

春季北极地区云量跷跷板式的趋势变化特征 及其对北极放大的云反馈作用*

王新¹, 黄菲^{1,2,3**}, 王宏^{1,2}

(1.中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2.青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266237;
3.宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波 315000)

摘要: 利用2000—2017年月平均的CERES云量、辐射资料和ERA再分析资料,对春季北极云量趋势变化特征和成因及其对北极放大反馈的贡献进行研究,发现春季北极地区总云量的趋势在东北极海区和北欧海区呈跷跷板式的反位相变化特征,并与低云量的趋势变化有较为一致的空间分布,中高云则与低云大体上呈相反的变化特征。北欧海的低云量减少、中高云增加,主要是因为进入北欧海区的超强气旋增多带来丰富的水汽,对流增强,云底高度抬升,使得低云量减少而中高云量呈增加趋势。这种云量垂直结构的变化所引起的云辐射强迫作用分别体现了低云的正反馈和中高云的负反馈作用,增温和降温作用相互抵消,使北欧海增温不显著。东北极海区低云量显著增加而中高云变化不明显,可能由于海冰融化,海表面增温,海面蒸发加强,水汽增加,大气静力稳定度减弱,有利于低云的形成。这种低云量的显著增加使得云辐射强迫作用强化了海冰反照率正反馈机制,从而加强了东北极海区的增温趋势。

关键词: 北极;低云;中高云;跷跷板式分布;春季;云反馈;北极放大

中图分类号: P468.0+27

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)07-010-08

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20190187

引用格式: 王新,黄菲,王宏.春季北极地区云量跷跷板式的趋势变化特征及其对北极放大的云反馈作用[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(7):10-17.

WANG Xin, HUANG Fei, WANG Hong. Seesaw pattern of Arctic cloud cover trend in spring and its cloud feedback effect for arctic amplification[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(7): 10-17.

北极地区长期被云覆盖,年平均云量在70%左右^[1]。Harrison等^[2]指出众多的北极地区云参数中云量是重要的气候因子之一,因此云量可能是影响北极能量收支的一个关键因素。

近几十年来,全球变暖的同时北极放大效应日益显著,并伴随着北极海冰范围显著减少^[3],北极地区海冰的减少可能对云有重要的影响。有研究发现,初秋季节海冰范围越小,冷平流作用在范围较大的开阔水域,海气温差增大,大气静力稳定度降低,因此边界层中湍流热通量增强,低云量增加。同时海表湍流热通量增强会导致边界层高度增加,低云凝结高度抬升,具体表现为近地层的低云量减少,500~2 000 m的低云量增加^[4-5]。云作为影响地气平衡的关键因子,在北极海冰变化中起到非常重要的作用^[6-8]。云的存在也能阻碍地球表面长波辐射的射出。Huang等^[9]利用最近的卫星资料分析了春季云和辐射变化对9月份北极海

冰密集度的影响,发现3~5月中旬云量和向下长波辐射通量增加产生的温室效应强于冷却效应,加快了海冰融化速度。云的反射作用主要决定地表吸收的太阳短波辐射的多少,前人研究发现5~7月份到达地表的太阳短波辐射异常与8~10月份的北极海冰密集度异常有着明显的负相关关系,可能原因一方面是云阻挡了太阳短波辐射到达冰面,另一方面是冰-反照率反馈的放大作用^[10-11]。随着高度的增加,云将由水云变为冰云,这种变化将对其辐射-气候效应产生巨大影响。在气候模式中对云辐射过程的模拟中,云垂直分布的不确定性是研究云对气候影响的障碍之一。前人在研究云在北极海-冰-气耦合过程的作用中主要对象集中在总云量,很少有人将云量分不同高度层去研究。

海冰内部记忆时间相对较短,目前对九月海冰范围极小值的预测只能开始于7月份^[12]。有研究指出,在最先进的气候模式对海冰季节尺度或更长期尺度的

* 基金项目:国家重大科学研究计划项目(2015CB953904);国家自然科学基金项目(41575067)资助

Supported by the National Key Scientific Research Program of China(2015CB953904); the National Natural Science Foundation of China(41575067)

收稿日期:2019-05-09; 修订日期:2019-06-04

作者简介:王新(1994-),女,硕士生,主要从事北极气候变化研究。

** 通讯作者:E-mail: huangf@ouc.edu.cn

预测仍不够完善^[10,13], 这也许是因为影响海冰异常变化的物理过程并没有被完全了解, 尤其是云辐射反馈过程。研究已经表明春季云量变化对北极夏秋季节海冰的预测具有一定能力^[9-10,14-15], 因此研究北极春季云量的时空变化特征具有重要意义。云辐射反馈包括云正反馈和负反馈, 共同影响北极地表的辐射平衡。由于极地地区云的观测资料匮乏以及云垂直分布的不确定性, 云辐射反馈过程是气候模式中最不确定的因素之一, 因此云的变化过程及其对北极辐射平衡的影响存在一定的不确定性, 进而影响气候模式中的参数化方案。因此探讨春季的云反馈机制对北极放大的可能作用和贡献具有重要意义。

