



引文格式:肖倩雨,周春霞,刘勇.利用改进的亮温日较差法探测格陵兰冰盖表面融化[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(10):1931-1939.DOI:10.13203/j.whugis20220245

Citation: XIAO Qianyu, ZHOU Chunxia, LIU Yong. Surface Melting Detection of the Greenland Ice Sheet Using Advanced Diurnal Amplitude Variations Algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(10): 1931-1939. DOI: 10.13203/j.whugis20220245

利用改进的亮温日较差法探测格陵兰冰盖表面融化

肖倩雨^{1,3} 周春霞^{1,2,3} 刘勇^{1,3}

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

3 自然资源部极地测绘科学重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:格陵兰冰盖是全球海平面上升的主要贡献源之一,其表面融化和融水径流引发的物质损失约占冰盖总物质损失的60%,研究格陵兰冰盖的表面融化具有重要意义。采用2019年增强分辨率的专用微波成像仪37 GHz垂直极化被动微波数据,提出改进的亮温日较差(advanced diurnal amplitude variations, AD AV)方法,并利用该方法探测格陵兰冰盖的表面融化。与自动气象站的气温数据对比,AD AV方法使用动态阈值探测结果的平均精度高于使用固定阈值的传统日较差方法,且被动微波数据时间对探测精度无明显影响。采用该方法分析格陵兰冰盖冻融发现,2019年冰盖融化天数最多达165 d,7月31日融化面积达到最大,占冰盖总面积的67%;夏季3次出现融化峰值,且南部沿岸发生了冬季融化事件。

关键词:格陵兰冰盖;表面融化;改进的亮温日较差法;Rosin 阈值;Ramage 阈值

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2022-08-04

DOI:10.13203/j.whugis20220245

文章编号:1671-8860(2024)10-1931-09

Surface Melting Detection of the Greenland Ice Sheet Using Advanced Diurnal Amplitude Variations Algorithm

XIAO Qianyu^{1,3} ZHOU Chunxia^{1,2,3} LIU Yong^{1,3}

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hubei LuoJia Laboratory, Wuhan, 430079, China

3 Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: The Greenland ice sheet is one of the main contributors to the global sea level rise, and the mass loss caused by its surface melting and meltwater runoff accounts for about 60% of the total mass loss of the ice sheet, so it is of great significance to study the surface melting of the Greenland ice sheet. **Methods:** Based on the 37 GHz vertical polarization passive microwave data of special sensor microwave imager sounder, the advanced diurnal amplitude variations (AD AV) method is proposed to detect the surface melting of the Greenland ice sheet. **Results:** Compared with the air temperature data of automatic weather stations, the average accuracy of the detection results of the AD AV method using dynamic threshold is better than that of the traditional diurnal amplitude variations method using a fixed threshold, and the passive microwave data time has no obvious influence on the detection accuracy. **Conclusions:** The freeze-thaw analysis of the Greenland ice sheet based on this method found that in 2019, the area with the most melting days on the ice sheet melted up to 165 d. The melting area reached the maximum on July 31st, accounting for 67% of the total ice sheet area. Three melting peaks arose in summer, and there were several

基金项目:国家自然科学基金(42171133,41941010);国家重点研发计划(2021YFC2803303);湖北省自然科学基金(2019CFA057)。

第一作者:肖倩雨,硕士,主要从事极地遥感研究。xiaoqy@whu.edu.cn

通讯作者:周春霞,博士,教授。zhoucx@whu.edu.cn

winter melting events on the south coast. The ADAV method and its application to high spatial resolution passive microwave data have promoted the development of refining ice sheet freezing and thawing observations.

Key words: Greenland ice sheet; surface melting; ADAV; Rosin threshold; Ramage threshold

格陵兰冰盖是全球第二大冰盖,调节着北半球的太阳辐射吸收,控制地表和大气的热量交换,其表面融化状况是全球气候变化的灵敏指示器^[1-2]。近年来,由于表面融化加剧和冰流量损失增大,格陵兰冰盖的物质损失处于增长状态。1991—2015年,格陵兰冰盖的融化量较过去30年增长34%,年均物质损失达171 Gt/a,海平面上升贡献量约0.47 mm^[3]。探测格陵兰冰盖表面融化对于分析全球气候变化和研究海平面上升具有重要意义。

被动微波遥感是大范围探测冰盖表面融化的有效手段,它不仅具有全天时、全天候工作的优点,而且在反映冰盖表层物理特性和变化上具有高度敏感性。被动微波遥感对雪层中的液态水极其敏感,对格陵兰冰盖的表面融化探测具有重要作用,长时序、大尺度的被动微波数据在格陵兰冰盖表面融化的研究中已得到广泛应用^[4-9]。根据微波辐射计探测到液态水亮温值急剧升高的特点,文献[1]提出单通道阈值法探测格陵兰冰盖的表面融化,阈值为冬季亮温平均值(T_{wm})加上一个差值(ΔT),基于 $T_{wm} + \Delta T$ 阈值的思想在此后的研究中得到沿用,也有研究将 T_{wm} 替换为全年亮温平均值^[10]。由于卫星每日过境两次,采用两轨亮温数据差值探测冰盖表面融化的方法得以实现。文献[11]提出了亮温日较差(diurnal amplitude variations, DAV)方法^[11],文献[7]将此方法应用于全格陵兰冰盖的融化探测并针对19 GHz水平极化(19H)和37 GHz垂直极化(37V)两通道数据提出了各自适应的阈值^[7]。不同频段、不同极化方式的微波探测液态水的能力不同,结合19H和37V的亮温信息,文献[12]提出了交叉极化比率方法实现了融化信号的探测^[12]。

