波辐射能量中得到体现; 冰盖表层温度和特征是南极冰盖的重要参数, 所以微波亮温对于研究冰盖表层特性变化具有重要意义。

地物在微波波段的辐射率可以使用微波辐射计进行测量。星载微波辐射计是测量全球微波辐射的最佳方式, 其中以美国国防卫星计划 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)的 F 系列卫星上的 SSM/I 系统为最成功。SSM/I 是四频率(85.5 GHz, 37.0 GHz, 22.2 GHz, 19.3 GHz)线性双极化被动微波辐射计系统, 安装在 F8(1987 - 1991 年), F11(1991 - 1995 年), F13(1995 -)等系列卫星平台上。空间分辨率方面, 85.5 GHz 为 12.5 km, 其他 3 个为 25 km。除了南北纬 87° 外 280 km 半径的圆形区域外基本上是全球覆盖^[2]。两极地区极投影方式的网格亮温图由 NSIDC(美国国家冰雪中心)处理和发布。

1 亮温分布与冰盖地形

1.1 数据介绍与处理

图 1(a) 中所示为南极地区亮温等值线图, 使用 1996 年 1 月 1 日 F13 星 SSM/F19V(19GHz 垂直极化)亮温数据采用 10 K 间隔生成等温线图, 图像中心的白色圈是卫星覆盖的盲区。

为配合进行雷达卫星南极测图计划的数据处理和分析, NSIDC 采用多种数据源制作了南极地区数字高程模型(DEM)^[3]。该 DEM 的水平分辨率为 200 m, 为配合亮温数据尺度分析, 对 DEM 进行了降分辨率和等高线图, 等高距为 200 m, 靠近冰盖边缘地区由于地形高度下降快而采用 500 m 等高距。图 1(b) 所示为南极地区冰盖地形等高线图, 图像中黑色区域为冰盖的最高点。

1.2 结果分析

经过对图 1(a) 分析得到南极地区亮温的分布特点为(地名参考图 2)。

南极地区亮温值主要分布在 180~250 K 之间, 其中涂黑色的区域为亮温值低于 180 K 的极低温区域。西南极亮温整体高于东南极, 分隔东西南极的横贯南极山脉位于图像中极点左侧的 210 K 等值亮温区; 南极地区亮温极低值区不在南极点, 而在东南极高原顶部的两个互相分隔的区域, 分别位于冰穹 C 附近和冰穹 A 与冰穹 F 之间; 罗斯冰架存在一个低温区。

从冰盖等高线得出南极地形存在的特点: 冰盖最高点不在南极点, 而位于东南极高原顶部。东南极冰盖厚度远远大于西南极, 东南极冰盖是作为一个两侧低中间高的盾型冰层覆盖在基岩上面; 西南极冰盖下基岩面积很小, 两个大冰架 - 罗纳和罗斯冰架占据了大部面积。

辐射计等温线与 DEM 等高线的形状和模式非常相似, 也就是说亮温基本上受高度所控制, 即海拔越高亮温值就越低。但高度也并不是影响亮温的唯一因素, 如东南极冰盖的最高点并不是亮温的最低点, 分析认为由于横贯南极山脉的分布使得亮温的极低区向山脉方向偏移。

2 时间序列分析

2.1 试验区定义

本文选取了南极地区 8 个局部冰川特性类似的区域进行 1992 - 2000 年 SSM/I 19V 亮温数据时间序列分析, 南极主要冰架、冰盖地名对照图与试验区的分布如图 2 所示。

各试验区依顺时针方向选取, 其名称、特征与选择依据如下: 艾默里冰架, 东南极冰盖物质支出的最主要出口, 属两侧受限式冰架; 美洲高地, 东南极 Lambert 冰川东部的内陆冰盖区域, 海拔 2 000~3 000 m; 东南极, 位于威尔克斯地, 地处靠近冰穹 C 的东南极高原地区, 典型的内陆冰盖积累区, 海拔 3 000 m 以

