

Interannual Variation of Spring Cloud Cover in Arctic and Its Effect on Arctic Amplification Feedback

Xin Wang¹, Fei Huang^{1,2,3*}, Hong Wang^{1,2}

¹Physical Oceanography Laboratory/CIMST, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao Shandong

³Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

Email: 916436100@qq.com, *huangf@ouc.edu.cn

Received: May 20th, 2019; accepted: May 28th, 2019; published: Jun. 4th, 2019

Abstract

Based on CERES cloud cover, radiation data and ERA-Interim reanalysis data from 2000-2017 period, obvious interannual variations of spring cloud cover are found in the top two modes by multivariate empirical orthogonal function (MV-EOF) decomposition. The significant signal is located in the Greenland Sea-Barents Sea in the Atlantic sector with negative low cloud anomaly and positive high cloud anomaly in first mode. Cloud radiative cooling effect is generated and offsets warming effect of Arctic amplification, so surface temperature has no evident change. The cloud cover in the Kara sea-Laptev sea of the Pacific sector and the center of the Arctic Ocean increases uniformly. The significance signal of the second mode is located over the Arctic Ocean except the Greenland Sea-Barents Sea with positive low cloud anomaly and negative high cloud anomaly, but high cloud change is not obvious. Such cloud cover change can produce strong cloud longwave radiative heating effect and enhance the sea ice-albedo positive feedback and arctic amplification feedback.

Keywords

Cloud Cover, Arctic Amplification, Cloud Radiative Forcing, MV-EOF

春季北极地区云量年际变化特征及其对北极放大反馈的作用

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

*通讯作者。

²青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛

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

Email: 916436100@qq.com, huangf@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019年5月20日; 录用日期: 2019年5月28日; 发布日期: 2019年6月4日

摘要

本文基于2000~2017年CERES云量资料对春季北极地区低、中、高云量进行多变量-经验正交函数分解(MV-EOF), 发现前两模态云量均存在较强的年际变化特征。第一模态显著信号位于在大西洋扇区的格陵兰海-巴伦支海, 低云量异常偏少, 高云异常偏多, 产生云辐射冷却效应, 与北极放大增暖效应相互抵消, 表层温度变化小。太平洋扇区的喀拉海-拉布捷夫海以及北冰洋中心高低空云量一致增加, 这种云量变化特征的产生云辐射效应对该区域表层能量平衡贡献较小; 第二模态显著性信号位于除了格陵兰海-巴伦支海以外的北冰洋上空, 低云量异常偏多, 高云异常偏少, 但是中高云变化不明显。这种云量变化会产生较强的云长波辐射加热效应, 增强北极放大反馈。

关键词

云量, 北极放大, 云辐射强迫, MV-EOF

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

在过去的几十年里, 北极正经历着海冰范围快速减少的过程, 并且伴随着近地表气温以超过全球平均两倍以上速度急剧升高, 这种现象被称为“北极放大效应”, 尽管北极放大造成的升温预计将持续到2100年[1], 海冰范围将继续减少, 但北极海冰范围的年际变化预测仍存在一定困难。北极海冰范围受多个反馈机制所影响, 其中海冰-反照率反馈和云辐射反馈对海冰融化和增长有着重要作用[2][3]。

北极是地球上云量最多的区域之一。云量变化会引起低层大气温湿结构的改变, Johansson等[4]指出冬春季北极地区的极端水汽入侵事件会引起云量明显增加, 对流层低层产生辐射加热效应, 这对夏季海冰的快速融化有一定贡献。云作为大气圈中的辐射强迫和反馈因子, 通过直接影响地气系统的长波和短波辐射进而调控地气系统的能量平衡, Kapsch[5]利用ERA-Interim再分析数据发现在年际尺度上, 春季的水汽和云量异常偏多, 向下长波辐射偏强, 产生的温室效应可以加速融冰初期的海冰融化速度, 提前触发海冰-反照率正反馈, 引起当年夏季海冰范围减小。Huang等[6]利用卫星资料从时空总体特征综合分析了春季云和辐射特征对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, 进而加快了海冰融化进程, 然而在5月下旬到6月, 随着向下短波辐射的增加, 逐渐对海冰的融化起主要作用。