以往的研究不论使用上述哪种方法,多采用单一固定阈值,而格陵兰冰盖不同地区雪深、雪密度和雪粒径都有差异,区分干湿雪的最优阈值也不尽相同。有学者使用多层积雪微波辐射传输模型对不同属性积雪的亮温进行模拟,结果显示,干湿雪的最小亮温差在不同积雪条件下有所不同^[13]。因此,考虑不同积雪条件的动态阈值法更能满足格陵兰冰盖表面融化的探测需要。

2019年,在异常反气旋条件的驱动下,格陵兰冰盖发生了近年来最剧烈的表面融化^[8]。因此,本文选用专用微波成像仪(special sensor microwave imager sounder, SSMIS)数据,在前人研究基础上,提出了改进的DAV(advanced DAV, ADAV)方法;根据ADAV探测结果,进一步分析2019年格陵兰冰盖表面融化的时空分布特征。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

格陵兰冰盖具有 $2.99 \times 10^6 \text{ km}^3$ 的冰雪储量,其全部融化可使全球海平面上升7.42 m^[14]。近年来的研究表明,在全球变暖和北极放大效应的背景下,格陵兰冰盖的表面融化加剧,粒雪储水能力减弱,物质正处于加速损失状态,对海平面上升的贡献已超过南极冰盖^[15]。图1为格陵兰冰盖概况及部分自动气象站分布,底图为Landsat-8镶嵌影像^[16]。

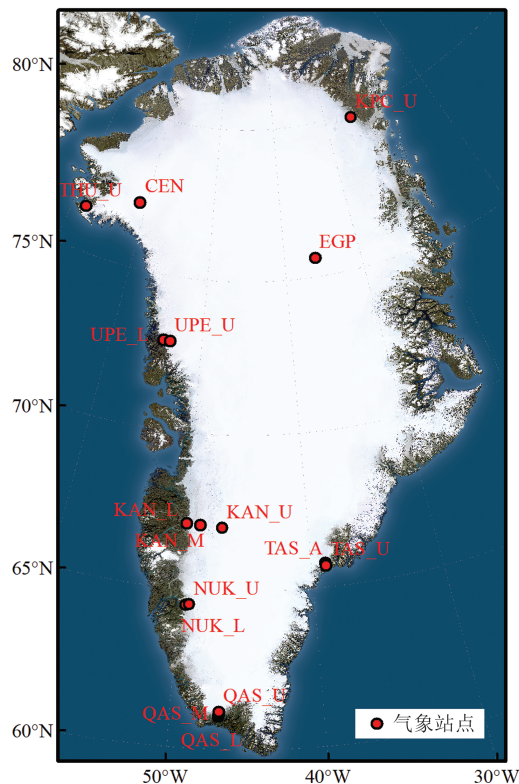


图1 格陵兰冰盖概况

Fig. 1 Overview of the Greenland Ice Sheet

1.2 研究数据

本文采用美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)提供的被动微波 SSMIS 数据对格陵兰冰盖的表面融化进行探测,数据年份与通道分别为 2011—2020 年和 37V,其中 2011—2020 年数据用于 ADAV 方法精度评估,2019 年数据进一步用于格陵兰冰盖表面融化的时空分布特征分析。NSIDC 采用辐射计版影像重构算法增强了被动微波影像的空间分辨率^[17],SSMIS 的 37V 数据空间分辨率已经提高到 3.125 km,时间分辨率为 2 次/d。

高程数据采用 NSIDC 提供的格陵兰高分辨率数字高程模型^[18],分辨率为 90 m,降采样并转换至与辐射计数据相同投影后使用。地面验证采用格陵兰冰盖监测计划(programme for monitoring of the Greenland ice sheet, PROMICE)自动气象站的气温数据^[19],该计划共设 26 个站点,每 15 min 对站点所在位置距冰盖表面垂直高 2.6 m 处的气温进行一次测量,提供小时平均数据和日平均数据,本文选用日平均气温数据对站点所在像元的表面融化探测结果进行验证。由于部分站点位于裸岩区且各站点都存在数据缺失情况,最终选择各年有效记录大于全年 80%(292 d)且夏季记录无较多缺失的 16 个站点(表 1),其在格陵兰冰盖的位置见图 1。

表 1 本文结果验证所用的自动气象站
Tab. 1 Automatic Weather Stations Used to Verify the Result of This Study

站点名称	纬度(N)/ (°)	经度(W)/ (°)	高程/ m	观测起始日期
CEN	77.133 3	61.033 3	1 880	2017 年 5 月 23 日
EGP	75.624 7	35.974 8	2 660	2016 年 5 月 1 日
KAN_L	67.095 5	49.951 3	670	2008 年 9 月 1 日
KAN_M	67.067 0	48.835 5	1 270	2008 年 9 月 2 日
KAN_U	67.000 3	47.025 3	1 840	2009 年 4 月 4 日
KPC_U	79.834 7	25.166 2	870	2008 年 7 月 17 日
NUK_L	64.482 2	49.535 8	530	2007 年 8 月 20 日
NUK_U	64.510 8	49.269 2	1 120	2007 年 8 月 20 日
QAS_L	61.030 8	46.849 3	280	2007 年 8 月 24 日
QAS_M	61.099 8	46.833 0	630	2016 年 8 月 11 日
QAS_U	61.175 3	46.819 5	900	2008 年 8 月 7 日
TAS_A	65.779 0	38.899 5	890	2013 年 8 月 28 日
TAS_U	65.697 8	38.866 8	570	2007 年 8 月 15 日
THU_U	76.419 7	68.146 3	760	2010 年 8 月 9 日
UPE_L	72.893 2	54.295 5	220	2009 年 8 月 17 日
UPE_U	72.887 8	53.578 3	940	2009 年 8 月 17 日

