

陈志强, 刘骥平, 范广洲, 等. 2015. 2013 和 2012 年夏季格陵兰岛冰盖表面融化对比及可能的影响机理分析 [J]. 大气科学, 39 (4): 757–766. Chen Zhiqiang, Liu Jiping, Fan Guangzhou, et al. 2015. Comparison of 2013 and 2012 Greenland Ice Sheet surface melt and associated mechanisms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 757–766, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14176.

2013 和 2012 年夏季格陵兰岛冰盖表面融化 对比及可能的影响机理分析

陈志强^{1,2} 刘骥平² 范广洲¹ 胡永云³

1 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 北京大学物理学院大气与海洋科学系气候与海—气实验室, 北京 100871

摘 要 本文重点分析了 2013 年夏季格陵兰冰盖表面的融化特征, 并将 2013 年与 2012 年融化极值年的异常进行对比, 探讨二者之间存在的动力和热力差异及其对冰盖表面融化的影响和机制。结果表明: 2013 年夏季格陵兰冰盖表面最大融化范围仅为 44%, 远小于 2012 年的 97%, 持续的时间也比 2012 年短 20 天左右, 平均的融化面积和持续时间都接近气候平均态。2013 年夏季大气环流异常与 2012 年近乎完全相反, 格陵兰及附近海域为低压异常, 500 hPa 位势高度场为负异常, 大气环流和 2012 年相比更具有纬向型。格陵兰岛的北部和南部出现气旋异常, 有利于输送北极的冷空气到格陵兰岛, 不仅降低了夏季格陵兰冰盖表面的平均温度, 而且也减少了格陵兰高温事件发生的频率。同时, 2013 年夏季格陵兰表面向下的辐射通量异常分布大体上呈西南—东北走向, 不同于 2012 年的南北分布。尽管从分布上看, 总的向下辐射通量以正的短波分量为主, 但是长短波分量相互抵消使得 2013 年夏季总的向下辐射通量接近气候平均态, 这使得辐射对冰盖表面温度的影响不明显。大气环流的动力和表面辐射收支的热力共同作用导致 2013 年夏季格陵兰冰盖表面融化经历了相对缓和的一年。

关键词 格陵兰岛冰盖 表面融化 大气环流 辐射收支

文章编号 1006-9895(2015)04-0757-10

中图分类号 P446

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14176

Comparison of 2013 and 2012 Greenland Ice Sheet Surface Melt and Associated Mechanisms

CHEN Zhiqiang^{1,2}, LIU Jiping², FAN Guangzhou¹, and HU Yongyun³

1 College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract In this study, we describe the characteristics of the Greenland Ice Sheet surface melt occurring in summer 2013 and compare the results with anomalies of the record surface melt observed in summer 2012. We then investigate the dynamic and thermodynamic differences between these two cases and their impacts on the Greenland Ice Sheet surface melt. Results show that the maximum surface melt extent was only 44% in 2013, which is far less than 97% as observed in

收稿日期 2014-04-30; 网络预出版日期 2014-11-20

资助项目 国家自然科学基金项目 41176169, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2011CB309704

作者简介 陈志强, 男, 1987 年出生, 硕士, 研究方向: 冰雪圈与极地气候。E-mail: czq@lasg.iap.ac.cn

2012. The averaged extent and duration of the surface melt in 2013 were close to the climatology and 20 days shorter than that of 2012. The summer atmospheric circulation anomalies in 2013 were nearly opposite those observed in 2012. Greenland and the surrounding areas showed anomalously low pressure, particularly a negative height at 500 hPa, which led to a more zonal pattern than those observed in 2012. The corresponding anomalous cyclonic circulation in the north and south areas of Greenland was favorable for advecting cold Arctic air to Greenland. This phenomenon decreased the mean surface temperature and the frequency of extreme heat event over Greenland. Moreover, the surface downward radiation pattern in 2013 was oriented in a southwest–northeast direction over Greenland, which differs from the north–south distribution in 2012. The net downward radiation was small due to the cancellation of downward shortwave and longwave components in 2013. However, downward shortwave dominated from the distribution perspective, leading to an insignificant impact on surface temperatures over Greenland. The combination of dynamic effects of atmospheric circulation change and thermodynamic effects of the radiation budget contributed to the surface melt of the Greenland Ice Sheet with values close to climatology.

Keywords Greenland Ice Sheet, Surface melt, Atmospheric circulation, Radiation budget

1 引言

冰冻圈是指地球表层（陆地和海洋）水以固态形式存在的圈层，组成部分主要包括冰盖、冰川、积雪、海冰、冻土等（秦大河和丁永建，2009）。冰冻圈是全球气候变化的显著指示器，也是对气候系统影响最直接和最敏感的圈层，目前已受到国内外科学界的广泛关注。国际气候与冰冻圈（CliC）计划提出的目标是加强对冰冻圈与气候系统之间相互作用的物理过程和反馈机制的理解，减少气候模拟和气候变化预测的不确定性，评估和量化过去和未来气候变化所导致的冰冻圈各分量的变化及其影响（丁永建和效存德，2013）。作为冰冻圈重要的组成部分，格陵兰岛大部分被冰雪覆盖（约83.7%），其面积约为 $1.81 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，冰层平均厚度约为 2300 m（与南极冰盖的平均厚度差不多），是北半球最大的陆地冰原。格陵兰岛所含有的冰雪总体积量约为 $3 \times 10^6 \text{ km}^3$ ，约占全球淡水总量的 54%。如果格陵兰岛的冰雪全部消融，全球海平面将上升约 6~7 m（Cuffey and Marshall, 2000; Gregory and Huybrechts, 2006）。因此，格陵兰冰盖的物质平衡对全球气候变化有着重要意义（Dowdeswell, 2006）。研究表明，20 世纪 60~80 年代是格陵兰冰盖质量处于相对平衡的时期（Rignot et al., 2008），平均年净积雪累积量约为 700 Gt，冰川流失约为 480 Gt，表面融化产生的融水径流损失约为 220 Gt（van den Broeke et al., 2009）。冰盖表面消融是格陵兰冰盖物质平衡的重要组成部分，伴随着全球气候的变暖，已成为格陵兰冰盖研究的热点（杨康，2013）。近十几年来，格陵兰冰盖处于

快速融化的状态（Rignot et al., 2011; Box et al., 2012），不仅融化的范围有增加的趋势，而且持续的时间也在不断延长，尤其是 2012 夏季出现的大面积长时间的冰盖消融引起了广泛的关注。NASA 卫星反演数据显示，2012 年 7 月 12 日，格陵兰岛约为 97% 的冰盖表面出现消融，其中包括海拔约为 3500 m 的顶峰区域（Nghiem et al., 2012; Hanna et al., 2014），是自从 1979 年有卫星观测以来的融化极值。