在北极海冰迅速减少的背景下, 研究已经表明春季云量的年际变化对夏季海冰范围的预测具备一定能力, 说明了研究春季北极地区云量变化的重要性。Mace等[7]发现在美国平原地区低云对大气起降温作用, 而较薄的高云对大气起增温作用。前人在研究海-冰-气耦合过程时很少将北极地区云量分不同高

度层去研究, 不同高度层云变化产生的辐射效应对北极放大反馈贡献如何? 因此本文对春季北极不同高度层云量年际变化特征进行系统的研究, 并且探讨对北极放大反馈的可能贡献。

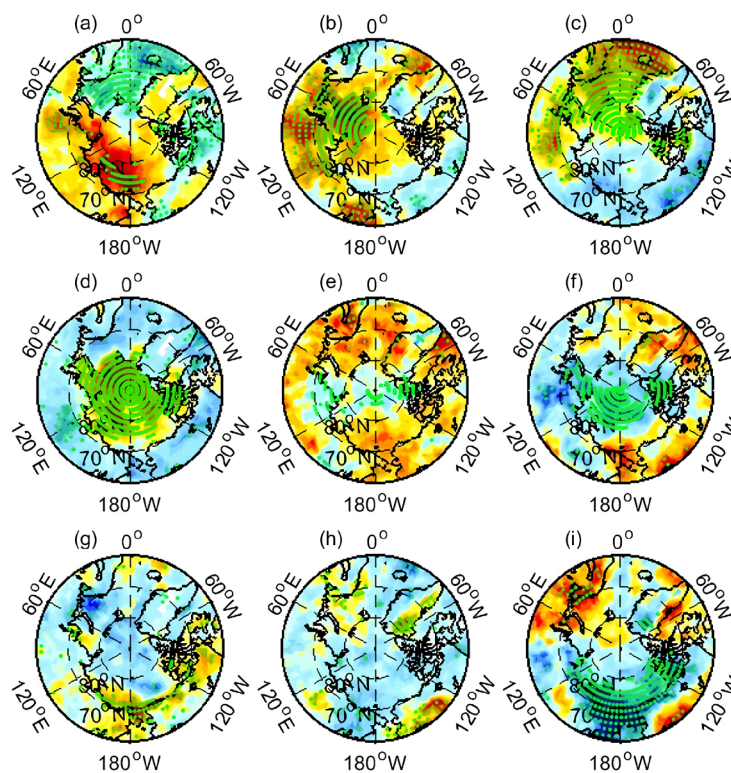
2. 数据和方法

本文使用的云量和辐射资料来源于 CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System), 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。云量资料包括: 总云量、低云量(1000~700 hPa), 中云(700~500 hPa), 高云(500~300 hPa); 辐射资料包括: 地表长波辐射通量、地表短波辐射通量、云长波辐射强迫、云短波辐射强迫和云辐射强迫。温度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 ERA-Interim 再分析资料, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。本文资料均为 2000~2017 年的月平均资料, 每年的 3~5 月份定义为春季, 研究范围为 60°N 以北。

为了客观分析近年来春季北极地区对流层中低、中、高云量协同变化特征, 本文采取多变量经验正交函数分解(MV-EOF)方法, 利用合成分析对各模态云量变化进行物理意义检验, 并通过回归分析探究云量变化特征对北极放大反馈的可能贡献。显著性检验方法为 F 检验和 t 检验。