2 研究方法

2.1 DAV 方法

SSMIS 微波辐射计探测的地表亮温 T_b 与冰盖表面温度 T_s 具有线性关系:

$$T_b = ET_s \tag{1}$$

式中, E 表示地表发射率。传感器工作频率大于 10 GHz 时,干雪和湿雪的亮温表现出明显的差异,即使是 1% 的液态水也能引起发射率的急剧上升,从而导致湿雪的亮温增大^[11]。在冰盖融化初期与末期,冰雪在白天吸收太阳辐射发生融化,融化产生的液态水在夜间又会随着气温降低而冻结,形成冻融循环。卫星每日过境两次,当冰盖经历冻融循环时,生成的两轨亮温值也会产生较大差异,DAV 方法正是基于此原理来探测冰盖的表面融化。当日较差 DAV 的绝对值超过设定的阈值时,即认为表面发生融化。DAV 定义为:

$$D = |T_{bm} - T_{be}| \tag{2}$$

式中, D 表示 DAV 值; T_{bm} 和 T_{be} 分别表示卫星于当地时间早上和晚上过境时获取的亮温值。

以一年为周期,格陵兰冰盖各像元的 DAV 时序曲线主要具有两种形态(图 2)。对于低海拔地区,如高程约 220 m 的站点 UPE_L 所在位置,融化初期与末期,积雪冻融循环产生较大的 DAV 值;而在全天气温都比较高的 7 月至 8 月,冰盖表面融化产生的液态水来不及冻结,卫星两次过境时获取的亮温值都较大,因此产生较小的 DAV,形成一个波谷。低海拔地区的 DAV 时序曲线具有双峰特征。在高海拔地区,如高程约 1 880 m 的站点 CEN 所在位置,全年气温普遍偏低,夏季如果发生表面融化,液态水当天就会再冻结,DAV 时序曲线呈现单峰特征。

DAV 方法的优点是能够考虑发生在融化初期和末期的冻融循环,充分捕捉融化信号^[11],但是时序曲线也显示出其不能捕捉夏季的剧烈融化信号。因为夏季气温较高,白天融化产生的液态水在积雪中长时间滞留,导致两轨亮温值都很大,产生较小的 DAV。

2.2 Rosin 阈值

已有研究表明微波辐射计获取的亮温数据不仅与含水量相关,还与雪深、雪密度和雪粒径等有关。在使用 DAV 方法探测格陵兰冰盖的表面融化时,不同地区的最优阈值也不尽相同。文献[7]使用 37V 亮温数据研究全格陵兰冰盖的表

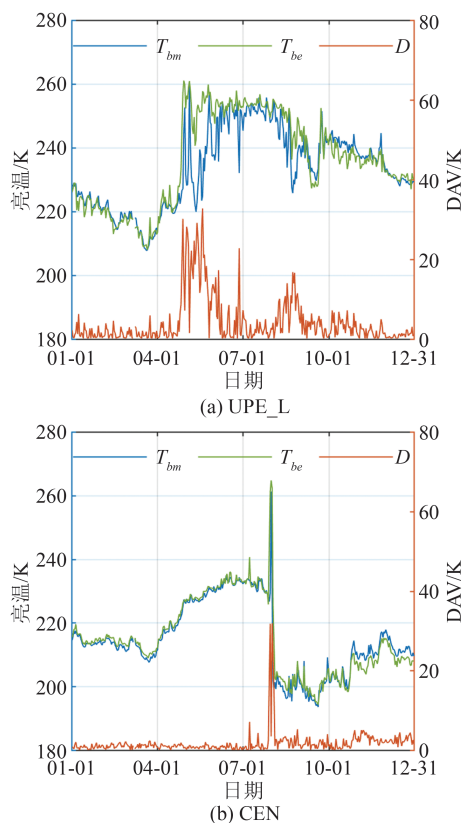


图2 2019年自动气象站UPE_L和CEN的
日亮温和DAV

Fig. 2 Brightness Temperature and DAV at UPE_L and CEN Stations in 2019

面融化时提出的DAV阈值为18 K,本文将依据被动微波数据直方图所呈现出的亮温特征,对不同区域选取不同的DAV阈值探测格陵兰冰盖的表面融化。

将DAV逐日值与冬季(12月到次年2月)中值作差,得到 ΔD 序列:

$$\Delta D(t) = D(t) - D_{wm}, t = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中, $D(t)$ 是每日DAV; t 表示年积日; D_{wm} 是DAV冬季中值,代表干雪信号。沿用前人设计亮温阈值时使用 $T_{wm} + \Delta T$ 的思想,但不使用其常用的平均值而是中值,是考虑到格陵兰冰盖可能发生冬季融化事件^[20]。 ΔD 的直方图呈单峰分布,Rosin^[21]提出过一种基于单峰直方图检测图像边缘的方法,本文将此方法迁移到时间维度,用于提取区分干雪与湿雪的阈值^[22]。使用该方法的直方图需满足两个条件:(1)大类值(干雪 ΔD)小于小类值(湿雪 ΔD);(2)第二峰足够小,可被忽略。具体的提取方法如图3所示:(1)连接第一峰的顶点和第一峰之后第一个频数为0的点;(2)获取直方图曲线上离该条直线垂直距离最远的点,最佳阈值 T 就是该点的横坐标。将 $T + D_{wm}$ 作为