伴随着全球气候变暖，在过去的几十年，北极明显增暖，其增暖速率是全球平均的 2~3 倍（Stroeve et al., 2012）。与此同时，已经有许多相关研究表明，北极大气环流、海洋环境和海冰覆盖范围都发生了显著的变化，这些变化都对格陵兰冰盖表面融化有着一定的影响。例如 Mote (2007)、Tedesco (2007) 采用相同的卫星资料，不同的反演算法得到了类似的结论，指出格陵兰冰盖表面温度的变暖及持续异常与格陵兰冰盖表面融化有着直接的联系。在此基础上，Tedesco et al. (2008, 2011) 结合格陵兰自动气象观测站、卫星资料、区域气候模式多种数据分析了表面反照率反馈效应，指出其对格陵兰冰盖表面融化、物质平衡有着重要的影响。Rennermalm et al. (2009) 从海冰范围变化的角度，对 1979~2007 年北极海冰与格陵兰冰盖消融进行了相关分析，发现 8 月份格陵兰岛康克鲁斯瓦格（Kangerlussuaq）区域冰盖消融与北极海冰消退有较高的相关系数，并指出海冰的消退可能是加速格陵兰冰盖表面融化的因素。Hanna et al. (2014) 分析了北半球夏季 500 hPa 位势高度场，指出格陵兰上空的阻塞高压（GBI）与表面融化有较高的相

关系数, 另外 2012 年夏季与北极大气环流相联系的夏季北大西洋涛动 (NAO) 负指数型有利于南方来的暖空气平流引起格陵兰西南区域冰盖表面的融化。

针对近年来出现的格陵兰冰盖大范围的融化, 特别是 2007 和 2012 年, 已经有一些研究从不同角度进行了分析 (Hanna et al., 2013, 2014; Box et al., 2012; Tedesco et al., 2013; Hall et al., 2013; 具体见分析结果和讨论中的对比分析)。随后的 2013 年 7 月, 格陵兰冰盖出现的最大面积融化明显小于 2012 极值年的 97% (Tedesco et al., 2013), 而且融化持续的天数也低于 2012 年。对于 2013 年夏季出现的相对缓和的融化事件, 还没有文章涉及。本文在以往研究的基础上, 重点分析 2013 年夏季格陵兰冰盖表面的融化特征, 并分别从大气环流对热量输送的动力作用和表面辐射收支的热力作用两个方面, 将 2013 年与 2012 年的异常进行对比分析, 探讨二者之间存在的动力和热力差异及其对冰盖表面融化可能的影响机理。

2 资料和方法

格陵兰冰盖表面融化范围的时间序列是利用多通道微波扫描辐射仪 (SMMR, 1979~1987 年) 和特种传感器微波成像仪 (SSM/I, 1988~2013 年) 观测得到的辐射亮温数据反演获得的 (Mote, 2007), 时间序列长度为 1979~2013 年, 分辨率为 25 km, 其中 SSMR 卫星被动微波传感器每隔一天获取一次数据, SSM/I 卫星提供逐日的数据。格陵兰岛冰盖上层被雪层覆盖, 表面融化产生的融水使雪粒增长, 由于干雪的辐射微波亮温低于湿雪, 所以增大的温度辐射传导率可以很有效的区分融化和未融化区域的范围 (Ulaby and Stiles, 1980; Mote, 2007)。

格陵兰冰盖表面反照率资料采用中等分辨率成像光谱仪每 8 天一次的格点卫星观测资料 (MODIS43B3), 时间序列长度为 2000~2013 年, 水平分辨率为 1 km。由于地表反照率可以用作对比分析的观测是从 2004 年开始 (Tedesco et al., 2011), 这里时间序列的长度我们也仅选取 2004~2013 年。反照率资料包括短波、可见光、近红外三个波段的反照率, 这里我们仅用短波波段的反照率来分析格陵兰冰盖反照率的变化。

欧洲中期数值预报中心的全球再分析资料 (ERA-Interim Reanalysis; Dee et al., 2011), 时间

长度为 1979 年 1 月至 2013 年 12 月。本文中分析的月平均数据变量包括: 海平面气压场 (SLP)、500 hPa 位势高度场 (Z500)、700 hPa 风场 (U700、V700), 近表面温度场 (SAT)、水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; 表面向下长波和短波辐射通量, 水平分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$; 逐日数据变量: 近地表面最大温度场, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

3 分析结果和讨论

3.1 融化范围和累积时间

从图 1 可以看到, 2013 年夏季 (5 月到 9 月) 格陵兰冰盖平均表面融化范围约为 17%, 7 月末出现最大范围的融化面积约为 44%, 远小于 2012 年的 97%。2013 年表面融化范围变化也相对平缓, 总体上接近于气候平均态, 而 2012 年有明显的几个高峰值 (如 7 月中旬和 7 月末)。这里我们定义超过总面积 10% 的融化范围为融化起始点, 低于总面积 10% 为融化结束点, 来确定一年内融化持续的累积天数。从持续的时间上来看, 2013 年融化从 6 月初开始, 一直持续到 8 月中旬, 时间长度为 75 天左右, 接近于气候平均态 (约为 70 天)。相比之下 2012 年融化起始点提前了 10 天左右, 总持续时间超过 2013 年近 20 天 (Tedesco et al., 2013)。图 2 给出了进一步计算的格陵兰夏季 (6~8 月) 表面融化标准化指数。可以看到, 2013 年表面融化标准化指数仅为 +0.2, 而 2012 年为 +2.8, 远高于 2013 年。从 1979 年到 1996 年表面融化标准化指数基本上处于为负位相, 1997 年开始至今处于正位相, 其增长趋势为 0.07/a。Wu et al. (2012) 指出 4 月到 9 月北极表面风场异常的主要模态在 20 世纪 90 年代后期发生了变化, 即北冰洋中部风场模态明显出现频率增加以及强度增强。这与以上格陵兰冰盖的年代际变化可能存在一定联系。

3.2 大气环流的动力作用

图 3 给出海平面气压场 (SLP) 异常图。可以看到, 2013 年夏季, 格陵兰岛以及附近海域为低压异常, 最大低压异常出现在格陵兰岛东部海域, 最大低压异常约为 4 hPa, 而北美、西伯利亚环北极地区为高压异常, 最大高压异常出现在喀拉海。而 2012 年夏季几乎呈现出与 2013 年完全相反的状态。格陵兰以及附近的海域出现了高压异常, 最大高压异常约为 4 hPa, 出现在丹麦海峡和冰岛地区。北美、西伯利亚环北极地区出现了气压负异常, 最

