Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2019, 8(4), 473-483
Published Online July 2019 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2019.84052

Analysis on the Characteristics of Greenland Ice Sheet Mass Change and a Preliminary Study on Mechanism

Ruomei Ruan

College of Oceanic and Atmospheric Science, Ocean University of China, Qingdao Shandong
Email: ruanruomei@126.com

Received: Jun. 22nd, 2019; accepted: Jul. 2nd, 2019; published: Jul. 9th, 2019

Abstract

Greenland ice sheet (GrIS) is an important regulator of global climate. The melting water of the ice sheet not only increases the global sea level, but also weakens the deep convection in the North Atlantic Subpolar Region, thus slowing down the meridional reversal circulation of the Atlantic Ocean, which will affect the global thermohaline circulation and change the global heat distribution [1] [2]. Based on GRACE gravity satellite data, MAR regional model data, DMI weather station data and ERA global reanalysis data, the temporal and spatial characteristics of GrIS mass change during GRACE observation period are analyzed. The main factors that control GrIS mass change are studied by means of mass balance and surface energy balance method, and the dynamic mechanism of GrIS mass change is preliminarily discussed. The results show that the accelerated mass loss of GrIS in 2003-2012 has decelerated since 2013, and the main slowdown area is in the southeast of GrIS. The GrIS mitigation events started in 2013 were due to increased cloud cover, enhanced albedo, reduced net shortwave radiation and subsequent summer melting, which may be related to the sea level pressure of the summer North Atlantic Oscillation changes.

Keywords

Greenland Ice Sheet, Summer North Atlantic Oscillation, Mass Budget, Surface Energy Balance

格陵兰冰盖质量变化的特征与机制初探

阮若梅

中国海洋大学海洋与大气学院，山东 青岛
Email: ruanruomei@126.com

收稿日期：2019年6月22日；录用日期：2019年7月2日；发布日期：2019年7月9日

文章引用: 阮若梅. 格陵兰冰盖质量变化的特征与机制初探[J]. 气候变化研究快报, 2019, 8(4): 473-483.
DOI: 10.12677/ccrl.2019.84052

摘　要

格陵兰冰盖(GrIS)作为全球气候的重要调控因素，冰盖融化的水不仅使全球海平面上升，还令北大西洋亚极地区域的海水变淡，从而减弱深层对流，进而减缓大西洋经向翻转环流，这将影响全球热盐环流，并改变全球热量分布[1] [2]。本文基于GRACE重力卫星数据、MAR区域模式数据、DMI天气站点数据和ERA全球再分析数据分析了GrIS质量变化在GRACE观测时期的时空特征；通过质量收支平衡以及表面能量平衡方法研究了控制GrIS质量变化的主要因素；并对GrIS质量变化的动力机制进行初步探讨。结果表明GrIS在2003~2012年质量加速损失，从2013年开始，质量损失趋于平缓，主要减缓的区域在GrIS东南部。2013年开始的GrIS减缓事件的原因是云量增多、反照率增强，净短波辐射减少进而夏季融化减少，这可能与夏季北大西洋涛动改变的气压场有关。

关键词

格陵兰冰盖，夏季北大西洋涛动，质量收支，表面能量平衡

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

格陵兰岛位于大西洋与北极之间，经纬度 59.46˚N~83.39˚N；73.08˚W~11.39˚W，岛屿面积 216 万平方公里，是世界最大的岛屿；格陵兰冰盖(GrIS)作为大小仅次于南极冰盖的世界第二大冰盖，是气候变化的重要调控因素之一。

GrIS 巨大的蓄积率和显著的径流以及融水生成，使其成为一个高度动态变化的地方。GrIS 的快速变化可能会影响全球海平面上升，并可能改变 AMOC 和全球气候[1] [2]。GrIS 是正在发生的气候变化的一个指标，整个冰盖对气候的影响已经被许多研究所证明。1990s 使用机载高度计测量的 GrIS 显示其边缘地区冰盖变薄，在中部区域有轻微的增厚[3]。随后的测量结果显示，沿海地区冰盖变薄加剧，并集中在被冰川出口占据的狭窄山谷中[4]。高度计数据研究显示[5] [6]，从 1992 年到 2003/4 年，2000 米以上的 GrIS 内部出现了显著的(2~5 cm/yr)增长，这可能是由大气湿度和降水量的增加和(或)风暴路径的移动所致[7]。Velicogna 等人[8]利用 22 个月的 GRACE 重力场首次从太空测量估算整个 GrIS 的质量变化。Ramillien 等人[9]于 2006 年使用 GRACE 数据(利用新的大地水准面)计算了(2002 年 7 月~2005 年 3 月)这一时间段的 GrIS 质量变化及其对海平面上升的贡献。由于 GRACE 卫星数据的采样时间跨度非常短，尚无法区分年际振荡与气候变化相关的长期趋势。Velicogna 等人[10]使用了一段较长的连续时间(2002~2009 年)的 GRACE 数据分析格陵兰的冰盖质量变化。但是，这些开创性的分析估计之间存在许多差异和不确定性，对于影响格陵兰的冰盖质量变化的物理机制的探讨也比较少。