DAV方法中的最优阈值,即Rosin阈值(T_{Rosin})。由于单个像元具有特殊性,其直方图并不总能满足Rosin方法的使用要求,为扩大直方图数据量,本文用高程200 m对格陵兰冰盖进行分区^[22],同一高程区间的积雪认为其具有较为相似的积雪属性,使用同一 T_{Rosin} 。对于高程1 400 m以上的区域,发生融化的天数和区域都有减少,体现在 ΔD 直方图上就是干雪信号峰值的左移和融化信号的减少,提取到的 T_{Rosin} 也随高程的升高而减小。 T_{Rosin} 过小易对融化情况产生误判,因此,对高程1 400 m以上的区域不再进行分区,统一使用1 200~1 400 m区间获取的阈值。

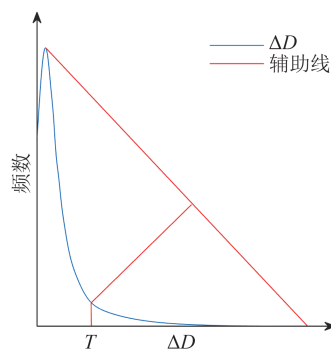


图3 Rosin方法原理示意图

Fig. 3 Principle of the Rosin Method

2.3 Ramage阈值

分析2019年格陵兰冰盖的亮温直方图(见图4),发现其具有双峰特征。Ramage等^[11]的研究指出,直方图的双峰分别代表干雪信号与湿雪信号,区分两种信号的阈值位于双峰的中间位置。本文选取双峰间最低点的亮温作为判断融化的亮温阈值,也称为Ramage阈值(T_{Ramage})。当升降轨亮温都超过此阈值时,视为剧烈融化,作为对DAV方法探测融化的补充。2019年的 T_{Ramage} 为251.22 K。

直方图还显示双峰呈不对称分布,干雪出现频次明显多于湿雪,且干雪的亮温跨度极大,从140~250 K都有分布。对于一个干雪像元,两轨亮温值都小于 T_{Ramage} 时,也可能产生较大的差值,差值超过设定阈值时,DAV方法会错误地探测到融化。因此, T_{Ramage} 也用于剔除此类误判。当像元两轨亮温值都小于 T_{Ramage} 时,即使DAV大于设定阈值,也认为其未融化。

2.4 ADAV方法

基于SSMIS被动微波遥感数据,将Rosin阈值应用于DAV方法,并结合Ramage阈值进行补充探测和剔除误探,本文提出了ADAV方法来探

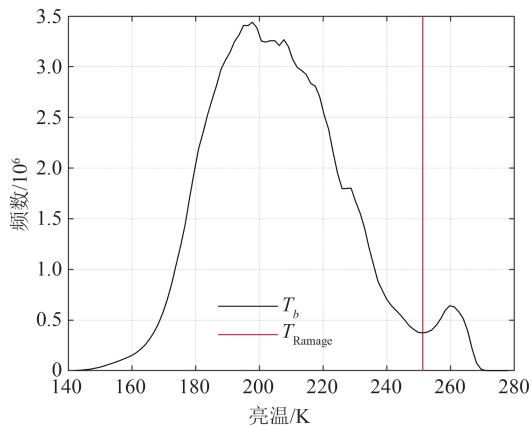


图 4 2019 年格陵兰冰盖亮温直方图

Fig. 4 Brightness Temperature Histogram of the Greenland Ice Sheet in 2019

测格陵兰冰盖的表面融化,并与 Tedesco^[7]提出的使用固定阈值的传统 DAV 法 (traditional diurnal amplitude variations, TDAV) 进行比较,其对 37V 通道设定的 DAV 阈值为 18 K,探测剧烈融化的阈值为 258 K。

本文探测格陵兰冰盖表面融化方法的计算公式为:

$$M(t) = \begin{cases} 1, \min(T_{bm}, T_{be}) > T_{Ramage} \\ N(t), T_{bm} \text{ 和 } T_{be} \text{ 中仅有一值大于 } T_{Ramage} \\ 0, \max(T_{bm}, T_{be}) \leq T_{Ramage} \end{cases} \quad (4)$$

$$N(t) = \begin{cases} 1, D(t) > T_{Rosin} \\ 0, D(t) \leq T_{Rosin} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $M(t)=1$ 表示融化, $M(t)=0$ 表示未融化; $N(t)$ 表示使用 T_{Rosin} 判断的结果。对任意一个像元的任意一天,当两轨亮温值都大于 T_{Ramage} 时,判断为融化;当两轨亮温值都小于或等于 T_{Ramage} 时,判断为未融化;当一轨亮温值大于 T_{Ramage} 而另一轨亮温值小于或等于 T_{Ramage} 时,将根据 DAV 判断,若 $D(t)$ 大于 T_{Rosin} ,判断为融化,否则判断为未融化。

3 结果与分析

3.1 ADAV 方法探测表面融化的精度评估

本文根据 2011—2020 年的 SSMIS 亮温数据,分别使用 ADAV 和 TDAV 方法探测格陵兰冰盖的表面融化。已有研究常用自动气象站的日平均气温大于 0°C 作为融化事件发生的标准,表 1 中 TAS_U 站 2015 年停止工作,因此 2019 年采用其他 15 个站点的气温正值对表面融化探测结果进行验证。表 2 为验证站点信息及两种方法