本文将会对春季北极不同高度层云量趋势变化特征进行系统的研究, 并且探讨其产生的可能原因及其作用, 结果将会为北极气候系统研究提供一定的科学依据, 并对北极海-冰-气耦合模式的建立完善和提高海冰的预测能力都具有重要的科学意义。

1 数据和方法

本文采用 2000—2017 年的月平均资料, 春季定义为每年 3~5 月的平均, 文中使用的具体数据资料如下: ①使用的云量资料采用美国 NASA 搭载在近极地轨道卫星 Terra 和 Aqua 的 CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) 传感器获取的 CERE_SYN1deg_Ed4A 产品, 辐射资料为 EBAF-Surface 产品 4.0 版本, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。云量资料 (<https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SYN1degEd4Selection.jsp>) 包括: 总云量、低云量 (1 000~700 hPa), 中云 (700~500 hPa), 高云 (500~300 hPa), 辐射资料 (<https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/EBAFSFC4Selection.jsp>) 包括: 地表长波辐射通量、短波辐射通量、云长波辐射强迫、云短波辐射强迫和净云辐射强迫。②温度、气压资料选用的是由欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 提供的再分析资料。③海冰资料为美国冰雪数据中心 NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 的海冰密集度 (Sea Ice Concentration) 资料, 空间分辨率为 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 。④潜热通量为美国 Woods Hole 海洋研究所提供的海气通量 (OAF flux) 资料。

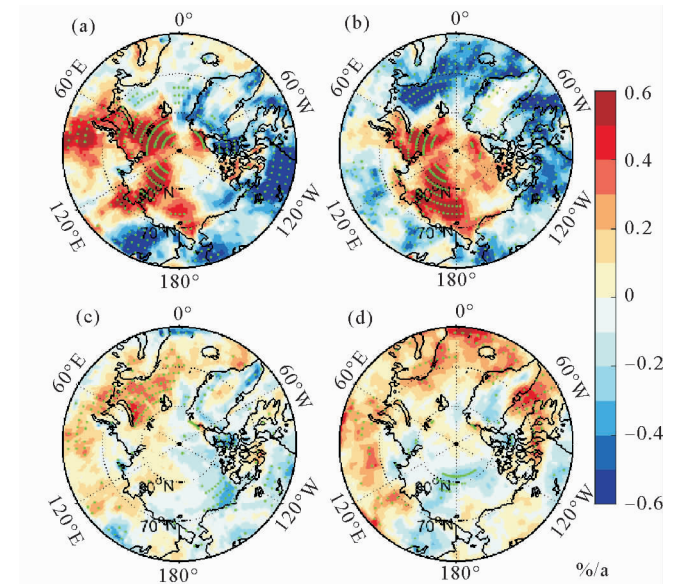
本文研究方法为一元线性回归分析和相关性分析, 显著性检验方法为 F 检验。

2 北极云量趋势变化的三维空间分布特征

2.1 总云量趋势的空间分布

基于 2000—2017 年 CERES 卫星的云量资料, 可以发现, 春季北极地区总云量的趋势大体上呈现出东

西半球反位相的跷跷板式变化特征, 从欧亚沿岸的喀拉海-拉普捷夫海-东西伯利亚海-楚科奇海这一带以东半球为主的东北极地区^①总云量有明显增加的趋势, 最大值可达 $0.8\%/a$, 而从波弗特海-加拿大群岛-格陵兰岛沿岸的北极西半球地区为主的北欧海区总云量呈显著的减少趋势, 最大值可达 $-0.5\%/a$ 。总云量趋势的这种东西半球跷跷板式的分布特征主要由低云量的变化所决定 (见图 1(b)), 低云量与总云量趋势变化的空间相关性最高, 相关系数可达 0.69, 中、高云量趋势变化与总云量趋势变化的空间相关系数分别为 0.47 和 0.22, 并且中、高云量趋势变化值较小 (见图 1(c), (d)), 因此相对于中云量和高云量, 低云量趋势变化对总云量趋势变化的贡献最大。



(绿色打点区域通过了 90% 显著水平检验 (单位: $\%/a$)。Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level (Units: $\%/a$.)