Hanna 等人[11]将 1990 年代以来冰盖变薄融化及径流增加与夏季温度显著增加归因于全球气候变暖。如果 GrIS 全部融化，全球海平面将上升约 7.4 m，另外研究也表明 GrIS 容易受到人类行为导致的气候变暖的影响[12]。自上世纪 90 年代初以来，随着大气变暖，GrIS 地表径流增加，格陵兰表面融化过程约占整个 GIS 总质量损失的一半[13]，在表面温度长期升高的情况下，这一比例甚至更大[14]。然而，由于针对 GrIS 整体研究的数据跨度较短，尚未有研究提供一个更有说服力的多年代际视角，来研究冰盖如何应

对长期气候变化，尤其是自 20 世纪 70 年代以来明显的全球变暖现象。

本文基于更新的 GRACE 数据重新对 GrIS 的时空分布特征进行分析，并使用区域模式数据结合多种研究方法探究控制冰盖质量变化的主要原因。

2. 数据资料与研究方法

2.1. 数据资料

格陵兰质量变化研究的主要数据是来自 GRACE 卫星的观测数据[15]。版本是 GFZ RL05，水平分辨率 1 度，数据变量为液态水当量厚度，单位是厘米。从 2003 年 1 月到 2016 年 12 月，GRACE 数据有 13 个月的缺测。格陵兰岛上的天气站(丹麦气象研究所，DMI)提供了环绕格陵兰岛的观测温度(GrT)站点数据，72 个气象站中有 68 个站点的温度观测数据是从 1958 年开始的，其中的四个站点(Upernavik, Ilulissat, Nuuk, Tasiilaq)有长达百年尺度的持续观测数据。研究格陵兰表面能量变化时使用的向下短波辐射(SWD)、向下长波辐射(LWD)、向上长波辐射(LWU)、感热通量(SHF)、潜热通量(LHF)、反照率(AL)和云量(CC)等变量的日平均数据由区域气候模式 Modèle Atmosphérique Régional (MAR)获得[16]，本文使用的 MAR 模式数据是由 NCEP 再分析数据驱动的，该模式在格陵兰岛运行的分辨率高达 20 km，数据长度为 1948~2017 年。格陵兰周边的海表面温度(SST)数据来源于 ERSST V3b，使用的数据时间长度为 1979~2016。格陵兰的平均海平面气压数据是欧洲中期天气预报中心(ECWMF)的 ERA-Interim 的 1979~2017 年的 1/8 度分辨率月平均数据。

2.2. 研究方法

本文采用数理统计、线性拟合等方法对 GrIS 质量的时空特征进行分析，用质量收支平衡方法和表面能量平衡方法对控制 GrIS 质量变化的具体原因进行研究。最后使用经验模态分解方法(EMD) [17]分析 GrIS 表面温度的不同时间尺度信号，并通过回归分析方法初步研究控制 GrIS 质量变化的动力机制。

3. 格陵兰冰盖质量变化特征

3.1. 格陵兰冰盖质量的时空变化

如图 1 所示，基于 GRACE 卫星数据显示的 GrIS 质量在 21 世纪初期呈现加速减少的趋势，其中 2012 年夏季还出现了极端融化事件。然而从 2013 年开始，GrIS 质量损失的速度开始减缓。

Figure 1. The time series of GrIS mass change observed by GRACE satellite since 2003. The grey points represent the data of missing months filled with linear interpolation method

图 1. GRACE 卫星自 2003 年以来观测到的 GrIS 质量变化时间序列，灰点代表使用线性插值法填充的缺测月份的数据

从空间分布来看，自有 GRACE 卫星观测以来，2013 年以前 GrIS 东南区域呈现质量加速损失的趋势，2013 年以后 GrIS 西北区域保持与前十年几乎一致的变化速度，而其南部冰盖加速减损的趋势明显减缓，在格陵兰东部区域冰盖质量变化趋势甚至转变为轻微增加(图 2)。尽管发生质量损失减速变化的时间段尚短(仅五年长度)，线性趋势的估计结果对于时间段的挑选十分敏感，GrIS 质量加速损失的趋势减缓现象仍是十分明显的。

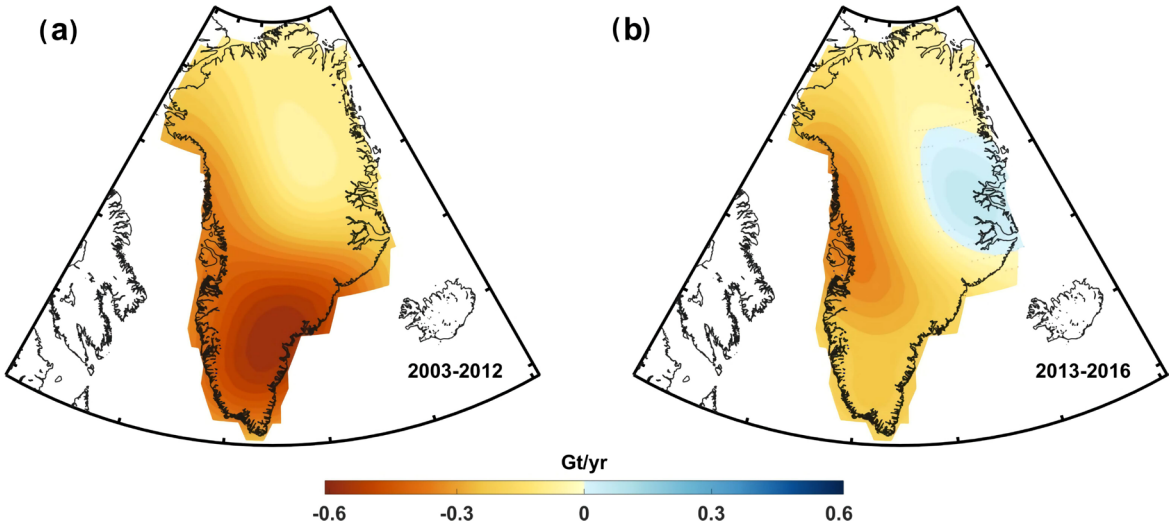

Figure 2. (a) The linear trend of GrIS melting observed by GRACE satellite in 2003-2012 and (b) the spatial pattern in 2013-2016, respectively. Except for the light grey dotted area in (b), all other spatial lattice points have passed 95% confidence test for linear trend estimation