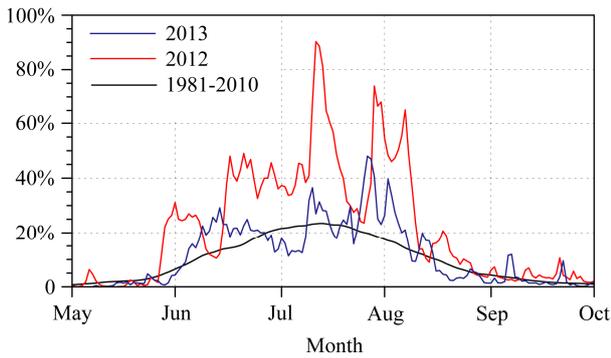


图 1 2013 年、2012 年和气候平均态格陵兰表面融化范围季节变化
Fig. 1 The seasonal cycle of the Greenland surface melt extent for 2013, 2012 and climatology

大负异常出现在楚科奇海地区。Wu et al. (2006), Overland and Wang (2010), Overland et al. (2012) 指出, 近年来夏季北极大气环流出现经向型频率增加, 低层气压场上呈北极偶极子型 (Arctic Dipole), 海平面气压场在波弗特海、北极加拿大、格陵兰地区出现显著高压异常, 在北极西伯利亚地区出现低压异常, 2012 年夏季低层气压场异常分布与北极偶极子型较为相似。

图 4 给出 500 hPa 位势高度场的异常图。与 2013 年夏季海平面气压场异常一致, 正位势高度异常出现在格陵兰岛及邻近海域, 负位势高度异常出现在北美、西伯利亚环北极区域。从 4 月到 8 月 500 hPa 位势高度场的演变上可以注意到, 4 月北美,

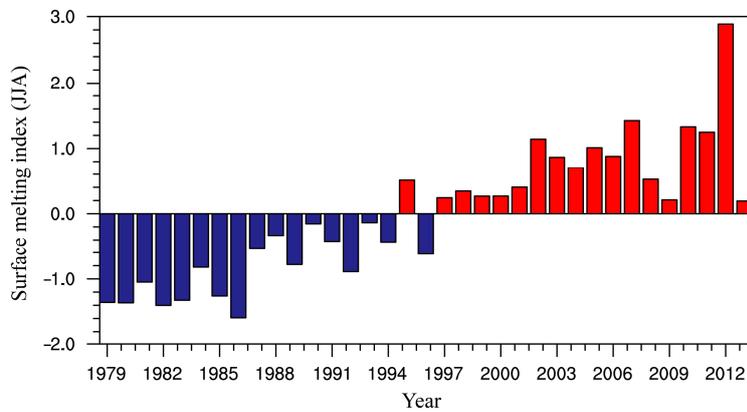


图 2 1979~2013 年夏季 (6~8 月平均) 格陵兰表面融化标准化指数
Fig. 2 Greenland standardized surface melting index for summer (June-July-August, JJA average) of the period 1979-2013

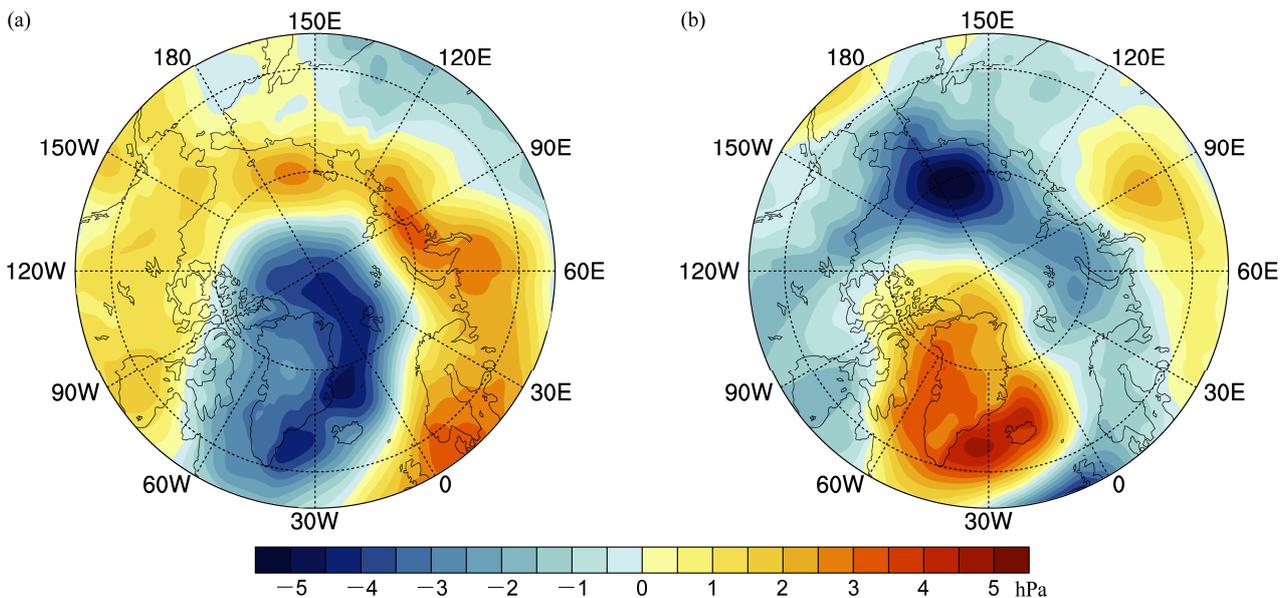


图 3 夏季 (6~8 月) 海平面气压场相对于气候平均态 (1979~2013 年平均) 的异常图 (单位: hPa): (a) 2013 年; (b) 2012 年
Fig. 3 Sea level pressure anomalies (relative to 1979-2013 mean) for summer (JJA) (units: hPa): (a) 2013; (b) 2012