图 1 2000—2017 年春季北极 (a) 总云量; (b) 低云量; (c) 中云量; (d) 高云量趋势分布

Fig. 1 Patterns of trend of (a) total cloud cover; (b) low cloud cover; (c) middle cloud cover; (d) high cloud cover in the spring in Arctic from 2000 to 2017

2.2 低、中、高云趋势的垂直结构特征

春季北极地区对流层低、中、高云量的趋势变化还呈现出高低空云量相反的变化特征, 特别是低云量和高云量呈近乎相反的变化趋势 (见图 1(b), (d)), 二者的空间相关系数为 -0.43 。北欧海区低云量呈显著的

① 根据自然地理特点, 北冰洋分为北极海区 and 北欧海区两部分。北极海区包括北冰洋主体部分、喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海、波弗特海及加拿大北极群岛各海峡; 北欧海区包括格陵兰海、挪威海、巴伦支海和白海。本文将主要位于东半球的北极海区称为东北极海区。

减少趋势(见图 1(b)),中、高云量呈增加趋势(见图 1(c),(d)),因此该区域的总云量趋势变化不明显。在东北极海区从喀拉海到楚科奇海一带低云量呈显著增加的趋势(见图 1(b)),高云量呈减少的趋势(见图 1(d)),但高云的趋势变化明显小于低云的趋势变化。因此,春季北极地区云量的趋势变化不仅在水平场上呈现出球跷跷板式的反相变化特征,而且在垂直结构上低云和中高云也呈现出相反的变化趋势,这种水平和垂直方向双重反位相的振荡特征是由什么原因引起的,将在下文中进行探讨。

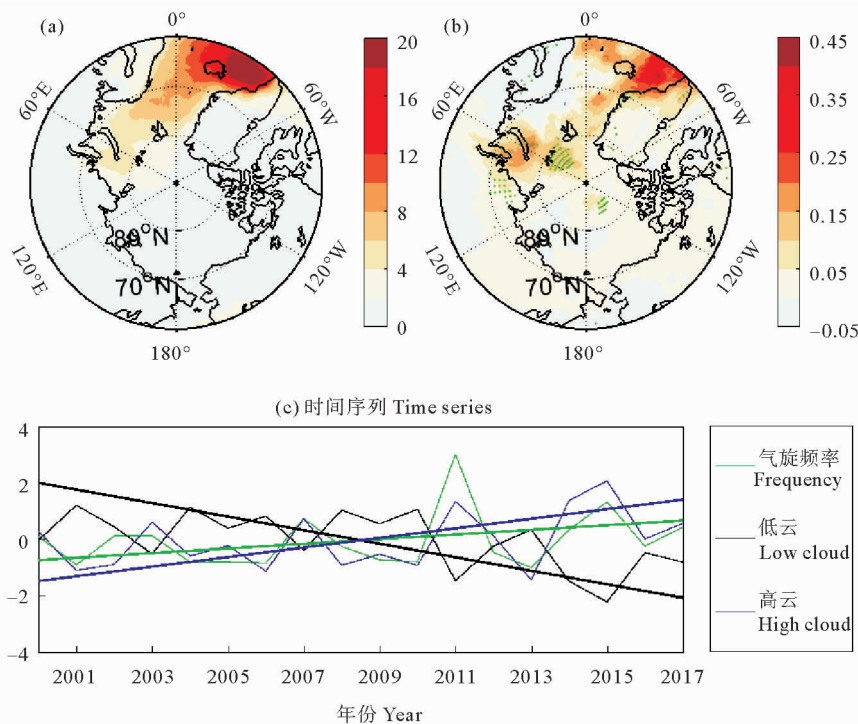
3 春季北极云量趋势变化的影响因子及其贡献

北极云量的变化主要受温湿、水汽特性的局地热力因子和影响垂直对流上升运动的大气动力因子的影响。局地热力因子主要是北极海冰融化过程产生的水汽蒸发,有利于云的生成^[16],大气环流的动力因子主要是极区外的中纬度风暴携带大量的水汽向极输送,造成云量的增加^[17]。