3. 春季北极云量主模态特征

通过对将 2000~2017 年春季北极地区的低、中、高云量进行 MV-EOF 分解, 发现前四个模态累计方差贡献为 50.8%。根据前四模态经过标准化的时间序列, 选取标准差绝对值大于 1 和小于 -1 的年份, 分别对各层云量的距平场分别进行合成分析, 取其差值, 进行模态物理意义检验, 图 1 给出了前四模态的物理意义检验场, 然后将前四模态的空间分布场与云量数据的合成场进行空间相关分析, 表 1 给出了其相关系数, 可以发现前四个模态的空间分布场与物理意义检验场之间的相关系数均在 0.62 以上, 并通过了显著性检验。由图 1 可以看到第一模态低云的通过显著性检验的区域主要有格陵兰海 - 巴伦支海区域,



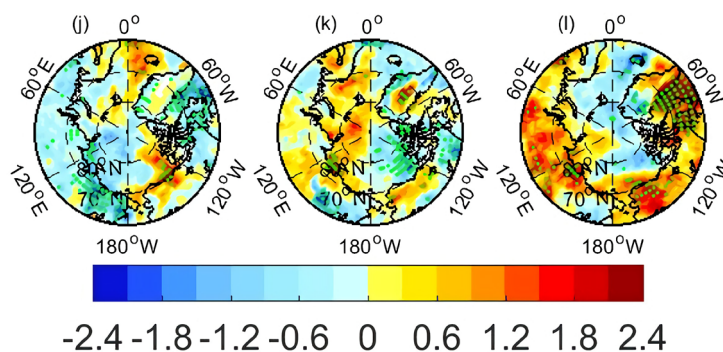


Figure 1. Physical significance test of MV-EOF mode. (a)-(c) First mode; (d)-(f) Second mode; (g)-(i) Third mode; (j)-(l) Fourth mode. The first three columns denote low, middle and high cloud cover. Shading denotes composite difference. Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level (T test)

图 1. MV-EOF 分析物理模态检验场。(a)~(c) 第一模态; (d)~(f) 第二模态; (g)~(i) 第三模态; (j)~(l) 第四模态; 其中第一列为低云; 第二列为中云; 第三列为高云; 填色代表云量合成差值场。绿色打点区域通过了 90%显著水平检验(T 检验)

Table 1. Spatial correlation coefficients between the eigenvector of the first for mode of MV-EOF and mode check patterns
表 1. MV-EOF 前四模态模态空间分布场与模态物理意义检验场的空间相关系数

	低云量	中云量	高云量
第一模态	0.83	0.91	0.80
第二模态	0.88	0.82	0.85
第三模态	0.81	0.78	0.91
第四模态	0.62	0.85	0.88

以及喀拉海 - 楚科奇海区域, 中云通过显著性检验的区域主要有格陵兰海 - 巴伦支海部分区域, 喀拉海 - 东西伯利亚海, 高云通过显著性检验的区域主要有格陵兰海 - 巴伦支海部分区域以及北冰洋中心部分区域。第二模态低、中、高云的通过显著性检验的区域主要为北冰洋中心, 而第三、四模态通过显著性检验的区域主要位于陆地区域, 且过显著性检验的区域较小, 因此本文重点分析前两模态的云量时空变化特征。

3.1. 第一模态

春季北极地区云量第一模态的方差贡献率为 17.3%, 由图 2 可看到其时空变化特征。在水平方向上, 春季北极地区低云呈偶极子分布特征, 在大西洋扇区为负异常, 在太平洋扇区为正异常; 中高云几乎在整个北冰洋为一致的正异常。在垂直方向上, 大西洋扇区的格陵兰海 - 巴伦支海以及东西伯利亚海 - 加拿大群岛以低云和高云呈反位相变化, 低云为负异常, 高云为正异常, 尤其是格陵兰海 - 巴伦支海区域, 加拿大群岛和格陵兰岛部分区域存在较弱的负异常。位于太平洋扇区的喀拉海 - 拉布捷夫海, 以及北冰洋中心区域各层云量呈高低空一致的正异常。第一模态时间序列具有显著的线性上升趋势和准 4 年周期的年际振荡特征, 趋势系数为 0.11%/年, 并通过显著性检验。