的探测精度,站点 CEN 和 EGP 处于高海拔地区,融化天数极少,所以两种方法的总体精度较高。在低海拔地区的站点中,ADAV 方法在站点 KPC_U 表现最好,精度达 95.9%;在站点 UPE_L 表现最差,精度仅为 73.4%,误差主要来源于对融化信号的遗漏。TDAV 方法在站点 KAN_U 表现最好,精度达 92.1%;在站点 QAS_L 表现最差,精度仅为 56.3%,误差也主要来源于对融化信号的遗漏。除了 TDAV 方法表现最好的 KAN_U 站点、探测情况相同的 CEN 站点和 EGP 站点外,在其他 12 个站点,ADAV 方法的探测精度都优于 TDAV 方法,表明 ADAV 方法在格陵兰冰盖表面融化的探测中普适性更高。

表 2 判别标准为 0°C 时两种方法的探测精度Tab. 2 Detection Accuracy of Two Methods with the Criterion Set to 0°C

站点	验证天数/d	ADAV/%	TDAV/%
CEN	364	99.5	99.5
EGP	363	100.0	100.0
KAN_L	357	94.4	80.1
KAN_M	353	89.5	89.0
KAN_U	356	87.6	92.1
KPC_U	364	95.9	88.7
NUK_L	356	85.4	70.5
NUK_U	356	92.4	89.6
QAS_L	341	82.1	56.3
QAS_M	350	90.0	70.6
QAS_U	350	86.6	81.7
TAS_A	355	87.6	78.3
THU_U	316	94.0	83.2
UPE_L	364	73.4	62.1
UPE_U	364	90.4	79.7

在气温低于 0°C 时,冰盖表面也可能发生融化, -1°C 和 -2°C 也曾被用作融化发生的判别标准^[9]。表 3 列出了 2019 年 3 种标准下,采用 ADAV 方法和 TDAV 方法探测格陵兰冰盖表面融化在表 2 所示 15 个站点处的平均错分误差、漏分误差和总体精度。错分误差是指遥感方法探测到而自动气象站未探测到的融化天数占遥感探测的总融化天数之比,漏分误差是指自动气象站探测到而遥感方法未探测到的融化天数占气象站探测的总融化天数之比。ADAV 方法的错分误差略高于 TDAV 方法,但具有更低的漏分误差。从总体精度分析,ADAV 方法要明显优于 TDAV 方法。在判别标准由 0°C 变化到 -2°C 时,两种方法的错分误差都有所下降,漏分误差

都有所增大,它们都在判别标准为 0℃时表现最好。

表3 ADAV与TDAV方法探测融化的精度

Tab. 3 Accuracy of the ADAV and TDAV Methods

方法	气温阈值/℃	错分误差/%	漏分误差/%	总体精度/%	平均精度/%
ADAV	0	20.39	17.95	89.9	88.9
	−1	9.20	23.30	89.0	
	−2	4.40	35.40	87.7	
TDAV	0	17.5	53.8	81.4	78.8
	−1	7.1	56.9	78.8	
	−2	3.1	67.3	76.2	

图5是两种方法探测的2019年格陵兰冰盖表面融化天数及二者差异的分布图。两种方法探测到的融化天数在空间分布上较为相似,均表现为南部融化多于北部,沿岸融化多于内陆,但是具体数值有所差异。在整个格陵兰冰盖,ADAV方法探测到的融化天数比TDAV方法平均多出12 d,融化天数越多的区域差异越大。冰盖北部由于气温较低,多发生为期较短的微弱融化,两种方法在北部探测到融化天数的差异相对显著,部分地区的差异天数甚至超过了TDAV方法探测的融化天数,表明ADAV方法对微弱融化更为敏感。

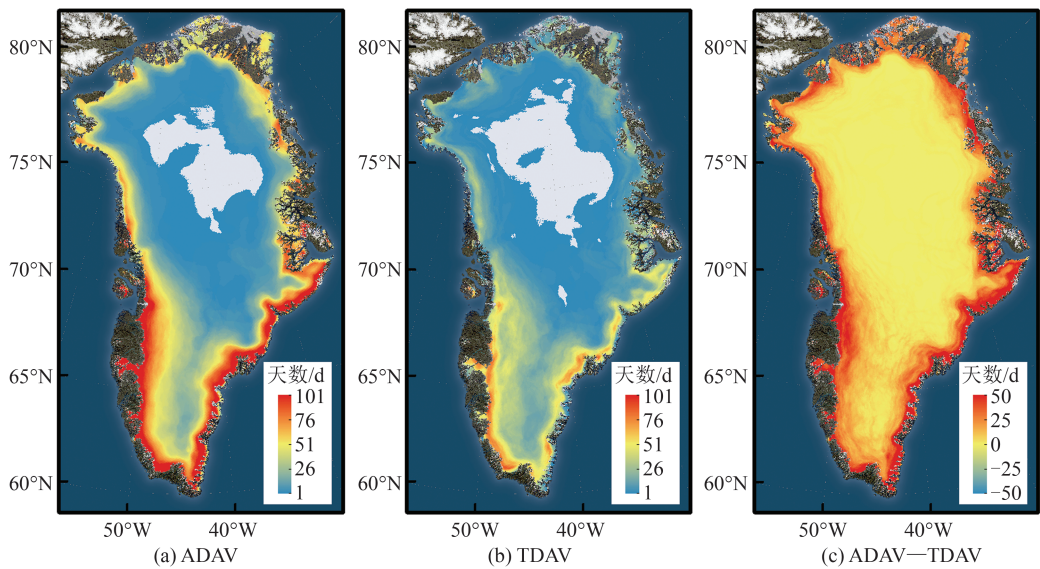


图5 ADAV与TDAV方法探测到的2019年融化天数和它们的差异

Fig. 5 Melting Days Detected by ADAV and TDAV Methods and Their Differences in 2019