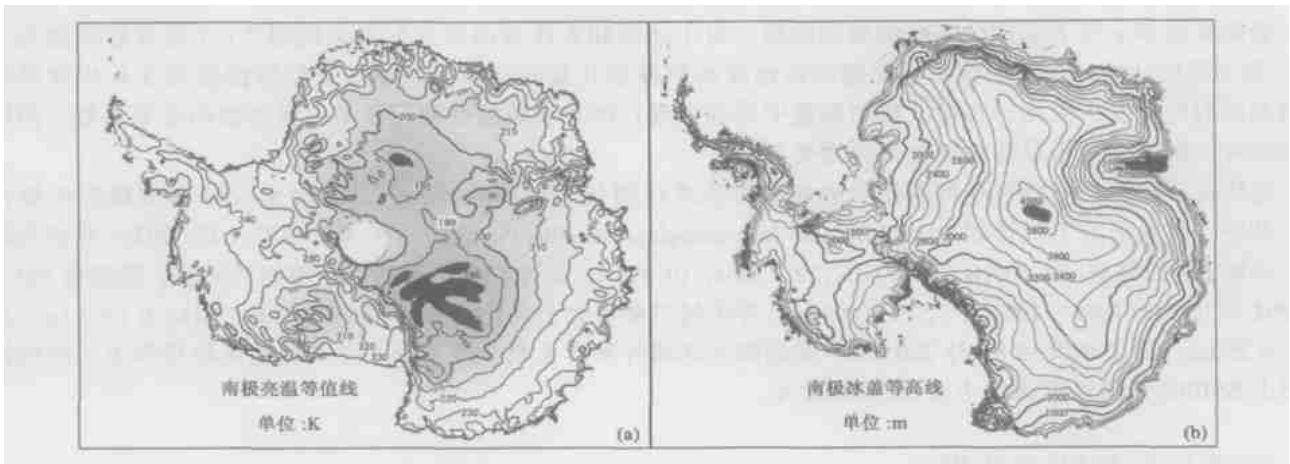


图 1 南极地区亮温分布等值线图(a)和地形等高线图(b)

Fig.1 Brightness temperature isoline (a) and topographic contour line (b) of Antarctica

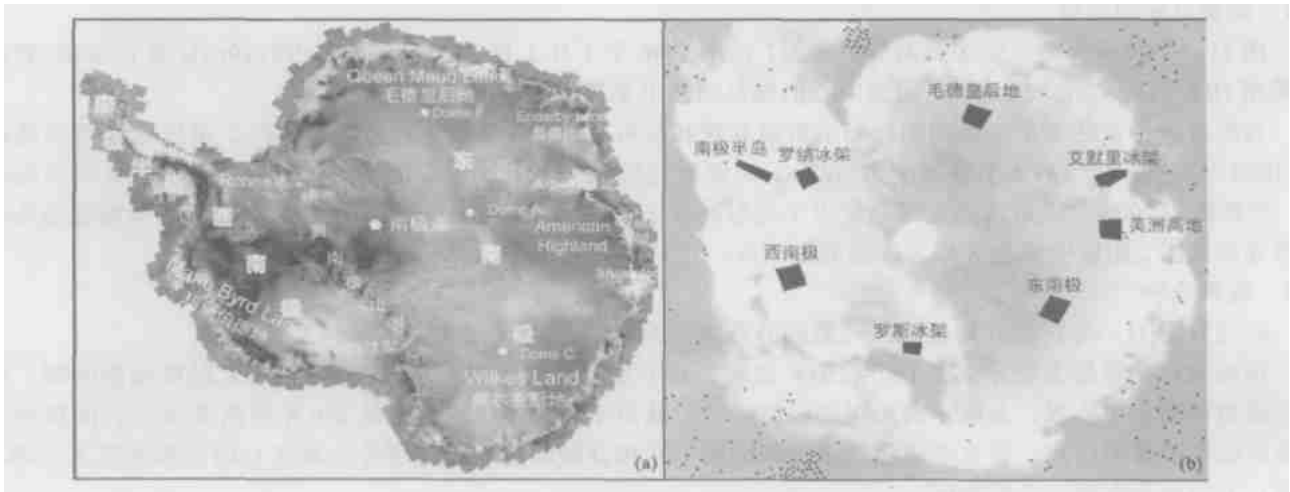


图 2 南极洲全图(a)与试验区的分布图(b)