3.2. 第二模态

春季北极地区云量第二模态的方差贡献率为 14.6%。由图 3 可看到其时空变化特征, 可以发现春季整个北冰洋区域上空云量的空间整体分布呈现跷跷板式高低空反位相变化特征, 主要信号位于格兰海 - 巴伦支海以外的北冰洋区域, 在该区域低云正异常变化, 高云呈负异常变化, 且变化较弱。第二模态时间序列具有显著的线性上升趋势, 趋势系数为 0.09%/年, 并且呈现出明显的年际振荡特征。

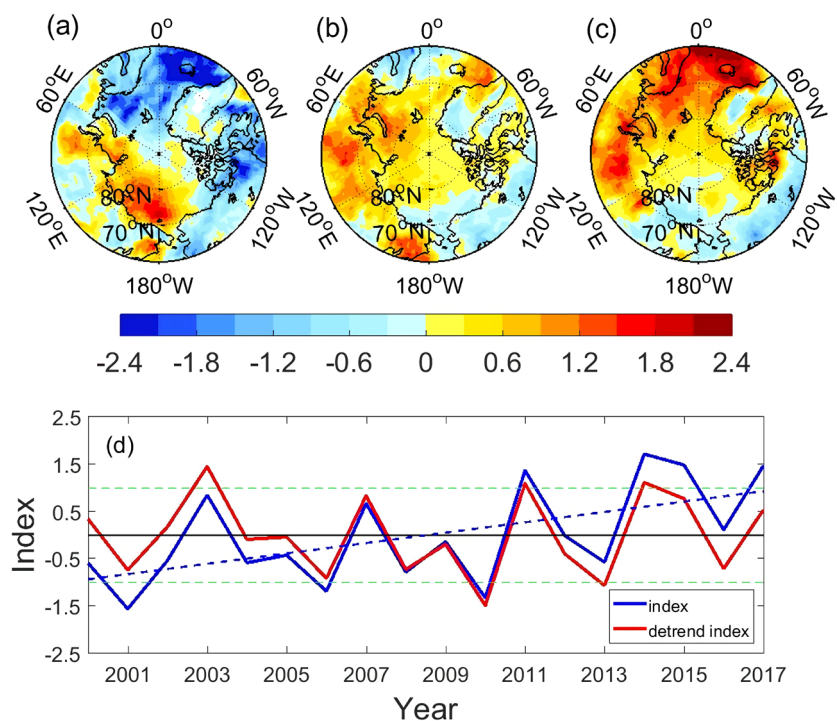


Figure 2. Spatial patterns and time series of spring cloud cover in. (a)-(c) Denote low, middle and high cloud. (d) Denotes the standardized time series of the first principal component (PC1) (red solid line: detrending; blue solid line: not detrending)
图 2. 春季北极地区第一模态的云量时空分布。(a)~(c) 分别代表低、中、高云的空间分布。(d) 为标准化时间序列(红色实线: 去线性趋势; 蓝色实线, 未去线性趋势)