格陵兰冰盖西南沿岸融化天数差异较大。图6为两种方法在此区域NUK_L站点处探测结果的比较。深蓝色实线为DAV时序曲线,绿色和紫色实线分别表示固定阈值18 K和 T_{Rosin} (此处计算为10.36 K), T_{Rosin} 小于固定阈值,因此能够探测到更多的融化。DAV曲线位于 T_{Rosin} 与18 K之间的数据点表示 T_{Rosin} 探测到融化而18 K阈值未探测到融化的情况,红色星号表示两种方法在此区间的探测差异(已分别剔除§2.3描述的误探情况),共计24 d。与自动气象站气温数据比对,此24 d全都发生了融化。图6中红色空心圆表示阈值 T_{Rosin} 探测融化后使用阈值 T_{Ramage} 对剧烈融化日的补充探测,红色加号表示阈值18 K探测融化后使用阈值258 K的补充探测。显然 T_{Ramage} 比258 K能够补充更多的融化探测,共多出19 d,与自动气象站气温数据比对,此19 d全都发生了融化。在站点NUK_L,ADAV方法的探测精度为

85.4%,而TDAV方法的探测精度仅为70.5%,这表明TDAV方法在探测融化时过于低估,遗漏了很多融化信号,而使用ADAV方法,剧烈融化信号得到有效补充。两种方法探测融化天数产生较大差异的原因为TDAV方法的下估。

选取2011—2020年PROMICE有效气温记录大于全年80%的站点(表1),对ADAV方法探测表面融化的结果进行精度评估,各年各站点数据缺失情况不同,验证站点选取不完全相同。评估结果如表4所示,10 a内有6 a平均探测精度超过90%,最低为2013年的87.8%。这表明Rosin阈值和Ramage阈值不仅在2019年能够较好地探测到格陵兰冰盖的表面融化,而且在所有验证年份的适用性都较好,数据时间对ADAV方法无明显限制。在1 400 m高程内,Rosin阈值具有随高程增加而增大的特点,在同一高程区间内,则表现出随时间小幅增长的趋势;Ramage阈值在

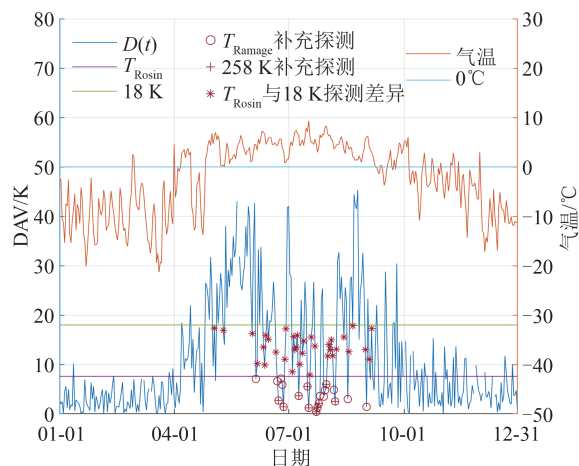


图6 ADAV与TDAV方法探测2019年融化信号在自动气象站NUK_L处的比较

Fig. 6 Comparisons of Melt Signals Detected by ADAV and TDAV at the Automatic Weather Station NUK_L in 2019

251 K左右波动,最大值与最小值相差6.11 K。

3.2 格陵兰冰盖表面融化时空特征分析

格陵兰冰盖沿岸低海拔地区融化天数较多,如图5(a)所示,东南和西南沿岸尤其明显,东北和西北沿岸由于纬度较高,融化天数明显少于南部。随着向内陆深入,融化天数逐渐减少,其减少趋势与等高线较为符合,因为气温随海拔升高而降低。ADAV方法探测的2019年格陵兰冰盖融化天数的空间分布整体上与Picard产品较为一致^[23],但局部细节上存在一定差异。2019年,格陵兰冰盖89.4%的地区都发生过表面融化。在这些区域里,融化天数少于10 d的占比43.8%;[10, 30) d的占比19.2%;[30, 50) d的占比14.9%;[50, 70) d的占比10.4%;[70, 100) d及大于或等于100 d的分别为7.3%和4.4%。由此可见,格陵兰冰盖发生融化的范围较大,但在这些区域里,经历10 d以内短暂融化的地区占主要部分。也有少部分地区融化天数超过100 d,其中融化天数最长达165 d。

表4 2011—2020年ADAV方法探测表面融化的平均精度

Tab. 4 Average Accuracy of ADAV Method for Detecting Surface Melting from 2011 to 2020

年份	验证站点数量/个	平均验证天数/d	Rosin 阈值范围/K	Ramage 阈值/K	平均探测精度/%
2011	9	350	7.21~9.78	251.53	89.9
2012	11	358	7.78~11.38	247.85	90.5
2013	12	353	7.85~13.88	253.96	87.8
2014	11	358	9.82~12.10	252.10	90.2
2015	12	350	9.69~14.50	251.51	91.0
2016	12	355	9.62~12.65	250.99	89.3
2017	13	361	8.67~12.06	250.20	90.3
2018	14	356	9.79~12.96	251.53	91.2
2019	15	354	10.36~12.17	251.22	89.9
2020	15	354	10.05~13.05	250.48	90.7