Fig.2 All map of Antarctica (a) and locations of study regions in Antarctica (b)

上； 罗斯冰架，西南极的最大冰架之一，漂浮于罗斯海上，近年来发生多起“冰山逃逸”事件，冰盖边缘崩解颇为活跃； 西南极，位于埃尔斯沃斯地南部，代表西部南极洲主冰盖，海拔 1 500 m 左右； 南极半岛，位于帕尔默地，海拔 1 000 ~ 2 000 m； 罗纳冰架，西南极另一大冰架，漂浮于威德尔海上； 毛德皇后地，靠近冰穹 F 的东南极内陆高原区，海拔 3 000 ~ 4 000 m。

上述试验区可归纳为 3 类：冰架区(，)、南极高原区(，)和西南极区(，)。

2.2 数据处理与分析

首先分析各试验区的亮温特性,取各子区的 9 年亮温总平均值如表 1 所示(按平均值由高到低顺序排列)。由下表可知西南极、南极半岛和罗纳冰架的亮温平均值较高，因其同处于西南极地区；毛德皇后地与东南极地区亮温值较低；罗斯冰架、美洲高地和艾默里冰架地区亮温平均值较为接近。

表 1 各试验区亮温均值

Table 1 Mean value of brightness temperature over the study regions

							K
西南极	南极半岛	罗纳冰架	罗斯冰架	美洲高地	艾默里冰架	毛德皇后地	东南极
239.984	230.854	225.487	213.201	214.543	209.891	202.030	190.204