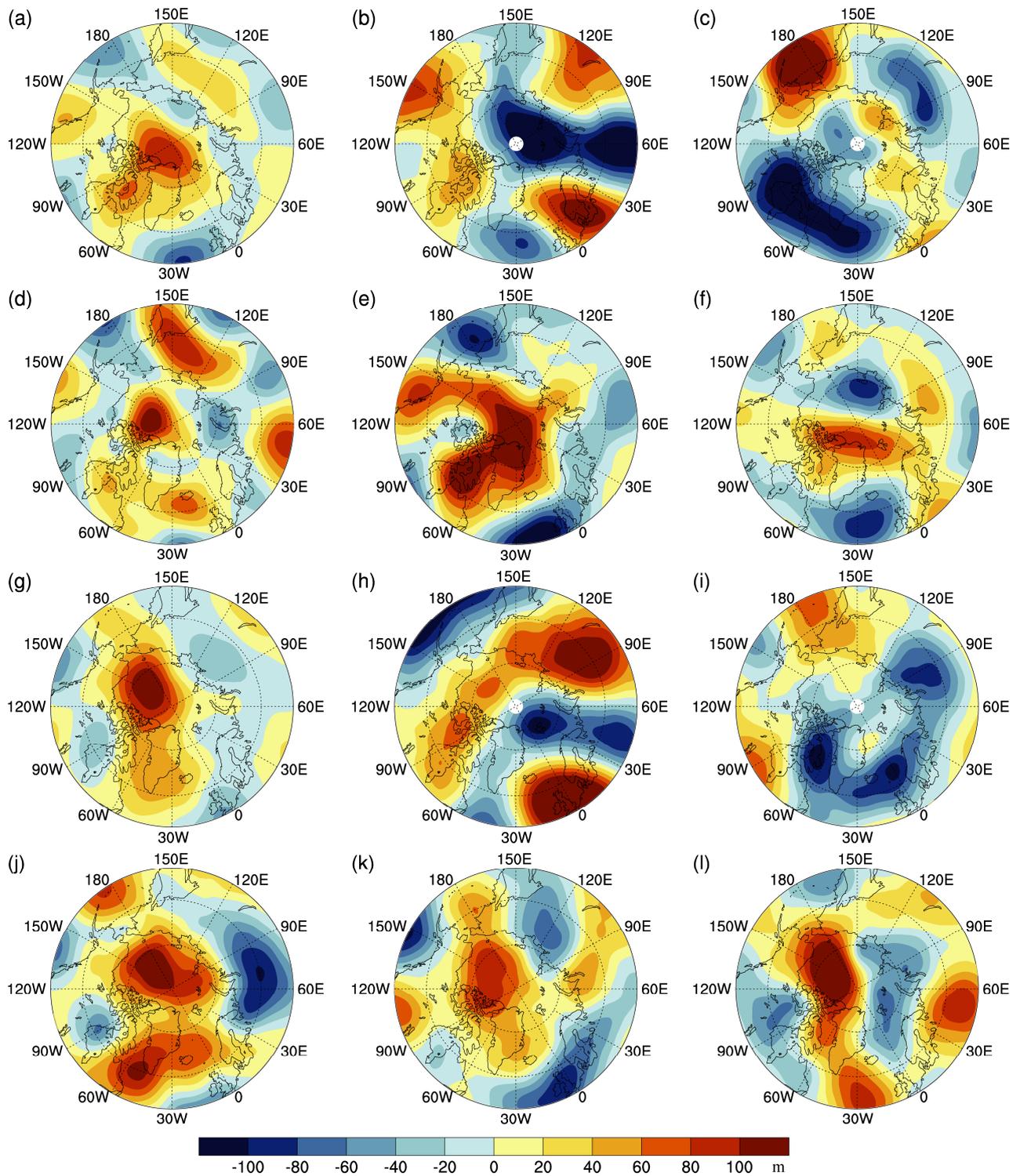


图 4 500 hPa 位势高度场相对于气候平均态 (1979~2013 年平均) 的异常图 (单位: m): (a) 2013 年夏季 (6、7、8 月) 平均; (b-f) 2013 年 4 月到 8 月的逐月异常; (g) 2012 年夏季 (6、7、8 月) 平均; (h-l) 2012 年 4 月到 8 月的逐月异常
Fig. 4 500-hPa geopotential height anomalies (relative to 1979-2013 mean)(units:m): (a) Summer (JJA) for 2013; (b-f) April to August for 2013; (g) summer (JJA) for 2012; (h-l) April to August for 2013

格陵兰岛和欧洲北部基本上为位势高度负异常（尽管加拿大群岛东北部出现了微弱的正异常），最大负异常出现在巴伦支海，东西伯利亚和楚科奇海为明显的正异常。5 月整个格陵兰地区以及冰岛、楚科奇海出现负异常，而北美、西伯利亚环北极地区为正异常。6 月格陵兰地区负异常有所减弱，而在北冰洋中心出现了非常强的负异常，最大负异常超过了 100 m，北美和西伯利亚地区依然为正异常。7 月格陵兰地区负异常继续减弱，接近于夏季平均态。8 月份位势高度场异常近似于 6 月份，但强度有所减弱。2013 年从 4 月到 8 月，格陵兰地区到北冰洋中心、一直持续位势高度负异常，而北美地区，西伯利亚环北极地区整个夏季一直持续正异常。同时，2013 年夏季 6、7、8 三个月北大西洋涛动（NAO）指数处于正位相，但是均未超过 1 个标准差。出现的环流型有利于北极的冷空气影响格陵兰岛，从而降低格陵兰冰盖表面温度（Tedesco et al., 2013），特别是高海拔区域的温度持续低于融点（同样的融化低指数年也与之类似，例如 1998 年）。表面融化仅发生在相对低海拔的区域，导致格陵兰冰盖融化经历了相对缓和的一年。相比之下，2012 年夏季几乎呈现出与 2013 年完全相反的位势高度场异常。4 月格陵兰岛、整个北极北美地区，部分欧洲地区现了位势高度正异常，格陵兰的正异常约为 60 m，而欧洲北部出现了负异常，最大负异常在巴伦支海。5 月格陵兰岛南部、加拿大群岛持续正异常，北美西部和北太平洋地区、巴伦支海、喀拉海地区出现弱的负异常。6 月格陵兰中部和南部偏向西南一直延伸到加拿大东北部出现了显著地正异常，与之相对应的是出现在冰岛南部的显著的负异常。7 月位势高度场出现了较大的转变，格陵兰岛地区、北美中部依然持续正异常，出现在格陵兰西南部的最大异常为 80 m，而西伯利亚环北极地区都出现负异常。8 月北美格陵兰地区正异常依然存在，但是强度明显减弱，负异常出现在亚洲北部。2012 年夏季平均态与 7 月份的位势高度场异常较为接近，但是由于 6 月出现在格陵兰南部显著的正异常，使得夏季格陵兰位势高度正异常显著。这里利用 ERA-Interim 再分析资料得到的 2012 年夏季大气环流形势异常与 Hanna et al. (2013, 2014) 利用美国国家环境预报中心和国家大气研究中心（NCEP/NCAR）再分析资料分析 2012 年 3 月到 8 月逐月的 500 hPa 位势高度场演变基本上是一致