图 2. (a) GRACE 卫星观测的 GrIS 融化的线性趋势分别在 2003~2012 年和 (b) 2013~2016 年的空间型。除了(b)中的浅灰色打点区域外，其他所有空间格点对线性趋势的估计都通过 95%置信检验

3.2. 格陵兰冰盖质量收支

质量收支平衡方法表明冰盖质量变化由表面质量平衡(SMB)和冰流量(D)决定，其中 SMB 由降水(雪)的压缩结冰量和融化或蒸发(升华)的冰雪量决定。总体来看，冰盖质量变化可以分成增加和减少两部分，增加的过程包括降雨、降雪、结冰，减少量则由表面融化、蒸发(升华)以及 D 控制，其中 D 与表面融化量密切相关[18]。观测结果与模型预测一致认为 SMB 而非 D 主导冰盖对 21 世纪海平面上升的贡献[19]。由于数据及方法的限制，本文暂不对 D 进行详细计算，主要对 SMB 进行分析研究。MAR 模式数据中的 SMB 变量由降雪(SF)、降雨(RF)、径流(RU)、蒸发(SU)和地表水(SW)计算构成。所有冰盖质量变化控制因素中，SU 和 SW 相比于其它量的变化可忽略不计，因此本文主要对 SF、RF、RU 进行分析研究。

模式数据中 GrIS 的 SMB 也呈现出与 GRACE 卫星观测数据一致的变化，2003~2012 年 SMB 迅速减少，2013 年开始有所回升。SMB 的变化主要受 RU 控制，而 RU 主要由融化量决定(图 3)，模式数据中降雪(雨)的影响并不明显。

图 4 显示了 MAR 模式数据中的 SMB 及其变量的夏季(JJA)季节变化。结果显示自 2013 年开始的 SMB 回升在夏季表现明显，并且 SMB 主要被 RU(融化)所控制，RU 与 SMB 的相关系数为 0.99。夏季降雨降雪的量级相比融化径流小，并且没有明显变化趋势。

MAR 模式数据中的 SMB 及其变量的冬季(DJF)季节变化如图 5 所示。冬季 SMB 主要受降雪控制，除了振幅在 1997 年以后减小，并无其他变化趋势。融化降雨和径流都接近于零。

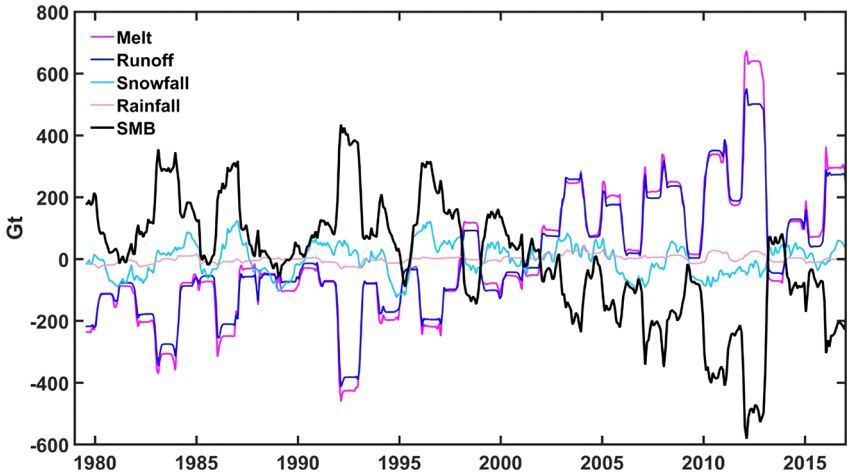

Figure 3. The anomaly time series of melt, runoff, snowfall, rainfall and SMB in MAR model data from 1979 to 2017
图 3. MAR 模式数据中的融化、径流、降雪、降雨及表面质量平衡在 1979~2017 年的异常变化

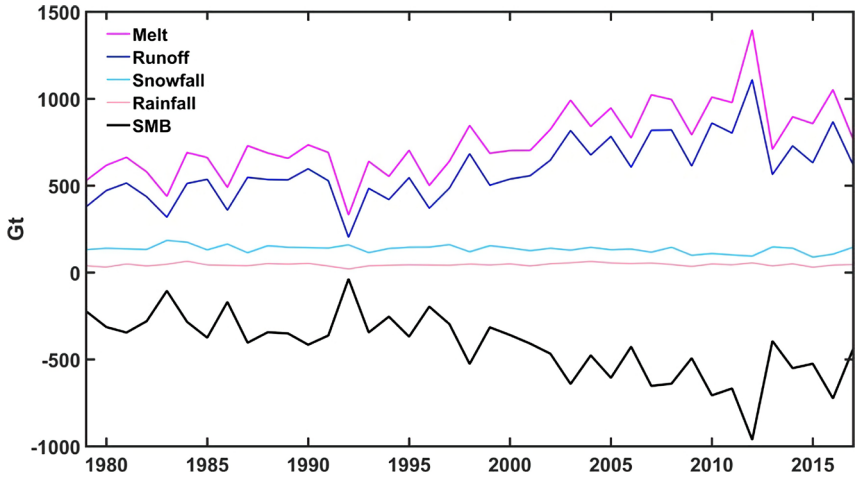

Figure 4. The anomaly time series of summer melt, runoff, snowfall, rainfall and SMB in MAR model data from 1979 to 2017
图 4. MAR 模式数据中的夏季融化、径流、降雪、降雨及表面质量平衡的 1979~2017 年际变化