3.1 大气环流动力因子的贡献

为了体现大气环流动力因子的贡献,选取对北极

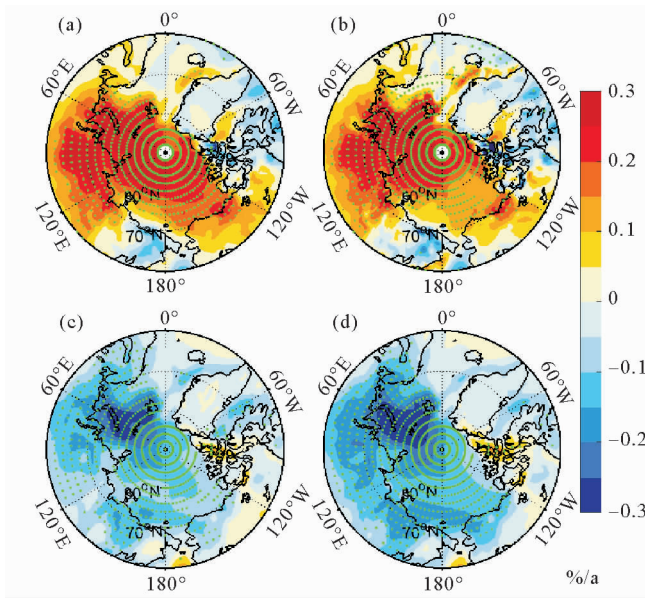
冰-气耦合过程有动力驱动作用的超强气旋(风暴)进行分析。这里定义北极地区气旋中心气压低于其 5% 累积概率气压阈值的气旋为超强气旋,统计超强气旋的发生频数。由图 2(a)可以发现春季北极地区超强气旋主要出现在北欧海区,说明该区域表层能量平衡容易受大气环流影响。因此,本文计算得到了 2000—2017 年春季北极地区的超强气旋出现频数的时间序列(见图 2(c)),发现北欧海区的超强气旋出现频率也呈现增加趋势,其趋势系数为 0.08/a,说明进入北欧海区的超强气旋频率增多,可以带来更丰富的水汽,有利于该区域云的生成。进一步的定量分析表明,北欧海区低云量和高云量的时间序列相关系数为 -0.93(见图 2(c)),这表明超强气旋的向极增多,进而可能导致更多的水汽进入北欧海区。从北极地区超强气旋线性趋势的空间分布(见图 2(b))可以发现,来自北大西洋中纬度的强风暴主要从冰岛、格陵兰海进入巴伦支海,带来这些区域大气的较强对流活动,引起大气层结出现对流不稳定(见图 3(c),(d)),云底抬升,因而造成低云减少、中高云增多的特征(见图 1)。



(绿色实线为超级气旋频率;黑色实线为低云量;蓝色实线为高云量。绿色打点区域通过了 90% 显著水平检验。The green solid line is the super cyclone frequency; The black solid line is low cloud cover; The blue solid line is high cloud cover. Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level.)

图 2 2000—2017 年春季北极(a)超级气旋频率分布;(b)超级气旋频率趋势分布和(c)经过标准化的超级气旋频率、低云量、高云量的时间序列(细实线)及其线性趋势(粗实线)

Fig.2 (a)The pattern of super cyclone frequency; (b) the pattern of super cyclone frequency trend; (c) time series (thin solid line) and trends (thick solid line) of standardized super cyclone frequency, low cloud cover and high cloud cover and their linear trend in the spring in Arctic from 2000 to 2107



(绿色打点区域通过了90%显著水平检验。Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level.)

图3 2000—2017年春季北极(a)2 m气温;(b)皮温;(c) $\theta_{700} \sim \theta_{1000}$;(d) $\theta_{500} \sim \theta_{1000}$ 趋势分布(单位:K/a)
Fig.3 Patterns of trend of (a) 2 m temperature;(b) skin temperature;(c) $\theta_{700} \sim \theta_{1000}$ and (d) $\theta_{500} \sim \theta_{1000}$ in the spring in Arctic from 2000 to 2017(Units: K/a)

3.2 局地热力因子的贡献

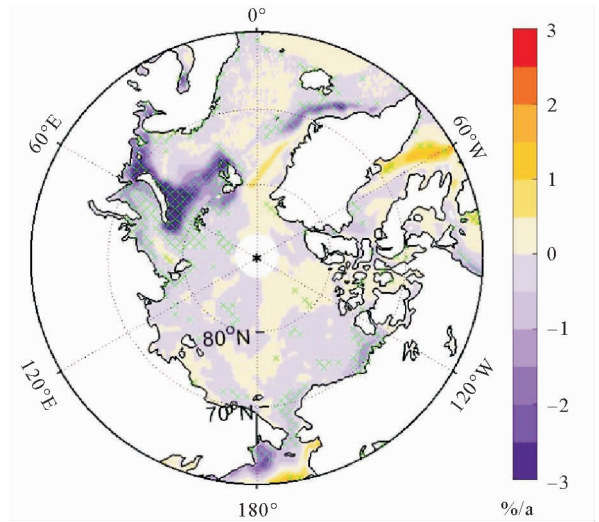
值得注意的是,引起北极地区云量趋势变化的局地热力因子的分布,都主要表现出北极地区整体一致性的变化特征。春季海冰密集度的减小趋势不仅在北欧海区显著,在东北极海区大部分区域海冰密集度也呈减少趋势(见图4),从而可能造成整个北极地区低层气温和表面温度增加的趋势(见图3(a),(b)),因此对流层中低层大气静力稳定度均呈现明显减弱的趋势(见图3(c),(d))。海冰融化的同时提供了水汽,在这种条件作用下有利于低云的形成,这可能是东北极海区低云呈明显增加趋势的原因。不同于北欧海区超强气旋的动力抬升作用,东北极海区超强气旋的频数增加并不十分显著(见图2(b)),不会像北欧海区那样产生较强的对流,因此东北极海区云量的趋势变化呈现出低云明显增加、而中高云量趋势变化较弱的特征。