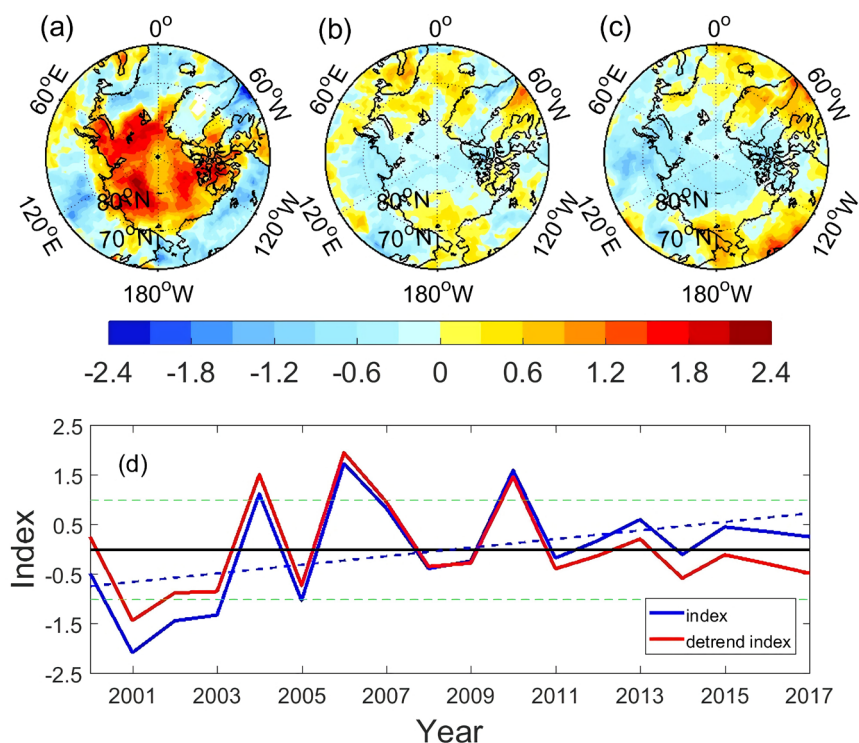


Figure 3. Same as in Figure 2, but for the second mode
图 3. 同图 2, 但为第二模态的云量时空变化

4. 春季北极云量年际变化对北极放大反馈的作用

在研究中通常利用云辐射强迫来衡量云量变化对北极地区海-冰-气反馈中的作用。云辐射强迫为云短波辐射强迫和云长波辐射强迫之和。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。为了探究北极地区云量年际变化对北极放大反馈的贡献,对去线性趋势的MV-EOF前两模态时间序列对云辐射强迫和表层温度进行回归分析。

4.1. 第一模态的作用

在第一主模态的云辐射强迫回归场(图4(a))中可以发现北极边缘海表现为云辐射强迫正异常,尤其是巴伦支海区域;而云辐射强迫在北冰洋中心表现为较弱的负异常;格陵兰海-挪威海以及加拿大群岛表现为明显的负异常。云长波辐射强迫(图4(b))和云短波辐射强迫(图4(c))呈现出偶极子型的空间分布,在大西洋扇区云长波辐射强迫呈负异常;在太平洋扇区云长波辐射强迫呈正异常,云短波辐射强迫反之。由于二者对云辐射强迫的贡献是相反的,并表现出区域差异性,因此云辐射强迫表现出较为复杂的空间分布特征。在太平洋扇区的喀拉海-楚科奇海,云辐射强迫的正异常主要是云长波辐射强迫的贡献。在大西洋扇区的巴伦支海,云辐射强迫的负异常最强,主要由云短波辐射强迫的负贡献引起的;在格陵兰海-挪威海和加拿大群岛,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。