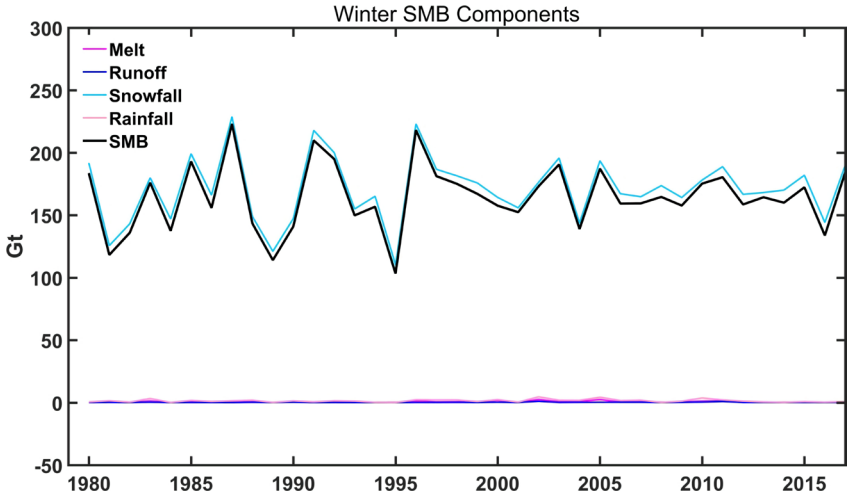

Figure 5. The anomaly time series of winter melt, runoff, snowfall, rainfall and SMB in MAR model data from 1979 to 2017
图 5. MAR 模式数据中的冬季融化、径流、降雪、降雨及表面质量平衡的 1979~2017 年际变化

通过对控制 GrIS 质量变化的 SMB 及其分量的变化趋势进行分析发现，降雨降雪并不是影响冰盖质量损失的主要因素，夏季融化量的改变才是控制 SMB 改变，进而使得冰盖质量变化的主要原因。

3.3. 格陵兰冰盖表面能量平衡

通过 MAR 模式数据的初步分析基本可以确定冰盖质量加速损失自 2013 年开始的减缓现象是被表面融化速度减缓控制。根据表面能量平衡方法，冰盖表面融化是由净热通量控制。表面能量平衡对应的热通量融化贡献计算公式为：$M = Q_n \delta t \left(L_f \rho\right)^{-1}$。其中 Q_n 为净热通量(wm^{-2})；δt 为单位时间间隔(s)；L_f 是融解潜热(3.335 × 10^5 Jkg^{-1})；另外 ρ 是水的密度(1000 kgm^{-3})。对比 MAR 模式数据给出的融水量和利用表面能量平衡计算的净热通量对应的融化量，二者基本一致(图 6)。

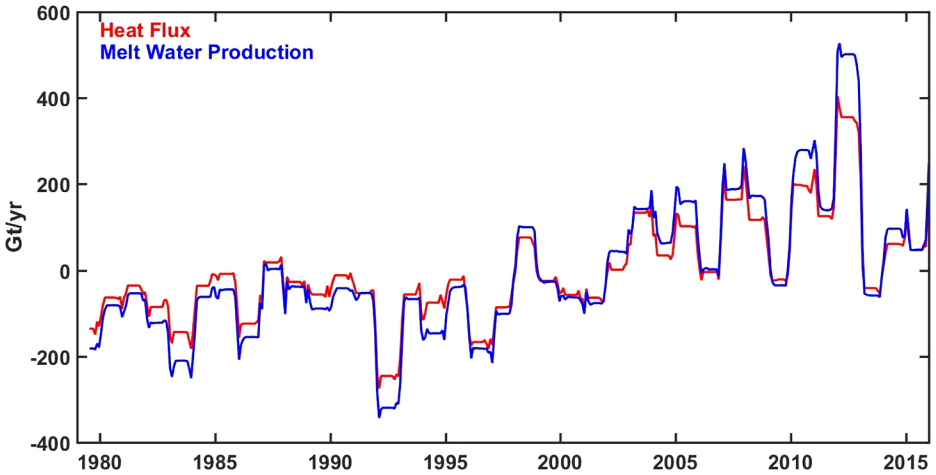

Figure 6. Variation of melting water (blue line) and melting water volume (red line) calculated by net heat flux from 1979 to 2017 based on MAR model data
图 6. MAR 模式数据的 1979~2017 年融水量变化(蓝线)及由净热通量计算的对应融化量(红线)