的。Hanna et al. (2013, 2014) 指出大气环流从 2012 年 3 月明显的急流状态转变为 6 月明显的北半球中高纬度 5 个波型的准静止波状态，在格陵兰岛上空形成的阻塞高压对表面融化有一定作用。此外，2012 年夏季与北极大气环流相联系的夏季北大西洋涛动（NAO）负指数型对格陵兰西南区域冰盖表面的融化有促进作用。类似的大气环流型也出现在 2007 年，同年夏季也出现了较大范围的冰盖消融（图略）。这样的环流型一方面有利于南来的暖空气输送向格陵兰岛的西南区域引起温度升高，另一方面，Box et al. (2012) 的研究指出春季 NAO 负指数较早的出现不利于降雪的积累，新雪的累积量不足也是导致夏季大范围表面融化的一个重要因素。

与海平面气压场和 500 hPa 位势高度异常相对应，700 hPa 风场异常显示 2013 年夏季在格陵兰岛的南部和北部分别出现了一个异常气旋中心，与此异常气旋对应是格陵兰北部有来自北极的西北风异常，西南区域有北风异常（图 5）。来自北极的冷空气降低格陵兰冰盖表面温度，导致格陵兰西北大部分区域、部分西南区域温度低于气候平均态。格陵兰东部沿岸区域有偏南风异常，从格陵兰海来的较暖的气流增加了冰盖表面温度。而 2012 年夏季整个格陵兰岛几乎被一个异常反气旋所控制，其中心位于格陵兰岛西南沿海岸，在格陵兰西南部为南风和西南风异常，格陵兰北部和东部区域有偏北风异常，最大风异常超过了 4 m/s。这种反气旋异常有利于将西北大西洋的暖气流经戴维斯海峡输送到格陵兰西南部，导致西南地区的冰盖持续融化。这与 Tedesco et al. (2013) 的分析结果相似。2012 年夏季整个格陵兰冰盖表面温度明显高于气候平均态，最大异常出现在格陵兰的中部偏东，高于气候平均态约 3°C，而这也恰好是格陵兰冰盖海拔最高的区域，高温异常使得以往温度达不到融点的顶峰地区也出现了积雪融化。

3.3 辐射收支的热力作用

同时，上述大气环流的异常可以通过改变水汽（云）的分布进而影响格陵兰冰盖表面辐射平衡。图 6 给出表面向下的辐射通量的异常。可以看到，2013 年夏季表面向下的短波太阳辐射通量的正异常在格陵兰岛呈西南—东北走向，最大正异常出现在西南沿岸，约为 20~30 W/m²。格陵兰西北部，中东部和东南沿岸的小部分地区出现了负异

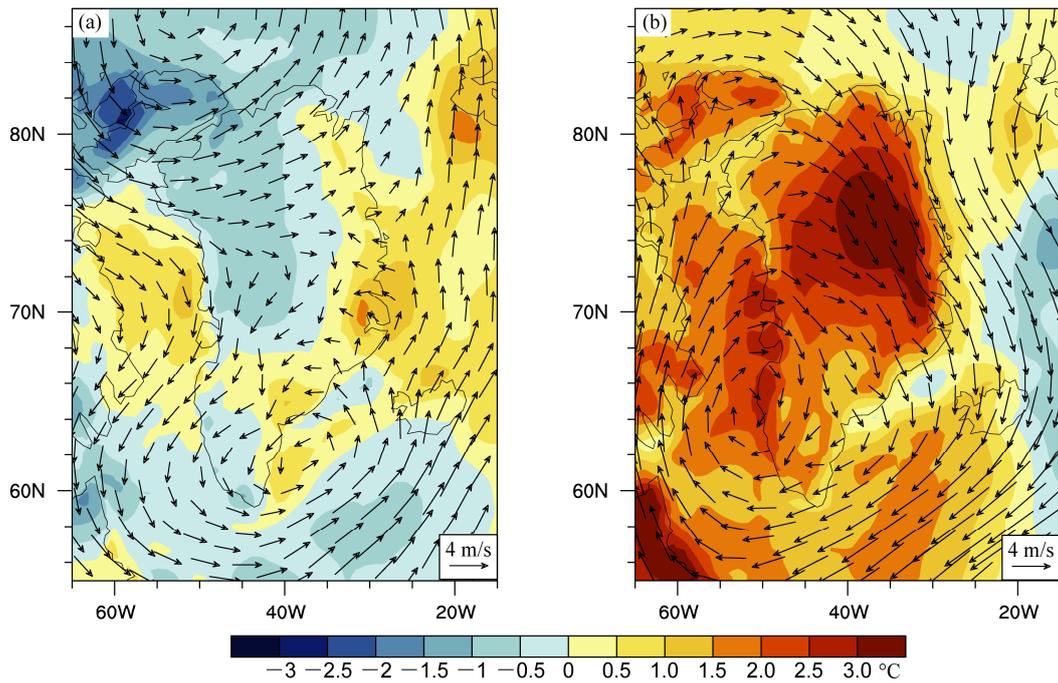


图 5 夏季 (6、7、8 月) 近地面温度场和 700 hPa 风场相对于气候平均态 (1979~2013 年平均) 的异常图 (温度单位: °C; 风矢量单位: m/s): (a) 2013 年; (b) 2012 年

Fig. 5 Near surface temperature and 700-hPa wind anomalies (relative to 1979–2013 mean) for summer (JJA) (temperature units: °C; wind units: m/s): (a) 2013; (b) 2012