持续融化始日(融化年内连续3 d发生融化的首日)和持续融化末日(融化年内发生融化后连续7 d未融化的首日)的变化明显受海拔和纬度的影响(图7)。4月下旬前,冰盖南端就有小部分区域发生了表面融化;4月下旬至5月下旬,冰盖东南沿岸和西南沿岸逐渐开始融化。随着海拔的升高和纬度的增加,持续融化发生得越来越晚:冰盖内陆,围绕北穹的带状地区持续融化发生最晚,为7月上旬后;海拔更高的地区在2019年无持续融化发生。最早的持续融化末日为7月下旬前,发生在冰盖内陆东南。从冰盖内陆到沿岸,融化持续的时间越来越长,持续融化末日也越来越晚。南部沿岸的融化一直持续到9月中旬后,北部沿岸大部分区域的持续融化结束于8月

中下旬。

ADAV方法探测到1月3日冰盖东南沿岸就有部分地区(A区)发生了融化事件,如图7(a)蓝色椭圆所示。TAS_L站点位于东南沿岸,气温数据显示在1月3日站点平均气温达-0.13℃,在1月4日,平均气温可达0.03℃,格陵兰冰盖东南沿岸有可能发生了冬季融化事件。而冰盖西南沿岸,有两处区域的融化结束于12月,如图7(b)蓝色椭圆所示的B区和C区。两处区域在9月下旬至10月中旬结束持续融化后,保持了一段时间的冻结状态,在12月初又发生了融化。B区的融化结束于12月2日,NUK_L站点距此处较近,气温数据显示12月1日NUK_L站点的平均气温为3.01℃,与探测到的融化事件一致。C区的融化

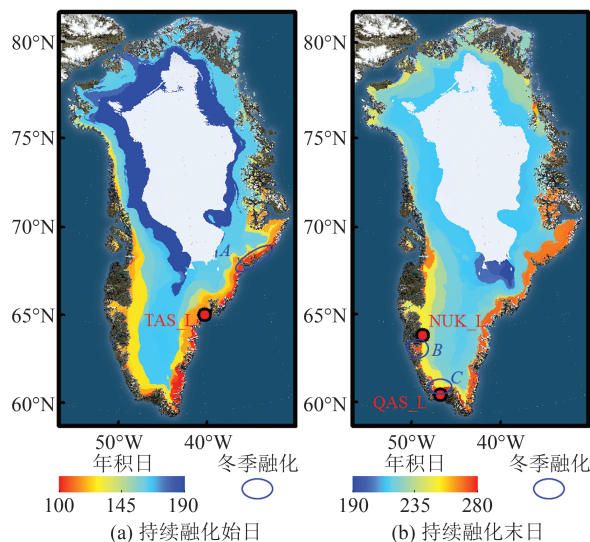


图7 2019年格陵兰冰盖持续融化始日和持续融化末日

Fig. 7 Melt Onset and Melt End of the Greenland Ice Sheet in 2019

结束于12月3日,QAS_L站点距此处较近,气温数据显示12月2日站点的平均气温为 4.06°C ,也超过了 0°C ,证实了冬季融化事件的存在。分辨率为5 km的HARMONIE-AROME天气模型显示,在以上日期格陵兰冰盖都发生了小范围的冬季融化事件^[24],并且空间分布与本文比较相近。

2019年格陵兰冰盖融化面积的时序曲线(见图8)显示,4月上旬冰盖开始融化,分别于6月13日、7月20日、7月31日3次达到融化高峰。其中7月31日是全年日融化面积最大的一天,ADAV方法探测到有 $1.18 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的冰盖发生了融化,约占整个格陵兰冰盖总面积的67%。Tedesco等^[8]的研究发现在2019年7月31日格陵兰冰盖的融化面积占比达73%,与本文的结果较为接近。与往年的融化情况^[4-9]比对,2019年格陵兰冰盖的融化天数、持续融化始末日和融化面积都显示该年冰盖融化的剧烈程度达到了新的峰值,高于平均水平的反气旋条件是此现象的主要驱动因素^[8]。

4 结 语

本文根据SSMIS被动微波数据中干雪与湿雪的亮温值在直方图上的分布差异以及融化发生时DAV的变化特征,提出ADAV方法探测格陵兰冰盖的表面融化。与自动气象站气温数据比对结果显示,ADAV方法探测2019年冰盖表面融化的平均精度达89.9%(以气温大于 0°C 为判断融化标准),比前人研究所使用的TDAV方

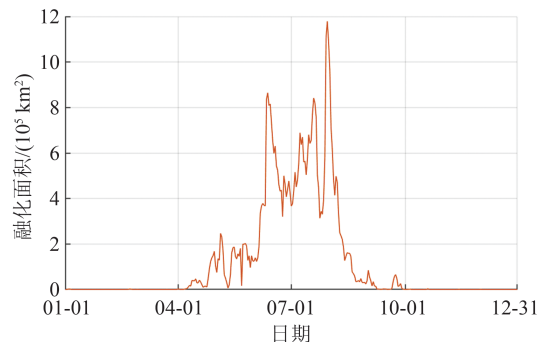


图8 2019年格陵兰冰盖融化面积变化情况

Fig. 8 Changes of Melting Area of the Greenland Ice Sheet in 2019

法有了较大提高。当时间序列扩展至10 a时,ADAV方法依旧具有较高精度,被动微波数据时间对探测精度无明显影响,进而证明了该方法应用于格陵兰冰盖融化探测的可靠性。