净热通量由辐射通量(短波辐射、长波辐射)和湍流热通量(感热通量、潜热通量)组成(图 7)。规定热

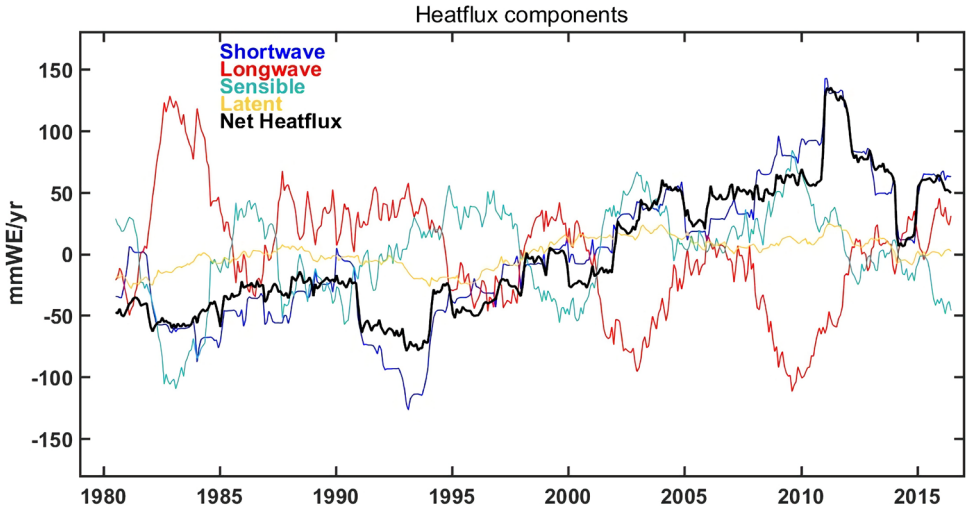

Figure 7. Time series of surface net heat flux, short wave radiation, long wave radiation, sensible heat flux and latent heat flux in Greenland from 1979 to 2016
图 7. 格陵兰岛 1979~2016 年地表净热通量及短波辐射、长波辐射、感热通量、潜热通量变化的时间序列

通量向下为正，一般净短波辐射向下，净长波辐射方向向上。1979~2016 年格陵兰岛上的净热通量的变化与短波辐射的变化相似，感热通量与净长波辐射变化是负相关关系，潜热通量相比其他三个分量，量值和变化可以忽略不计。

GrIS 表现出的质量损失是由于冬季净增加质量(结冰量)小于夏季净减少质量(融化量)形成的，而导致质量减少的速度减缓的可能原因有两个，分别是夏季融化量减少和冬季结冰量增加。

进一步对夏季融化时期的净热通量的各个分量进行分析，结果表明由 MAR 模式数据直接给出的融化质量(图 8 蓝线)与通过表面能量平衡方法用净热通量计算的能量对应融化质量(图 8 红线)的时间序列变化一致。图 8(a)为净热通量及其各分量在夏季对融化的能量贡献的年际变化，夏季净热通量主要被净短波辐射控制，净短波辐射的变化趋势的改变控制了夏季融化质量在 2012 年以后的减少。而 GrIS 夏季的湍流热通量(潜热、感热)并没有明显的变化趋势。图 8(b)显示的冬季净热通量的分量中主要变化部分是长波辐射和感热通量。净热通量及融化质量都没有明显的变化，冬季短波辐射接近于零。无论在冬季还是夏季，潜热通量对冰盖质量改变的能量贡献都很小。

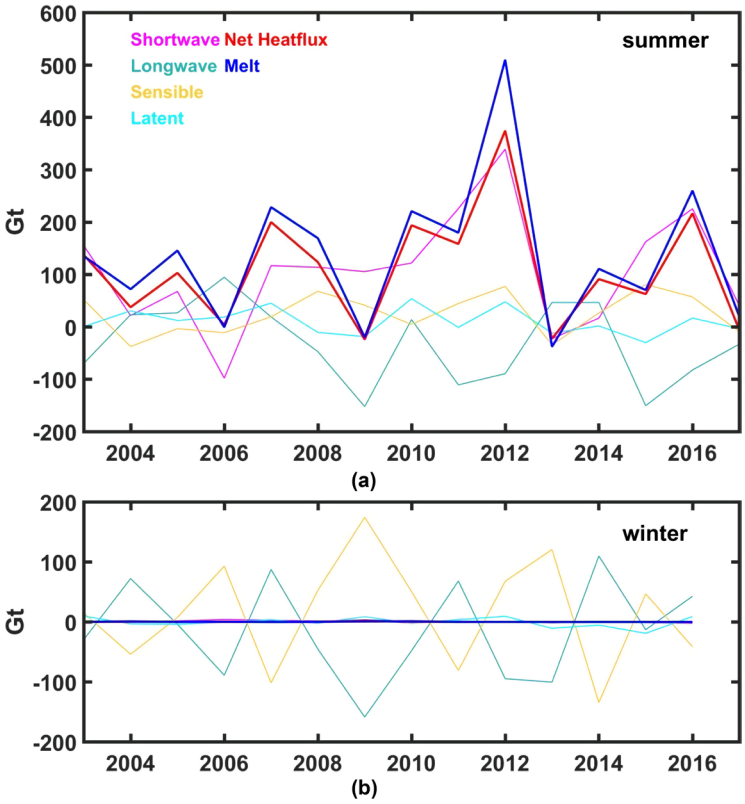

Figure 8. Time series of ice sheet melting in Greenland in summer (a) and winter (b) based on net heat flux and its components (net short wave radiation, net long wave radiation, sensible heat flux and latent heat flux) and MAR model melt production