时序分析数据处理采用掩膜法按日计算各试验区的亮温平均值，形成由散点组成的时序演变曲线，如图3所示。采取区域平均是为了避免因单点值的随机波动因素给结果带来影响。

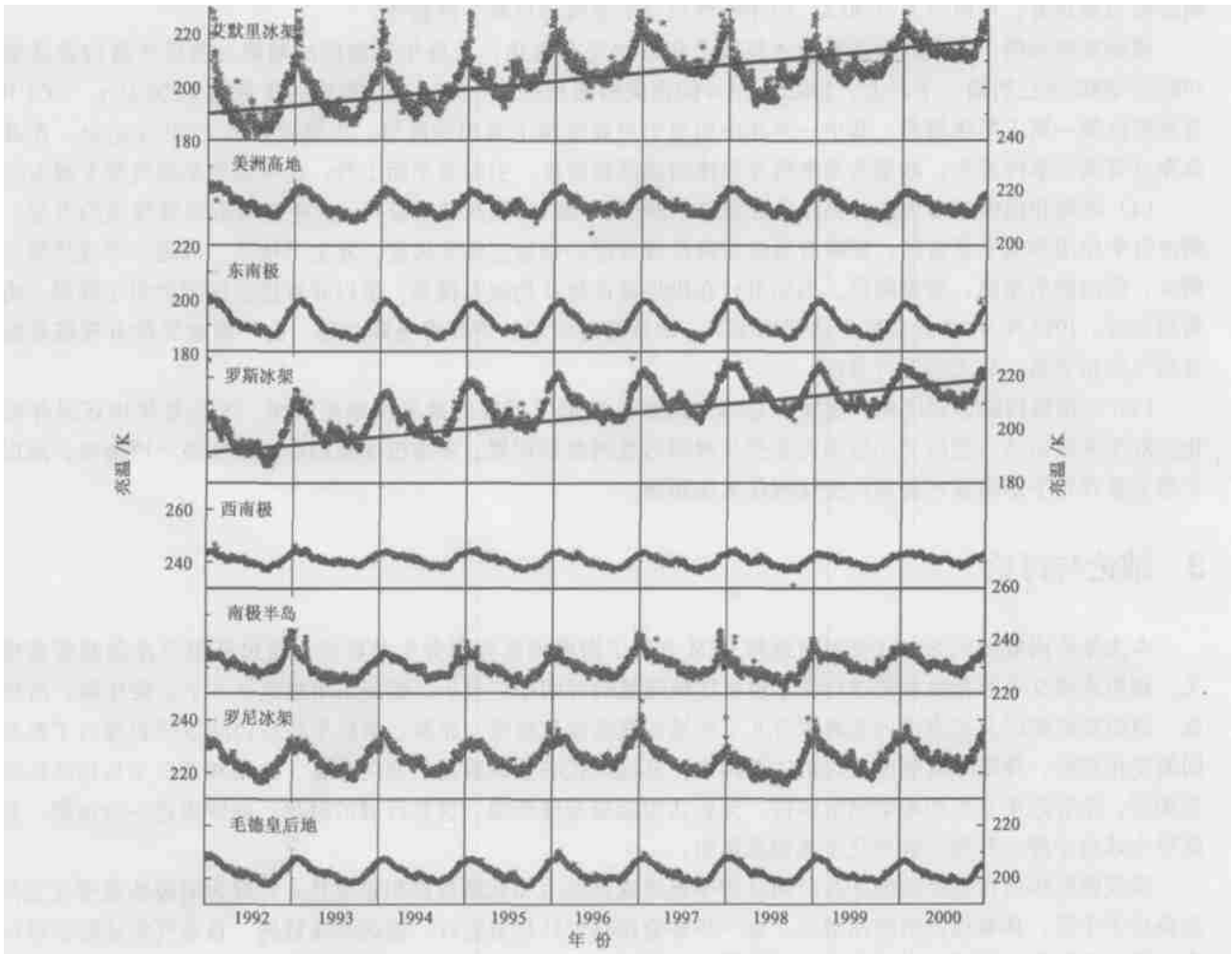


图3 南极地区 1992 - 2000 年 SSM/I 19V 亮温时序变化曲线

Fig. 3 Time series (1992 - 2000) curves of SSM/I 19V brightness temperature over Antarctic

分析时序变化曲线发现以下现象与特点：

(1) 亮温存在季节性变化，各试验区均在每年的夏季(南半球)出现峰值，冬季出现谷值，与冰盖表层温度的季节变化规律一致。说明微波亮温能够反映冰盖表面温度的变化。

(2) 亮温值年较差以 3 个冰架地区为最大(其中艾默里 1992 年达 40 K)，以西南极为最小(不足 10 K)。而根据自动气象站的记录，内陆冰盖气温年较差往往比沿岸冰架地区要大^[4]。

分析认为：表观亮度温度主要受到地表温度、天空温度和地表发射率的影响，天空温度的变化影响程度相近，地表物理特性的变化起主要作用。融化、冻结、密实化、风吹雪等因素是改变冰面物理特性的主要因素，其中融化可以导致雪的介电常数增加几十倍。液态水的存在使得雪层对微波的吸收增强，由此带来的近黑体辐射效应使得亮温增加。冬季来临时，湿雪再冻结，平均颗粒尺寸增大，颗粒互相连接，且速度在表面层特别快。另外渗透进雪孔隙里的融水再冻结会形成冰透镜和冰管，体散射效应显著增强，导致后向散射增加和亮温降低，如此则使得亮温的异动范围增大。

因内陆冰盖表面气温常年低于 0℃，基本没有融化现象；而冰架地处低纬低高程区域，易受到海洋和气候的影响，融化、冻结强烈发生，故其冰面的特征和介电常数发生着较内陆高原更加显著的变化。综合起来就产

生了上述的变化结果。

(3) 冰架和南极半岛地区亮温呈增高趋势,表明冰架和南极半岛地区处于融化加剧状态,尤以艾默里和罗斯冰架为最显著,均值增大近 30 K,图中线性拟合的直线即反映了此趋势。

现场观测表明,南极洲大面积的冰架数千年来始终在融化,且近年有加剧的趋势。南极半岛拉森冰架自 1986 至 2002 年已坍塌一半以上,2002 年 35 d 间损失的面积达到 3 520 km²,损失的重量达 7 200 亿 t。2002 年 5 月罗斯冰架一周内两次坍塌,其中一座冰山相当于卢森堡国土面积的两倍,坍塌面积创近 30 年记录。在其他冰架也有类似事件发生。冰架的崩溃将导致冰加速漂移南极,引起海平面上升,这可能与全球气候变暖有关。