4 云辐射强迫对北极放大的反馈作用

4.1 北极云辐射强迫的趋势变化特征

在研究云对北极地区海-冰-气反馈中的作用时,通常利用云辐射强迫来衡量,也称净的云辐射强迫或云辐射效应。云的辐射强迫定义为大气的净辐射通量与假定没有云时的净辐射通量之差。该定义既适用于地面和大气层顶,也适用于太阳短波辐射和长波辐射。云辐射强迫为云长波辐射强迫和云短波辐射强迫之

和。云辐射强迫为正值时,反映了云的加热效应;云辐射强迫为负值时,体现了云的冷却效应。

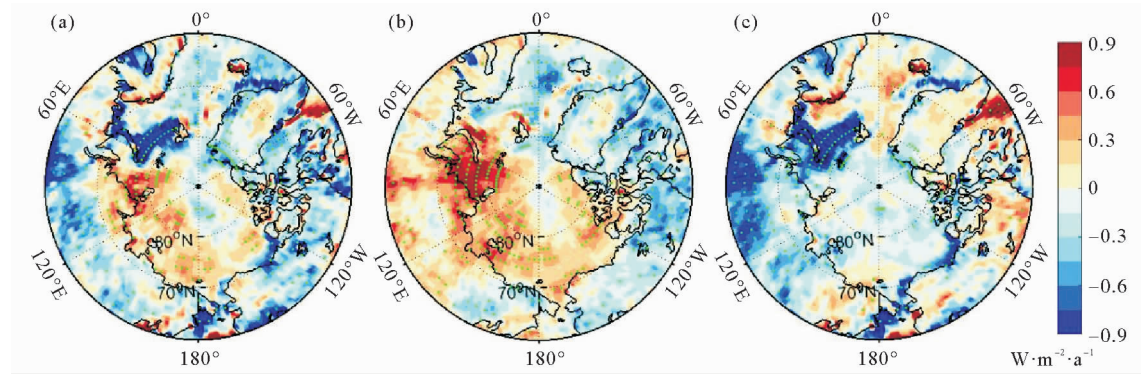


(绿色打×区域通过了90%显著水平检验。Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level.)

图4 2000—2017年春季北极海冰密集度趋势分布(单位:%/a)
Fig.4 Pattern of sea ice concentration trend in the spring in Arctic from 2000 to 2017(Units: %/a)

通常在北半球的春季,北极地区的云长波辐射强迫为正值,云短波辐射强迫为负值。图5给出了2000—2017年春季北极地区云辐射强迫、云长波辐射强迫和云短波辐射强迫的趋势变化的空间分布,可以发现,北极地区云辐射强迫的趋势呈现出与总云量类似的東西半球跷跷板式的偶极子型分布特征,在北欧海区,云辐射强迫呈减小的趋势,而在东北极海区,云辐射强迫呈增大的趋势(见图5(a)),表明在北极的西半球地区云量的辐射效应主要表现为降温的贡献,而北极的东半球区域云量的辐射效应主要体现为增温的作用,这从表面气温的趋势分布可以看到云辐射强迫的影响(见图3(a),(b))。

北极地区的云长波辐射强迫(见图5(b))和云短波辐射强迫(见图5(c))趋势也大体上在北欧海区和东北极海区呈现出跷跷板式的反位相空间分布特征,二者对云辐射强迫的贡献呈相反的变化趋势。在东北极海区,增温的云辐射效应主要是云长波辐射的正贡献,云长波辐射强迫的趋势最大值主要在喀拉海-拉普捷夫海,可达 $1.35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在巴伦支海以及格陵兰岛沿岸,云辐射的冷却效应主要由云短波辐射强迫的负贡献引起的,最强的云短波辐射强迫减少趋势位于巴伦支海区域,最大可达 $-2.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在北欧海区以及西半球的陆地区域,云辐射的冷却效应主要由云长波辐射强迫的负贡献引起的。



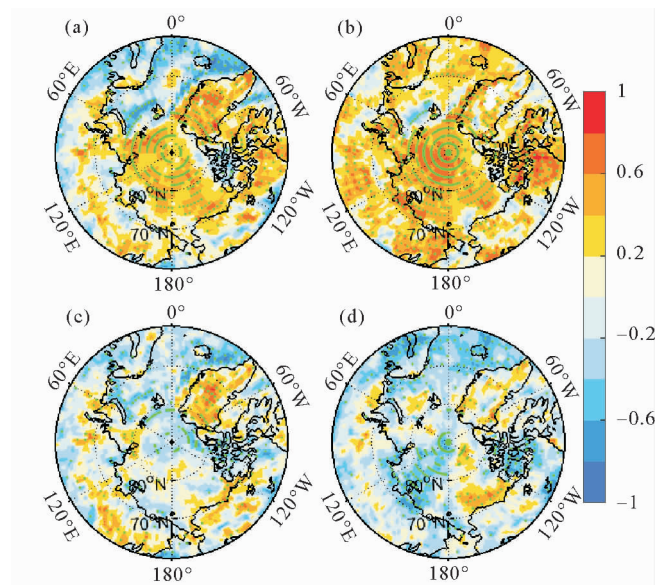
(绿色打点区域通过了 90% 显著水平检验。Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level.)