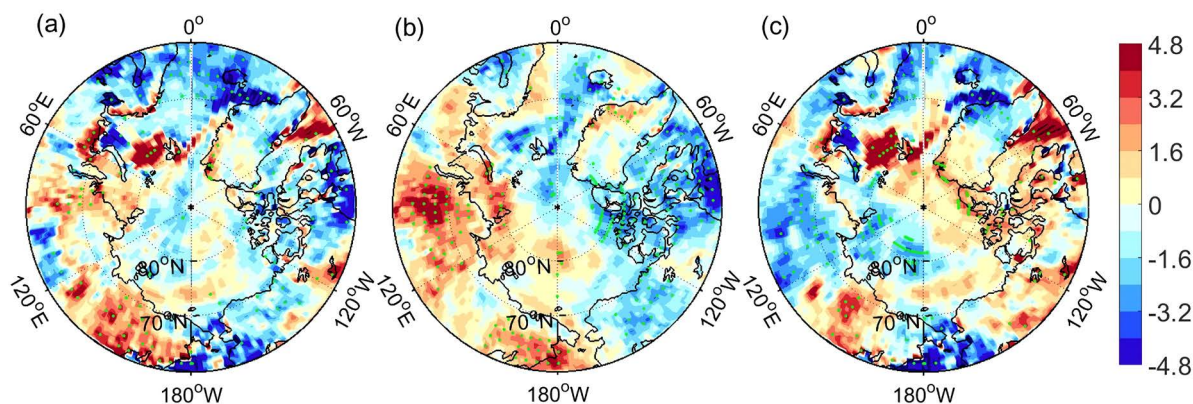


Figure 4. The linear regression of spring (a) cloud radiative forcing; (b) cloud longwave radiative forcing and (c) cloud radiative forcing (unit: W/m^2) on the first principal component (PC1) of cloud cover in Arctic. Shadings in figure denote regression value Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level (F test)

图 4. 春季北极云量的第一模态(PC1)对 (a) 云辐射强迫; (b) 云长波辐射强迫; (c) 云短波辐射强迫的回归场(单位: W/m^2)。填色为回归值,绿色打点区域通过了90%显著水平检验(F检验)

太平洋扇区云辐射强迫呈现区域性差异(图4(a)),甚至有些区域呈负异常变化,这可能是由于该区域低、中、高云量的一致增加,反射大量太阳短波辐射,导致向下短波辐射偏少(图5(c)),使云短波辐射强迫稍微强于云量增多产生的云长波辐射的加热效应(图4(b)),从表层温度的回归场(图6)可以发现,整个太平洋扇区却呈现了温度正异常,说明了在第一模态的太平洋扇区,可能是由于其他反馈机制,例如水汽正反馈,对表层温度的异常增加贡献更大,而云辐射冷却效应贡献较小,甚至对表层增温起到一定的抑制作用。

在整个大西洋扇区(图1),低云量为异常偏少,中高云异常偏多。在第一主模态的云辐射强迫回归场中(图4(a)),低云的异常偏少引起云长波辐射的冷却效应(图4(b)),加拿大群岛-格陵兰岛出现了异常偏低的表层温度(图4(b)),有利于海冰维持,引起向上短波辐射的加强(图5(d));在该区域低云的异常偏少对总云量偏少贡献较大,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(图8(c));这种云短

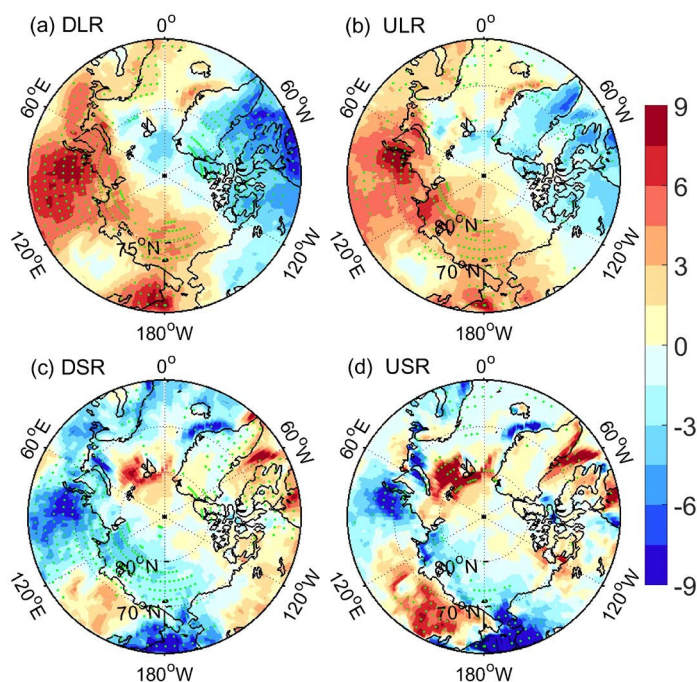


Figure 5. The linear regression of spring surface (a) downwelling longwave radiation; (b) upwelling longwave radiation; (c) downwelling shortwave radiation; (d) upwelling shortwave radiation (unit: W/m^2) on the first principal component (PC1) of cloud cover in Arctic. Shadings in figure denote regression value Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level (F test)