图 8. (a)夏季和(b)冬季的格陵兰岛上根据净热通量及各分量(净短波辐射、净长波辐射、感热通量、潜热通量)计算的对应冰盖融化量及 MAR 模式给出的融化量的变化趋势

3.4. 格陵兰冰盖表面能量平衡的控制因素

结合上述分析可知，GrIS 自 2013 年开始的质量损失速度减缓的现象主要是由于夏季融化质量的减少。GrIS 的融化取决于表面热通量(能量平衡)，能量平衡又由表面特征属性以及气象条件控制，例如地表反照率、云量、近地面气温等，冰盖能量平衡过程中，各项表现是密切联系的。根据上一节的分析，夏季

融化主要受到净短波辐射的控制。而净短波辐射由向下短波辐射和向上短波辐射组成，向下短波辐射主要受云量控制，向上短波辐射主要受表面反照率控制。图 9 展示的夏季冰盖上空云量及反照率时间序列都具有自 2013 年前后增加的趋势。当云量开始回升后，夏季向下的辐射通量减少，融化减弱，进而反照率也降低。

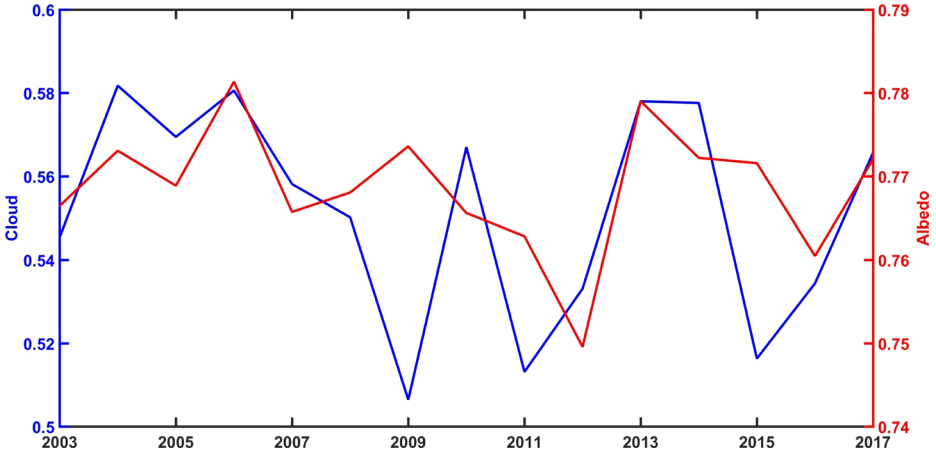

Figure 9. Trends of GrIS cloud cover (blue line) and albedo (red line) in summer
图 9. GrIS 夏季上空云量覆盖率(蓝线)及反照率(红线)变化趋势(数据来源于 MAR)

4. 格陵兰冰盖质量变化动力机制的初步研究

由 GRACE 卫星数据展现出的冰盖表面融化的记录与站点观测的近地面空气温度变化一致，并常常作为冰盖融化研究的替代系数(Tedesco 等，2011)。在格陵兰上有 72 个天气站点，其中的 68 个站点有从 1958 年开始的温度观测数据记录，剩下四个站点(Upernavik、Ilulissat、Nuuk、Tasiilaq)有百年尺度的长时间记录。尽管大部分站点位于海岸附近，站点的温度观测序列在十年和多年代际尺度上都有一致的变化，冰盖近地面温度升高时，质量减少的速度增大，反之对应(图 10)。本文使用四个百年尺度夏季(JJA)近地面温度的平均作为夏季格陵兰近地面温度时间序列(GrT)。

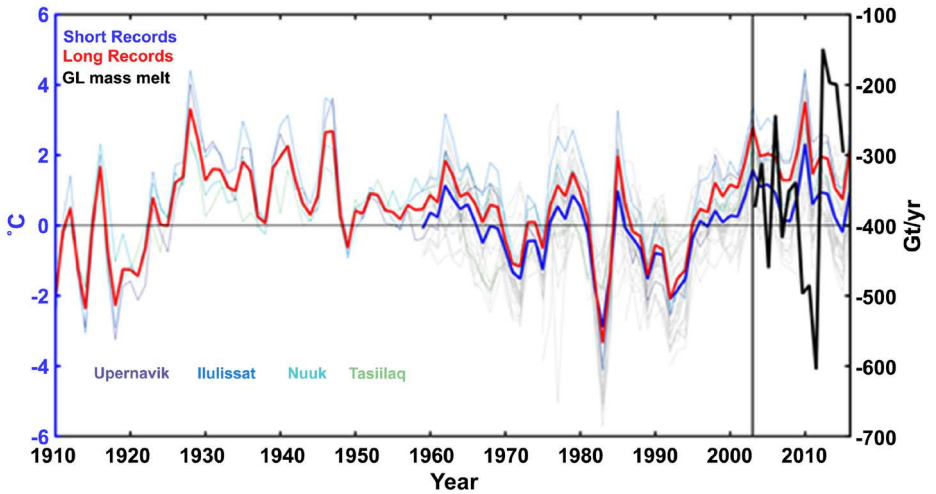

Figure 10. Summer time series and mean values of near-surface temperature in Greenland; changes in summer melting of GrIS (black line)
图 10. 夏季格陵兰站点温度及冰盖融化的变化趋势