(4) 冰架和南极半岛地区的亮温值在每年中期(秋冬季)的短期波动很多,这些波动指示着深霜的出现。深霜由升华作用形成于新雪区,需要有温度突降造成雪层的强垂直温度梯度,发生于秋季。深霜的形成使得晶粒增大,后向散射增强,亮温降低。因辐射计在极地地区每日均能有覆盖,所以非常适合探测类似于深霜一类的雪层突变。1998 年 4~7 月艾默里冰架发生了一次持续时间较长的亮温突降过程,由于该地区没有现场观测或自动气象站资料,故无法进行验证。

(5) 东南极内陆冰盖区的亮温特征总体来说都体现出了很好的稳定性和连续性,无论是年内还是年际变化。对于南极内陆冰盖的变化监测需要更长时间的观测数据积累。东南极冰盖的稳定性要高于西南极,所以在全球变暖背景下东南极冰盖如何变化现在无法预测。

3 结论与讨论

本文结合南极地区 SSM/I 亮温数据和 DEM 分析了南极地区亮温分布的特点,得出亮温与冰盖高程直接相关。利用连续 9 年的亮温数据进行基于特征区域掩膜的时间序列分析,绘制出南极地区 3 个主要冰架、南极半岛、西南极内陆以及东南极内陆冰原等 8 个区域的亮温变化曲线。冰架、南极半岛与内陆冰原表现出了截然不同的变化特征,得出导致亮温变化的主要因素。从这些代表性试验区的变化来看,冰架和南极半岛地区的融化在加剧,结合近年发生的冰架崩解事件,分析认为随着全球变暖,这些区域的融化、崩解将进一步加剧,并可能对全球海平面上升和气候变化带来深远影响。

星载微波辐射计的极地地区高时间分辨率连续观测能力和长期数据积累使其必将成为南极冰盖变化监测的重要技术手段,具有很强的应用潜力。进一步将会把辐射计与散射计、雷达测高数据、自动气象站数据进行联合分析,从散射、温度、高度等多方面来揭示冰盖的变化,通过长期卫星观测数据来评价南极冰盖的演变,预测其变化趋势。

致谢:李小文院士对于极地遥感研究方向给予了大力的支持和指导,NSIDC 提供了本研究所需的 SSM/I 辐射计数据和全南极 DEM,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Elachi C. 遥感的物理学和技术概论[M]. 北京:气象出版社,1995.
- [2] National Snow and Ice Data Center. DMSP F13 SSM/I Brightness Temperature Grids for the Polar Regions[BD/CD]. Digital data available from nsidc@kryos.colorado.edu. Boulder, CO, 1996.
- [3] Liu H, Jezek K, Li B, *et al.* Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2 [Digital media][DB/CD]. Boulder, CO, National Snow and Ice Data Center, 2001.
- [4] 秦大河,任贾文. 南极冰川学[M]. 北京:科学出版社,2001.

Time series analysis of SSM/ I microwave radiometer brightness temperature in Antarctica^{*}

CHENG Xiao¹, ZHANG Yan-mei², LI Zhen¹, SHAO Yun¹

(1. Laboratory of Remote Sensing Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100101, China; 2. Center for Analysis and Prediction, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

Abstract : The principles and the application of microwave radiometer are briefly introduced before the DMSP F-series satellite SSM/ I data over the antarctic ice sheet are analyzed. The microwave brightness temperature (T_b) isoline, combined with the topographic contour line of ice sheet, interprets the characteristic of brightness temperature distribution in Antarctica. Time series (1992 - 2000), daily SSM/ I T_b data from eight specific study regions are analyzed to understand the characteristic of T_b , seasonal and interannual changes and the sudden fluctuation over the different Antarctic ice caps and ice shelves. The research implies that the T_b value of the coastal ice shelves and the Antarctic Peninsula are increasing rapidly, while the inland ice sheet keeps stable. It is concluded that the surrounding ice shelves and Antarctic Peninsula are in increasing melting due to global warming.

Key words : SSM/ I; microwave radiometer; brightness temperature; time series analysis; ice sheet, Antarctica

* The study is financially supported by the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. CX020006).