图 5 2000—2017 年春季北极 (a) 云辐射强迫; (b) 云长波辐射强迫; (c) 云短波辐射强迫趋势分布 (单位: $W \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)

Fig.5 Patterns of trend of (a) cloud radiative forcing; (b) cloud longwave radiative forcing; (c) cloud shortwave radiative forcing in the spring in Arctic from 2000 to 2017 (Units: $W \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)

4.2 云辐射强迫与云量的关系

为了探究春季北极地区不同高度层云量与云辐射强迫之间的关系, 本文对 2000—2017 年的云辐射强迫分别与总云量、低云量、中云量和高云量进行相关分析, 给出相关系数空间分布场 (见图 6)。



(图(a)~(d)分别为总云量、低云量、中云量、高云量与云辐射强迫的相关系数场。绿色打点区域通过了 90% 显著水平检验。(a) Total cloud cover; (b) Low cloud cover; (c) Middle cloud cover; (d) High cloud cover in the spring in Arctic from 2000—2017. Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level.)

图 6 春季北极云量与云辐射强迫相关系数空间分布

Fig.6 Patterns of correlation coefficient between cloud radiative forcing in the spring in Arctic

云辐射强迫与总云量的相关场 (见图 6(a)) 依然呈现出北冰洋海区偶极子型的相关分布。在北欧海区, 云辐射强迫与总云量呈负相关关系, 这种负相关关系

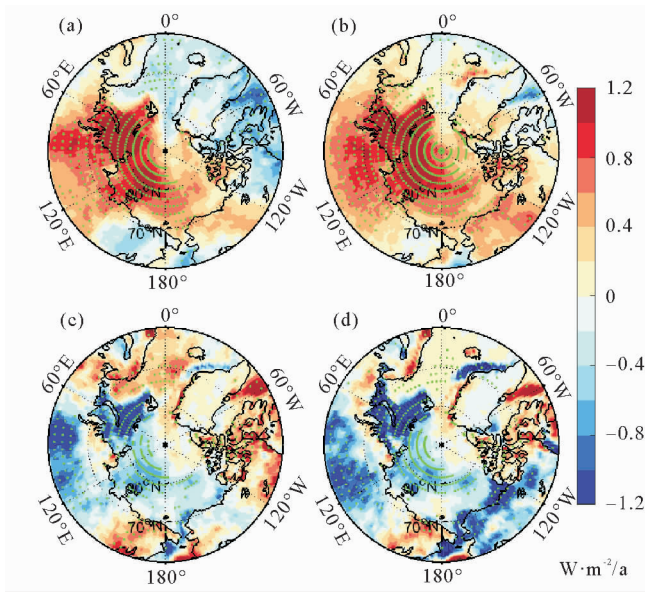
主要来源于云辐射强迫与中、高云之间的负相关关系 (见图 6(c), (d))。表明该地区中、高云云量越多, 云辐射的冷却效应越强。而在东北极海区云辐射强迫与总云量呈正相关关系 (见图 6(a)), 这种正相关主要来源于云辐射强迫与低云之间的显著正相关关系 (见图 6(b)), 说明该区域低云量越多, 对海表面的加热效应越强。西半球陆地上云辐射强迫与总云量主要呈正相关关系 (见图 6(a)), 格陵兰岛地区主要由中、低云与云辐射强迫的正相关关系所主导, 加拿大群岛地区的正相关关系则主要由低云与云辐射强迫的正相关抵消了中、高云与云辐射强迫的负相关而得到的 (见图 6(c), (d))。

4.3 北极增温的云反馈作用

春季北极地区除北欧海以及格陵兰岛、加拿大群岛等小范围区域外, 北极大部分地区都以显著的增温趋势为主 (见图 3(a), (b)), 最显著的增温趋势位于喀拉海-拉普捷夫海一带的东半球区域, 这种北极增温的非均匀分布, 与云反馈作用的影响密切相关。基于前文的研究可知, 东北极海区的低云云量显著增加而中高云趋势变化不显著 (见图 1), 由于低云量与净的云辐射强迫呈正相关关系 (见图 6(b)), 因此该区域云的长波辐射增温效应 (见图 5(b)) 主要是低云对云长波辐射效应的贡献。当全球变暖北极海冰融化 (见图 4), 低空大气层结稳定性减弱 (见图 3(c)), 海面水汽蒸发加强, 低空低云云量增加, 引起向下长波辐射增强 (见图 7(a)), 有利于表层温度升高 (见图 3(a), (b)), 进一步促进海冰密集度减小, 降低海冰反照率而使得向上短波辐射减弱 (见图 7(d)); 同时海洋吸收更多热量加热大气, 融化海冰, 形成海冰反照率正反馈过程, 加速了北极的增温 (即北极放大); 另一方面低云的增多会反射和散射更多的太阳短波辐射, 也会引起表层向下短波辐射减少 (见图 7(c)), 从而使得云长波辐射的增温效应大于云短波辐射的冷却效应, 产生净的云增温辐射