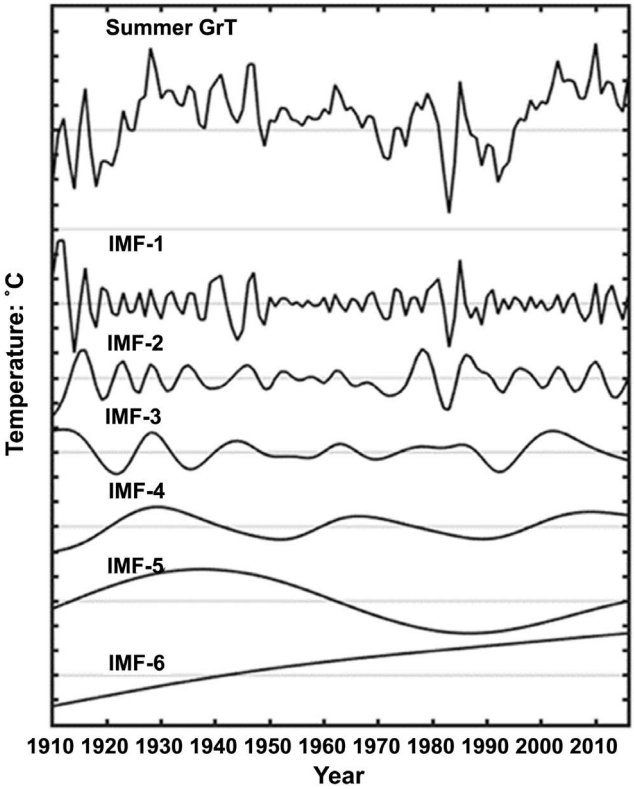

Figure 11. Empirical mode decomposition (EMD) components (IMF) of GrT in summer of 1910-2016
图 11. 1910~2016 年夏季 GrT 的经验模态分解(EMD)各分量(IMF)

将 GrT 进行经验模态分解得到 6 个近乎正交的 IMF 分量(图 11)，代表着 GrT 不同时间尺度的变化及周期，其中 IMF6 为长期的变暖趋势，IMF1~2 为年代际时间尺度信号，IMF3~5 为十年际和多年代际时间尺度信号。将 GrT 分解后的各分量投影到 SLP 和 SST 上的空间型呈对应关系(图 12)，这是由于 SST 与 SLP 本身也有密切的联系。其中 SLP 的空间型表现的特征更为明显，IMF2~6 的 SLP 投影都大体呈现出格陵兰岛与欧洲大陆西北部的两极结构，该结构与夏季北大西洋涛动类似。因此，夏季北大西洋涛动控制的气压环境(大气环流)改变可能对冰盖融化状况产生影响。

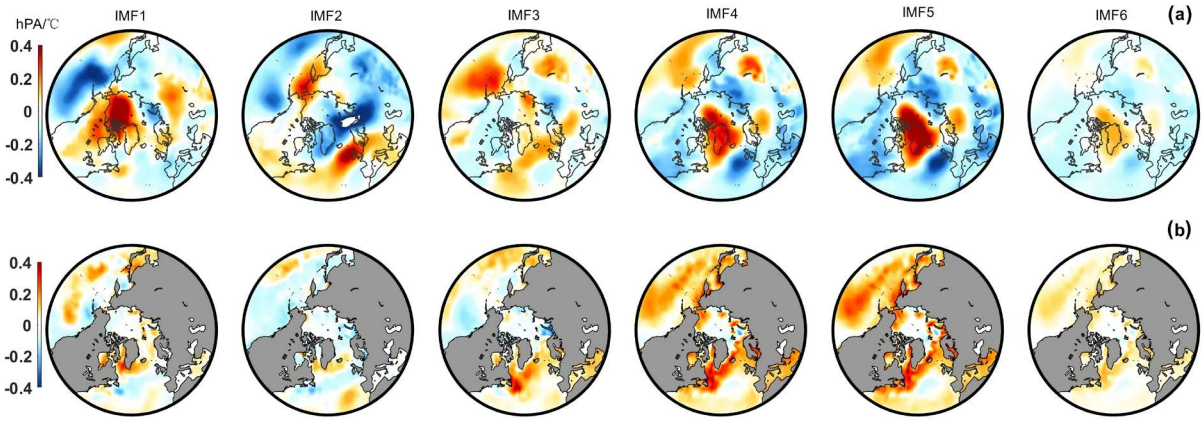

Figure 12. The spatial pattern of IMF components of GrT in summer that projected to sea level pressure field (SLP) and sea surface temperature field (SST) from 1982 to 2016, respectively
图 12. 夏季 GrT 的 6 个 IMF 分量分别投影到 1982~2016 年的海平面气压场(SLP)和海表面温度场(SST)

5. 结语

本文基于 GRACE 重力卫星数据、MAR 区域模式数据、DMI 天气站点数据和 ERA 全球再分析数据对 GrIS 冰盖质量变化的时空变化特征进行分析，研究了控制 GrIS 质量变化的主要因素并对主要的动力过程进行初步探讨。得到的结论为 GrIS 在 2003~2012 年质量加速损失，从 2013 年开始，质量损失趋于平缓，主要减缓的区域在 GrIS 东南部。2013 年开始的 GrIS 减缓事件的原因是云量增多、反照率增强，净短波辐射减少进而夏季融化减少，这可能与夏季北大西洋涛动改变的气压场有关。

研究过程中由于数据的限制，忽略了 D 对冰盖的影响，尽管 D 与表面融化量有关，但二者关系并非一成不变。未来的研究中除了进一步研究夏季北大西洋涛动的具体动力过程，还可以深入研究 D 对冰盖的作用。