使用ADAV方法探测格陵兰冰盖表面融化的结果显示,2019年格陵兰冰盖约89%的区域发生了融化。在发生融化的区域中,43.7%的区域只发生少于10 d的短期融化,4.4%的区域发生多于100 d的长期融化,最多为165 d。从融化的发展来看,冰盖在4月上旬开始融化,融化事件最早发生在冰盖南端;在夏季,冰盖融化尤为剧烈,7月31日达到全年融化最高峰,当日融化面积达冰盖总面积的67%;冰盖东部和西部沿岸边缘地区的融化一直持续到9月中旬。此外,冰盖的南部沿岸发生了冬季融化事件,融化范围较小且持续时间较短。今后将使用长时序的被动微波数据分析格陵兰冰盖表面融化的年际变化特征。

参 考 文 献

- [1] Mote T L, Anderson M R, Kuivinen K C, et al. Passive Microwave-Derived Spatial and Temporal Variations of Summer Melt on the Greenland Ice Sheet [J]. *Annals of Glaciology*, 1993, 17: 233-238.
- [2] Steffen K, Abdalati W, Stroeve J. Climate Sensitivity Studies of the Greenland Ice Sheet Using Satellite AVHRR, SMMR, SSM/I and in Situ Data [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1993, 51 (3): 239-258.
- [3] van den Broeke M R, Enderlin E M, Howat I M, et al. On the Recent Contribution of the Greenland Ice Sheet to Sea Level Change [J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(5): 1933-1946.
- [4] Mote T L, Anderson M R. Variations in Snowpack Melt on the Greenland Ice Sheet Based on Passive-

- Microwave Measurements[J]. *Journal of Glaciology*, 1995, 41(137): 51-60.
- [5] Abdalati 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] Mote T L. Greenland Surface Melt Trends 1973—2007: Evidence of a Large Increase in 2007[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(22): L22507.
- [7] Tedesco M. Snowmelt Detection over the Greenland Ice Sheet from SSM/I Brightness Temperature Daily Variations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(2): L02504.
- [8] Tedesco M, Fettweis X. Unprecedented Atmospheric Conditions (1948—2019) Drive the 2019 Exceptional Melting Season over the Greenland Ice Sheet[J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(4): 1209-1223.
- [9] Colosio P, Tedesco M, Ranzi R, et al. Surface Melting over the Greenland Ice Sheet Derived from Enhanced Resolution Passive Microwave Brightness Temperatures (1979—2019)[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(6): 2623-2646.
- [10] Zwally H J, Fiegles S. Extent and Duration of Antarctic Surface Melting[J]. *Journal of Glaciology*, 1994, 40(136): 463-475.
- [11] Ramage J M, Isacks B L. Determination of Melt-Onset and Refreeze Timing on Southeast Alaskan Icefields Using SSM/I Diurnal Amplitude Variations[J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34: 391-398.
- [12] Abdalati W, Steffen K. Passive Microwave-Derived Snow Melt Regions on the Greenland Ice Sheet[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(7): 787-790.
- [13] Zheng L, Zhou C X, Liu R X, et al. Antarctic Snowmelt Detected by Diurnal Variations of AMSR-E Brightness Temperature[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1391.
- [14] Morlighem M, Williams C N, Rignot E, et al. Bed-Machine V3: Complete Bed Topography and Ocean Bathymetry Mapping of Greenland from Multibeam Echo Sounding Combined with Mass Conservation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(21): 11051-11061.
- [15] Zhang Baojun, Wang Zemin. Global Sea Level Variations Estimated from Satellite Altimetry, GRACE and Oceanographic Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1453-1459. (张保军, 王泽民. 联合卫星重力、卫星测高和海洋资料研究全球海平面变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(11): 1453-1459.)
- [16] Chen Z Q, Chi Z H, Zinglensen K B, et al. A New Image Mosaic of Greenland Using Landsat-8 OLI Images[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(7): 522-524.
- [17] Brodzik M J, Long D G, Hardman M A, et al. MEaSUREs Calibrated Enhanced-Resolution Passive Microwave Daily EASE-Grid 2.0 Brightness Temperature ESDR, Version 1[EB/OL]. (2016-12-26)[2021-12-20]. <https://doi.org/10.5067/MEASURES/CRYOSPHERE/NSIDC-0630.001>.
- [18] Howat I M, Negrete A, Smith B E. The Greenland Ice Mapping Project (GIMP) Land Classification and Surface Elevation Data Sets[J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(4): 1509-1518.
- [19] Ahlstrøm A P, Team P P. A New Programme for Monitoring the Mass Loss of the Greenland Ice Sheet[J]. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 2008, 15: 61-64.
- [20] Pitcher L H, Smith L C, Gleason C J, et al. Direct Observation of Winter Meltwater Drainage from the Greenland Ice Sheet[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(9): e2019GL086521.
- [21] Rosin P L. Unimodal Thresholding[J]. *Pattern Recognition*, 2001, 34(11): 2083-2096.
- [22] Zheng L, Zhou C X, Wang K. Enhanced Winter Snowmelt in the Antarctic Peninsula: Automatic Snowmelt Identification from Radar Scatterometer[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 246: 111835.
- [23] 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.
- [24] Bengtsson L, Andrae U, Aspelien T, et al. The HARMONIE-AROME Model Configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP System[J]. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(5): 1919-1935.