效应(见图 5(a))。因此北冰洋低云量的显著增加使得云辐射强迫作用强化了海冰反照率正反馈机制,从而加强了北极的增温趋势(见图 3(a),(b))。

对于北欧海区,由于低云量的显著减少而中高云异常增多(见图 1),低云减少中高云增加引起云辐射的冷却效应(见图 5(b)),抵消了该区域的增温,并使得格陵兰岛和加拿大群岛附近部分区域海冰密集度异常增加(见图 4),引起向上短波辐射的加强(见图 7(d));同时低云量的显著减少导致总云量减少,减弱了云对太阳短波辐射的阻挡作用,使得向下短波辐射增强(见图 7(c)),同时该区域中、高云云量越多,云辐射的冷却效应越强(见图 6(c),(d));这种云短波辐射强迫的增温效应(见图 5(c))与云长波辐射的冷却效应相抵消,因而使得北欧海区的海表面增温不显著(见图 3(a),(b))。由此可见,云量的垂直结构变化对北极放大的云反馈过程起重要作用,北极低云减少而中高云增加所引起的云辐射强迫分别体现了云的正、负反馈作用。



(绿色打点区域通过了 90%显著水平检验(单位: $W \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)。Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level(Units: $W \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$.)

图 7 2000—2017 年春季北极 (a) 地表向下长波辐射; (b) 地表向上长波辐射; (c) 地表向下短波辐射; (d) 地表向上短波辐射趋势分布

Fig.7 Patterns of trend of (a) surface downwelling longwave radiation; (b) surface upwelling longwave radiation; (c) surface downwelling shortwave radiation and (d) surface upwelling shortwave radiation in the spring in Arctic from 2000 to 2017

5 结论

本文利用 2000—2017 年月平均的 CERES 云量、

辐射资料和 ERA 再分析资料对春季北极云量趋势变化特征和成因及其对北极放大反馈的贡献进行了研究,发现云量趋势呈跷跷板式的东西半球反位相变化特征,其产生原因和云辐射反馈作用对北极放大的贡献归纳总结于图 8 的示意图中。

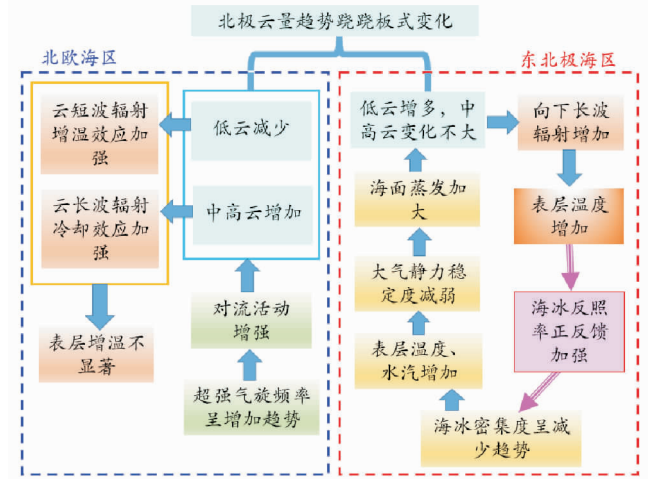


图 8 云反馈对北极放大作用的物理机制示意图
Fig.8 Schematic diagram of physical mechanism for Arctic amplification by cloud feedback

春季北极地区总云量的趋势在北欧海区和东北极海区呈跷跷板式的反位相变化特征,并与低云量的趋势变化有较为一致的空间分布,中高云则与低云大体上呈相反的变化特征。在北欧海区低云量呈减少趋势,中高云呈增加趋势。东北极海区低云量呈明显增加趋势,高云量呈减少的趋势,但高云的趋势变化明显小于低云的趋势变化。

在春季的北欧海区,进入该区域的超强气旋增多,带来丰富的水汽,对流增强,云凝结高度抬升,使得低云量减少而中高云量呈增加趋势。这种云量垂直结构的变化所引起的云辐射强迫作用分别体现了云的正、负反馈作用,增温和降温效应大体上相互抵消,使北欧海增温不显著,甚至有的地方负反馈作用强而出现降温趋势。