参考文献

[1] Hu, A., Meehl, G.A., Han, W. and Yin, J. (2011) Effect of the Potential Melting of the Greenland Ice Sheet on the Meridional Overturning Circulation and Global Climate in the Future. *Deep-Sea Research Part II*, **58**, 1914-1926. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.10.069

[2] Chen, X.Y. and Tung, K.-K. (2018) Global Surface Warming Enhanced by Weak Atlantic Overturning Circulation. *Nature*, **559**, 387-391. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0320-y

[3] Krabill, W., Frederick, E., Manizade, S., Martin, C., Sonntag, J., Swift, R., Thomas, R., Wright, W. and Yungel, J. (1999) Rapid Thinning of Parts of the Southern Greenland Ice Sheet. *Science*, **283**, 1522-1524. https://doi.org/10.1126/science.283.5407.1522

[4] Krabill, W. (2004) Greenland Ice Sheet: Increased Coastal Thinning. *Geophysical Research Letters*, **31**, L24402. https://doi.org/10.1029/2004GL021533

[5] Thomas, R., Frederick, E., Krabill, W., Manizade, S., Martin, C. and Mason, A. (2005) Elevation Changes on the Greenland Ice Sheet from Comparison of Aircraft and Icesat Laser-Altimeter Data. *Annals of Glaciology*, **42**, 77-82. https://doi.org/10.3189/172756405781813050

[6] Zwally, H.J., *et al*. (2005) Mass Changes of the Greenland and Antarctic Ice Sheets and Ice Shelves and Contributions to Sea Level Rise: 1992-2002. *Journal of Glaciology*, **51**, 509-527. https://doi.org/10.3189/172756505781829007

[7] Hanna, E., Mcconnell, J., Das, S., Cappelen, J. and Stephens, A. (2006) Observed and Modeled Greenland Ice Sheet Snow Accumulation, 1958-2003, and Links with Regional Climate Forcing. *Journal of Climate*, **19**, 344-358. https://doi.org/10.1175/JCLI3615.1

[8] Velicogna, I. and Wahr, J. (2005) Greenland Mass Balance from Grace. *Geophysical Research Letters*, **32**, L18505. https://doi.org/10.1029/2005GL023955

[9] Ramillien, G., Lombard, A., Cazenave, A., Ivins, E.R., Llubes, M., Remy, F., *et al*. (2006) Interannual Variations of the Mass Balance of the Antarctica and Greenland Ice Sheets from Grace. *Global and Planetary Change*, **53**, 198-208. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.06.003

[10] Velicogna, I. (2009) Increasing Rates of Ice Mass Loss from the Greenland and Antarctic Ice Sheets Revealed by GRACE. *Geophysical Research Letters*, **36**, 158-168. https://doi.org/10.1029/2009GL040222

[11] Hanna, E., Huybrechts, P., Steffen, K., *et al*. (2010) Increased Runoff from Melt from the Greenland Ice Sheet: A Response to Global 1. *Journal of Climate*, **21**, 331-341. https://doi.org/10.1175/2007JCLI1964.1

[12] Gregory, J.M., Huybrechts, P. and Raper, S.C.B. (2004) Climatology: Threatened Loss of the Greenland Ice-Sheet. *Nature*, **428**, 616. https://doi.org/10.1038/428616a

[13] van den Broeke, M., Bamber, J., Ettema, J., Rignot, E., Schrama, E., van de Berg, W.J., van Meijgaard, E., Velicogna, I. and Wouters, B. (2009) Partitioning Recent Greenland Mass Loss. *Science*, **326**, 984-986. https://doi.org/10.1126/science.1178176

[14] Smith, L.C., *et al*. (2014) Efficient Meltwater Drainage through Supraglacial Streams and Rivers on the South West Greenland Ice Sheet. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 1001-1006. https://doi.org/10.1073/pnas.1413024112

[15] Chen, J.L., Wilson, C.R. and Tapley, B.D. (2006) Satellite Gravity Measurements Confirm Accelerated Melting of Greenland Ice Sheet. *Science*, **313**, 1958-1960. https://doi.org/10.1126/science.1129007

[16] Fettweis, X., *et al*. (2011) The 1958-2009 Greenland Ice Sheet Surface Melt and the Mid-Tropospheric Atmospheric

Circulation. *Climate Dynamics*, **36**, 139-159. https://doi.org/10.1007/s00382-010-0772-8

[17] Huang, N.E., *et al*. (1998) The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*: *Mathematical*, *Physical and Engineering Sciences*, **454**, 903-995. https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193

[18] Zwally, H.J., Abdalati, W., Herring, T., *et al*. (2002) Surface Melt-Induced Acceleration of Greenland Ice-Sheet Flow. *Science*, **297**, 218-222. https://doi.org/10.1126/science.1072708

[19] Enderlin, E.M., Howat, I.M., Jeong, S., Noh, M.J., Van Angelen, J.H. and Van, D.B.M.R. (2014) An Improved Mass Budget for the Greenland Ice Sheet. *Geophysical Research Letters*, **41**, 866-872. https://doi.org/10.1002/2013GL059010

Hans 汉斯

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：http://cnki.net/，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：http://scholar.cnki.net/new，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
   或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2168-5711，即可查询。
2. 通过知网首页 http://cnki.net/顶部“旧版入口”进入知网旧版：http://www.cnki.net/old/，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：ccrl@hanspub.org