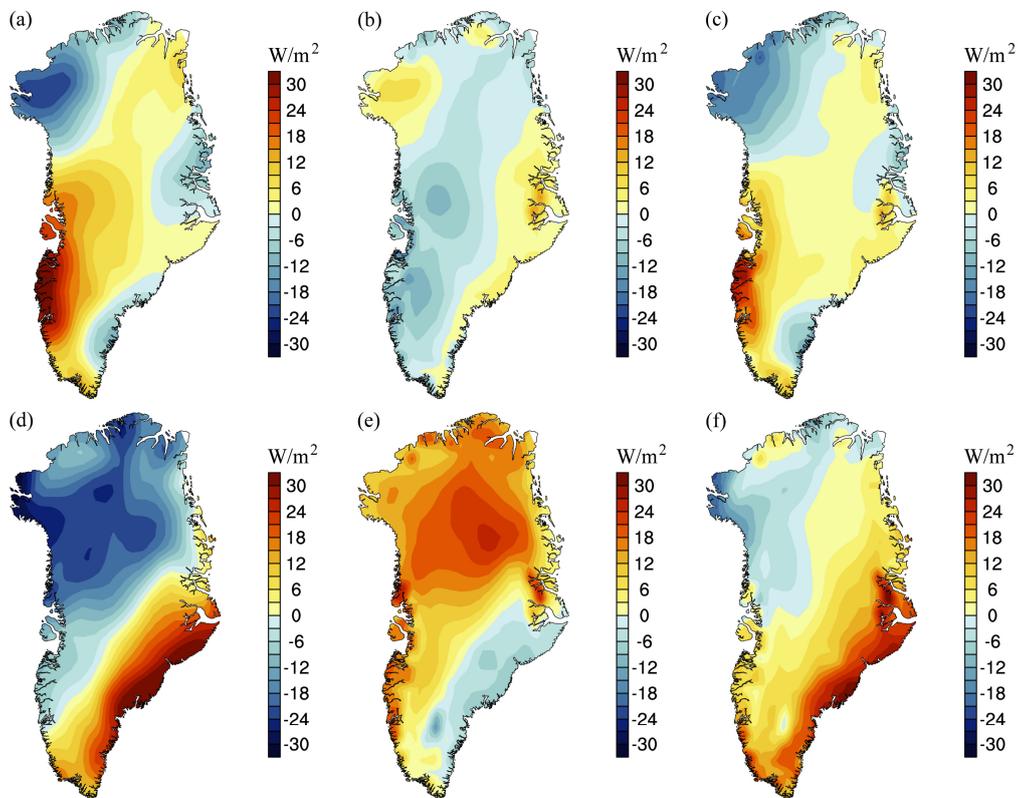


图 6 (a-c) 2013 年夏季 (6、7、8 月) 格陵兰岛表面向下的短波、长波、总辐射通量相对于气候平均态 (1979~2013 年平均) 的异常 (单位: W/m^2); (d-f) 同 (a-c) 但为 2012 年

Fig. 6 (a-c) Surface downward shortwave, longwave, total radiation flux anomalies (relative to 1979–2013 mean) of Greenland for summer (JJA) 2013 (units: W/m^2); (d-f) same as (a-c) but for year 2012

常,最大负异常出现在西北地区,约为 20 W/m^2 。表面向下的长波通量异常的空间分布与短波通量基本相反,最大负异常出现在格陵兰中部偏西,最大正异常出现在格陵兰西北部,但正负异常的强度都比短波辐射偏弱。我们进一步计算了总的表面向下辐射通量,总的表面向下辐射通量的空间分布与短波通量非常相似,这说明短波辐射通量起着主要的作用。空间分布上,除了格陵兰西南和西北的小部分区域的异常可以达到 $10\sim 20 \text{ W/m}^2$,大部分地区接近于气候平均态。与 2013 年不同,2012 年夏季表面向下的短波通量异常在格陵兰岛呈现出南多北少的状态,负异常从格陵兰北部延伸到西南部分地区,北部地区大部分负异常超过了 30 W/m^2 。长波通量异常与短波相反,呈现出北多南少的状态。最大正异常中心在格陵兰偏北部,强度也超过了 30 W/m^2 ,负异常明显偏弱。总的向下辐射通量依然是短波占主要部分,但是应该注意到,在格陵兰北部偏东的部分地区,长波通量异常起到了主要作用,表现为总的辐射通量的正异常,因此 2012 年夏季比气候平均态接收了更多的入射辐射通量,导致 2012 年温度明显高于气候平均态。表面向下辐射通量和云量和云的光学性质有密切关系。低云可以阻挡入射的太阳辐射,增加向下的红外长波辐射, Bennartz et al. (2013) 研究指出,2012 年夏季低液态含量云 (low level liquid water cloud) 出现频率的增加,不仅可以有效地透射足够多的太阳辐射,并且还可以有效地起到保温加热的作用。然而,云不仅在理论、观测上还是在气候模式上都存在很大的不确定性,云对冰盖表面融化到底能起到多大的作用,还有待进一步研究和证实。

图 7 给出格陵兰冰盖表面反照率异常。2013 年夏季格陵兰冰盖表面反照率整体上接近气候平均态,正异常主要出现在沿岸区域,格陵兰北部和中部大部分地区为较小的负异常。反照率的增加可以反射更多的太阳辐射,有利于降雪的累积,不利于冰盖表面融化。而 2012 年夏季格陵兰岛表面反照率全部低于气候平均态,在西南融雪区域表面反照率最大负异常超过了 10%,2012 年冬季和春季新雪的累积量不足是导致反照率下降的重要因素。Hall et al. (2013) 利用 MODIS10A1 反照率资料指出近 10 年格陵兰地表反照率一直处于下降的趋势,所得到的 2012 年反照率的分布型和我们所用的 MODIS43B3 资料分析结果基本一致。

4 总结

本文利用卫星反演数据、MODIS 反照率资料、欧洲中心再分析资料,主要通过从大气环流对热量输送的动力作用、冰盖表面辐射收支的热力作用两个方面,着重分析了 2013 年夏季格陵兰冰盖表面融化的状况,并且与气候平均态和 2012 年夏季出现的极端融化事件相比较,结果表明:

(1) 2013 年格陵兰冰盖表面融化经历了相对缓和的一年,7 月末出现的最大的表面融化范围仅为 44%,表面融化范围变化也比较平缓,持续的时间接近于气候平均态,表面融化标准化指数仅为 $+0.2$,与 2012 年大范围长时间的融化事件形成强烈对比。

(2) 大气环流异常对热量的输送对表面温度有重要影响。2013 年夏季海平面气压场,500 hPa 位势高度场,700 hPa 风场与 2012 年几乎完全相反。格陵兰地区出现明显低压异常,500 hPa 位势高度场也低于气候平均态,格陵兰北部靠近极地地区和格陵兰的南部都出现了气旋型异常,这使得格陵兰大部分地区有偏北风异常,夏季三个月持续为 NAO 正指数,这样的环流异常有利于输送极地的冷空气到格陵兰岛,使格陵兰冰盖表面温度降低。表面温度的变化不仅体现在夏季平均温度场上,也体现在夏季高温事件出现的频率上。我们进一步计算了逐日近地表面最大温度场在夏季 92 天当中,连续两天出现超过一个标准差的频率异常与气候平均态出现的频率的比值(图 8)。可以看到,2013 年夏季几乎全部格陵兰出现高温事件的频率对于气候平均态明显偏少(仅在东北部到东部一部分沿岸地区有正异常)。而 2012 年夏季,所有格陵兰地区出现高温事件的频率明显增加,大部分区域可以超过气候平均态 1.5 倍以上。