在春季的东北极海区海冰密集度呈减少趋势,海表面温度呈增加趋势,大气静力稳定度呈现明显减弱趋势,海冰融化的同时提供了充足的水汽,因此低云呈增加趋势。低云的这种变化有利于地表长波辐射增强,海表温度增加,进一步促进海冰密集度减少,形成正反馈过程,同时强化了海冰反照率正反馈机制,从而加强了东北极海区的增温趋势。

参考文献:

[1] Eastman R, Warren S G. Interannual variations of Arctic cloud

- types in relation to sea ice[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 4216-4232.
- [2] Harrison E, Minnis P, Barkstrom B, et al. Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the Earth Radiation Budget Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 18687-18703.
- [3] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. *Nature*, 2010, 464: 1334-1337.
- [4] Palm S P, Strey S T, Spinhirne J, et al. Influence of Arctic sea ice extent on polar cloud fraction and vertical structure and implications for regional climate[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D21209.
- [5] Kay J E, Gettelman A. Cloud influence on and response to seasonal Arctic sea ice loss[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D18204.
- [6] Intrieri J M, Fairall C W, Shupe M D, et al. An annual cycle of Arctic surface cloud forcing at SHEBA[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C10): 8039.
- [7] Francis J A, White D M, Cassano J J, et al. An arctic hydrologic system in transition: Feedbacks and impacts on terrestrial, marine, and human life[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: G04019.
- [8] Francis J A, Hunter E, Key J R, et al. Clues to variability in Arctic minimum sea ice extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L21501.
- [9] Huang Y, Dong X B, Dolinar E K, et al. The footprints of 16 year trends of Arctic springtime cloud and radiation properties on September sea ice retreat[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122: 2179-2193.
- [10] Choi Y S, Kim B M, Hur S K, et al. Connecting early summer cloud-controlled sunlight and later summer sea ice in the Arctic[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119: 11087-11099.
- [11] Cox C J, Uttal T, Long C N, et al. The role of springtime Arctic clouds in determining autumn sea ice extent[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29: 6581-6596.
- [12] Blanchard-Wrigglesworth E, Armour K C, Bitz C M, et al. Persistence and predictability of arctic sea ice in a GCM ensemble and observations[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24: 231-250.
- [13] Stroeve J C, Kattsov V, Barrett A, et al. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L16502.
- [14] Kapsch M L, Graverson R G, Tjernström M. Springtime atmospheric energy transport and the control of Arctic summer sea-ice extent[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 744-748.
- [15] Kapsch M L, Graverson R G, Economou T, et al. The importance of spring atmospheric conditions for predictions of the Arctic summer sea ice extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41: 5288-5296.
- [16] Barton N P, Veron D E. Response of clouds and surface energy fluxes to changes in sea-ice cover over the Laptev Sea (Arctic Ocean)[J]. *Climate Research*, 2012, 54(1): 69-84.
- [17] Woods, C, Caballero R, Svensson G. Large-scale circulation associated with moisture intrusions into the Arctic during winter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40: 4717-4721.

Seesaw Pattern of Arctic Cloud Cover Trend in Spring and Its Cloud Feedback Effect for Arctic Amplification

WANG Xin¹, HUANG Fei^{1,2,3}, WANG Hong^{1,2}

(1. Physical Oceanography Laboratory, CIMST, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

Abstract: Based CERES cloud cover, radiation data and ERA-Interim reanalysis data from 2000—2017 period, the characteristics, reasons and contribution to the Arctic amplification feedback of spring (March-May) cloud cover trend in Arctic are explored. A seesaw pattern of total cloud cover trend is found between the eastern Arctic Ocean and the Nordic Sea. Low cloud cover trend appears nearly consistent with the spatial pattern of the total cloud cover, and has almost opposite trend variation comparing to the middle-high cloud. Low cloud cover tends decreases, while the middle and high cloud cover tends increases in the Nordic Sea region, which is closely connected with the increasing super storm frequently entering the Atlantic sector and brings abundant water vapor. The storms also enhance convection, lift the cloud height and then results in the low cloud decrease and high cloud increase. The cloud radiative forcing effect caused by this cloud cover vertical structure mainly reflects a low cloud negative feedback and high cloud positive feedback effect, which cancels the warming and cooling effect for each other, inducing a non-significant warming trend in the Nordic Sea region. The low cloud shows a significant increasing trend in the eastern Arctic Ocean, while the middle-high clouds have no obvious trends. It may be related to the positive feedback process; a warming results in sea ice melting and sea surface temperature increasing, then strengthens sea surface evaporation and increases water vapor in the air. The atmospheric static stability is weakened, which is conducive to the formation of low cloud. Increasing low cloud intensifies the positive feedback mechanism of the sea ice-albedo feedback through the cloud radiative forcing, thus warming effect is enhanced in the eastern Arctic Ocean.

Key words: Arctic; low cloud; high cloud; seesaw pattern; spring; cloud feedback; Arctic amplification

责任编辑 庞 旻