(3) 2013 年夏季格陵兰冰盖表面向下的短波辐射通量正异常呈西南—东北走向,正异常中心出现在格陵兰的西南部,在西北、东部以及东南部出现负异常。向下的长波通量与短波分布相反,总的向下的辐射通量基本上以短波分量为主,但是长短波分量相互抵消使得 2013 年夏季总的向下的辐射通量近似于气候平均态。2012 年夏季辐射通量总体上呈南北分布,并且正负异常的强度明显高于 2013 年,大部分区域仍然是短波分量起到主导作用,但是在格陵兰中部偏东北区域,长波分量超过了短波

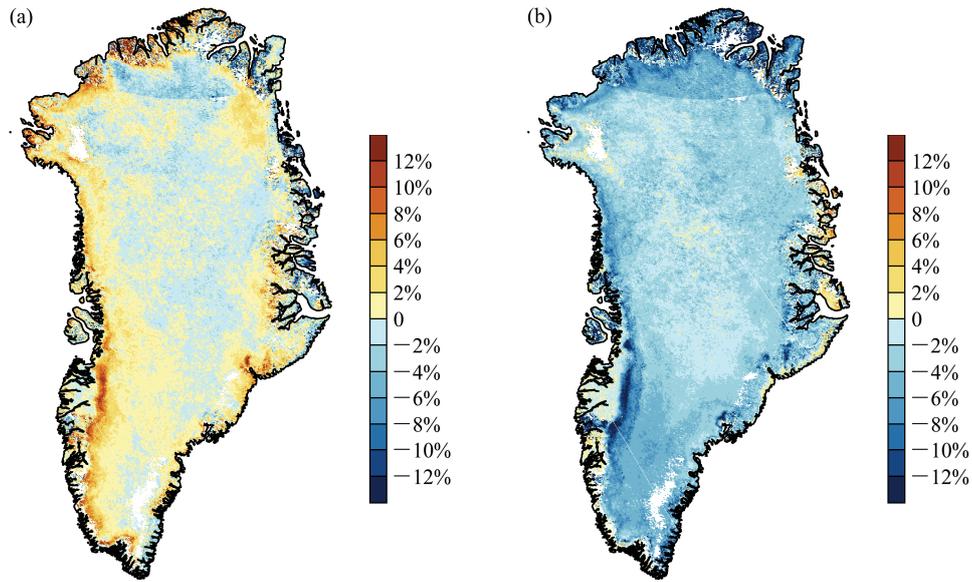


图 7 夏季 (6、7、8 月) 格陵兰岛地表反照率相对于气候平均态 (2004~2013 年平均) 的异常图: (a) 2013 年; (b) 2012 年
Fig. 7 Albedo anomalies (relative to 2004–2013 mean) of Greenland for summer (JJA): (a) 2013; (b) 2012

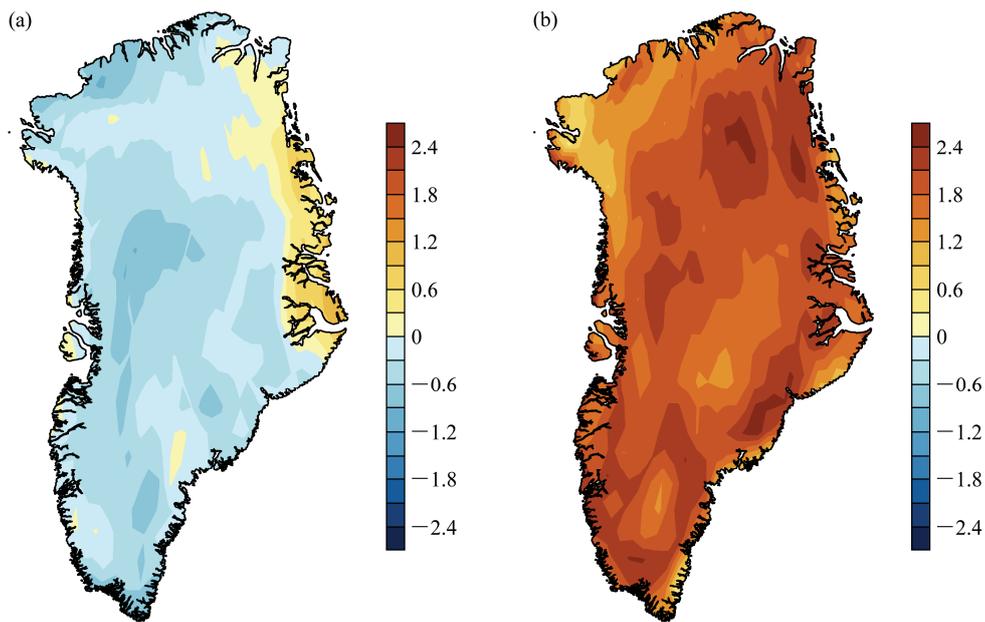


图 8 夏季近地表面最大温度事件出现的频率异常与气候平均态出现频率的比值: (a) 2013 年; (b) 2012 年
Fig. 8 The ratio between the frequency anomalies of summer surface maximum temperature and the frequency of climatology: (a) 2013; (b) 2012

分量, 使得这些区域得到了更多的辐射通量, 格陵兰表面温度显著升高, 促进了冰盖表面的融化。

综上所述, 大气环流对热量输送的动力作用和表面辐射收支的热力作用对夏季格陵兰冰盖表面融化起着重要的作用。此外, 图 2 夏季格陵兰表面融化标准化指数与超前一年的表面融化指数的相关系数为 0.72, 去掉趋势后为 0.36 (都通过 95%的

信度检验)。这说明格陵兰冰盖表面融化与前一年的冰盖表面状况可能存在一定的联系。Huybrechts and DeWolde (1999) 通过数值模拟指出, 冰盖表面消融范围的变化可以通过冰流速度使冰盖质量重新分布, 冰盖外缘质量的输出可以增加内部向外的冰流速度, 从而加大冰盖面积。目前有更多冰盖模式正将冰盖表面消融考虑到冰盖物质平衡之中

(Mernild et al., 2011; Mernild and Liston, 2012), 这里的分析结果将有助于我们进一步评估模式在模拟影响格陵兰岛冰盖表面融化物理过程的能力, 从而减少气候模拟和气候变化预测的不确定性, 更好地量化未来气候变化所导致的冰盖消融及其影响 (例如: 海平面上升; Goelzer et al., 2012)。

参考文献 (References)

- Bennartz R, Shupe M D, Turner D D, et al. 2013. July 2012 Greenland melt extent enhanced by low-level liquid clouds [J]. *Nature*, 496 (7443): 83–86.
- Box J E, Fettweis X, Stroeve J C, et al. 2012. Greenland ice sheet albedo feedback: Thermodynamics and atmospheric drivers [J]. *The Cryosphere*, 6 (4): 821–839.
- Cuffey K M, Marshall S J. 2000. Substantial contribution to sea-level rise during the last interglacial from the Greenland ice sheet [J]. *Nature*, 404 (6778): 591–594.
- 丁永建, 效存德. 2013. 冰冻圈变化及其影响研究的主要科学问题概论 [J]. *地球科学进展*, 28 (10): 1067–1076. Ding Yongjian, Xiao Cunde. 2013. Challenges in the study of cryospheric changes and their impacts [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 28 (10): 1067–1076.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137 (656): 553–597.
- Dowdeswell J A. 2006. Atmospheric science—The Greenland Ice Sheet and global sea-level rise [J]. *Science*, 311 (5763): 963–964.
- Goelzer H, Huybrechts P, Raper S C B, et al. 2012. Millennial total sea-level commitments projected with the Earth system model of intermediate complexity LOVECLIM [J]. *Environmental Research Letters*, 7 (4): 45401–45409.
- Gregory J M, Huybrechts P. 2006. Ice-sheet contributions to future sea-level change [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364 (1844): 1709–1732.
- Hall D K, Comiso J C, DiGirolamo N E, et al. 2013. Variability in the surface temperature and melt extent of the Greenland ice sheet from MODIS [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (10): 2114–2120.
- Hanna E, Jones J M, Cappelen J, et al. 2013. The influence of North Atlantic atmospheric and oceanic forcing effects on 1900–2010 Greenland summer climate and ice melt/runoff [J]. *International Journal of Climatology*, 33 (4): 862–880.
- Hanna E, Fettweis X, Mernild S H, et al. 2014. Atmospheric and oceanic climate forcing of the exceptional Greenland ice sheet surface melt in summer 2012 [J]. *International Journal of Climatology*, 34 (4): 1022–1037.
- Huybrechts P, DeWolde J. 1999. The dynamic response of the Greenland and Antarctic ice sheets to multiple-century climatic warming [J]. *J. Climate*, 12 (8): 2169–2188.
- Mernild S H, Mote T L, Liston G E. 2011. Greenland ice sheet surface melt extent and trends: 1960–2010 [J]. *J. Glaciol.*, 57 (204): 621–628.
- Mernild S H, Liston G E. 2012. Greenland Freshwater Runoff. Part II: Distribution and Trends, 1960–2010 [J]. *J. Climate*, 25 (17): 6015–6035.
- Mote T L. 2007. Greenland surface melt trends 1973–2007: Evidence of a large increase in 2007 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (22): 22507, doi:10.1029/2007GL031976.
- Nghiem S V, Hall D K, Mote T L, et al. 2012. The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (20): 20502, doi:10.1029/2012GL053611.
- Overland J E, Wang M. 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice [J]. *Tellus A*, 62 (1): 1–9.
- Overland J E, Francis J A, Hanna E, et al. 2012. The recent shift in early summer Arctic atmospheric circulation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (19): 19804, doi:10.1029/2012GL053268.
- 秦大河, 丁永建. 2009. 冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题 [J]. *气候变化研究进展*, 5 (4): 187–195. Qin Dahe, Ding Yongjian. 2009. Cryospheric changes and their impacts: Present, trends and key issues [J]. *Advances in Climate Research (in Chinese)*, 5 (4): 187–195.
- Rennermalm A K, Smith L C, Stroeve J C, et al. 2009. Does sea ice influence Greenland ice sheet surface-melt? [J]. *Environmental Research Letters*, 4 (2): 024011, doi:10.1088/1748-9326/4/2/024011.
- Rignot E, Box J E, Burgess E, et al. 2008. Mass balance of the Greenland ice sheet from 1958 to 2007 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (20): 20502, doi:10.1029/2008GL035417.
- Rignot E, Velicogna I, van den Broeke M R, et al. 2011. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (5), doi:10.1029/2011GL046583.
- Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, et al. 2012. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis [J]. *Climate Change*, 110 (3–4): 1005–1027.
- Tedesco M. 2007. Snowmelt detection over the Greenland ice sheet from SSM/I brightness temperature daily variations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (2): 2504, doi:10.1029/2006GL028466.
- Tedesco M, Serreze M, Fettweis X. 2008. Diagnosing the extreme surface melt event over southwestern Greenland in 2007 [J]. *The Cryosphere*, 2: 159–166.
- Tedesco M, Fettweis X, van den Broeke M R, et al. 2011. The role of albedo and accumulation in the 2010 melting record in Greenland [J]. *Environmental Research Letters*, 6 (1): 014005, doi:10.1088/1748-9326/6/1/014005.
- Tedesco M, Fettweis X, Mote T, et al. 2013. Evidence and analysis of 2012 Greenland records from spaceborne observations, a regional climate model and reanalysis data [J]. *The Cryosphere*, 7 (2): 615–630.
- Ulaby F T, Stiles W H. 1980. The active and passive microwave response to snow parameters: 2. Water equivalent of dry snow [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 85 (C2): 1045–1049.
- van den Broeke M, Bamber J, Ettema J, et al. 2009. Partitioning recent Greenland mass loss [J]. *Science*, 326 (5955): 984–986.
- Wu B Y, Wang J, Walsh J E. 2006. Dipole anomaly in the winter arctic atmosphere and its association with sea ice motion [J]. *J. Climate*, 19 (2): 210–225.
- Wu B Y, Overland J, D'Arrigo R. 2012. Anomalous arctic surface wind patterns and their impacts on September sea ice minima and trend [J]. *Tellus A*, 64: 18590, doi:10.3402/tellusa.v64i0.18590.
- 杨康. 2013. 格陵兰冰盖表面消融研究进展 [J]. *冰川冻土*, 35 (1): 101–109. Yang Kang. 2013. The process of Greenland Ice Sheet surface ablation research [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 35 (1): 101–109.