图 5. 春季北极云量的第一模态(PC1)对 (a) 向下长波辐射; (b) 向上长波辐射; (c) 向下短波辐射; (d) 向上短波辐射回归场(单位: W/m^2)。填色为回归值, 绿色打点区域通过了 90%显著水平检验(F 检验)

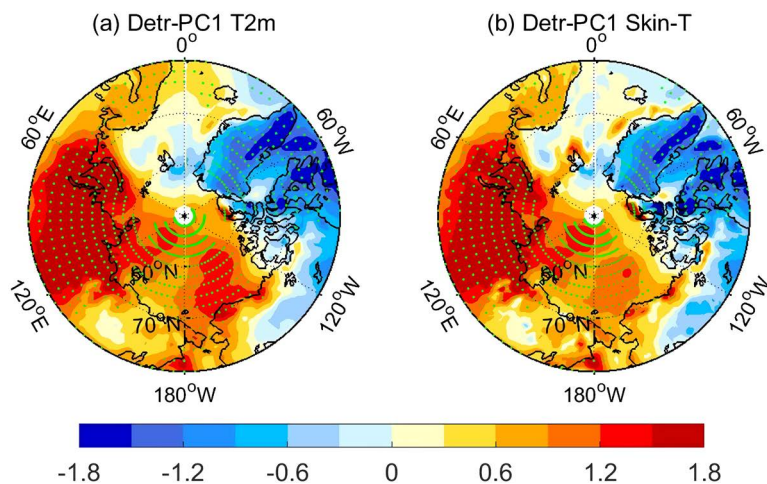


Figure 6. The linear regression of spring (a) 2 m temperature; (b) skin temperature (unit: K) on the first principal component (PC1) of cloud cover in Arctic. Shadings in figure denote regression value Green dots in figure denote areas exceeding the 90% confidence level (F test).

图 6. 春季北极云量第一模态对 (a) 2 m 气温; (b) 皮温的回归场(单位: K)。填色为回归值, 绿色打点区域通过 90%显著水平检验(F 检验)

波辐射强迫的增温效应(图 4(c))比低云大量减少产生的云长波辐射冷却效应弱, 因此导致了加拿大群岛 - 格陵兰岛异常偏低的表层温度。在格陵兰海 - 巴伦支海区域, 低云的异常偏少引起较强的云长波辐射的冷却效应(图 4(b)), 中高云增加可能阻挡了向下短波辐射(图 5(c)), 增强了该区域的云辐射冷却效应, 抵

消了北大西洋区域的增温效应，可能是格兰海 - 挪威海表层增温不明显的原因；巴伦支海区域的云辐射强迫呈现了极强的正异常，对巴伦支海的表层起到加热作用，然而该区域的表层温度呈现负异常，说明在年际变化尺度上，云量可能不是影响巴伦支海表层能量平衡的主要因子。

4.2. 第二模态云量的作用

第二模态云量变化的主要信号位于除格陵兰海 - 巴伦支海以外的北冰洋区域，也是海冰覆盖的区域，在该区域低云异常偏多，中高云异常偏少，但是中高云变化较弱(图 3)。因此相比于中高云，该区域低云的异常变化对该区域的海 - 冰 - 气耦合过程起重要作用。在云辐射强迫回归场中(图 7)，可以发现在北冰洋区域低云量正异常的区域(图 3(a))，云辐射强迫也呈正异常，表层温度也表现为正异常(图 9)。这可能是

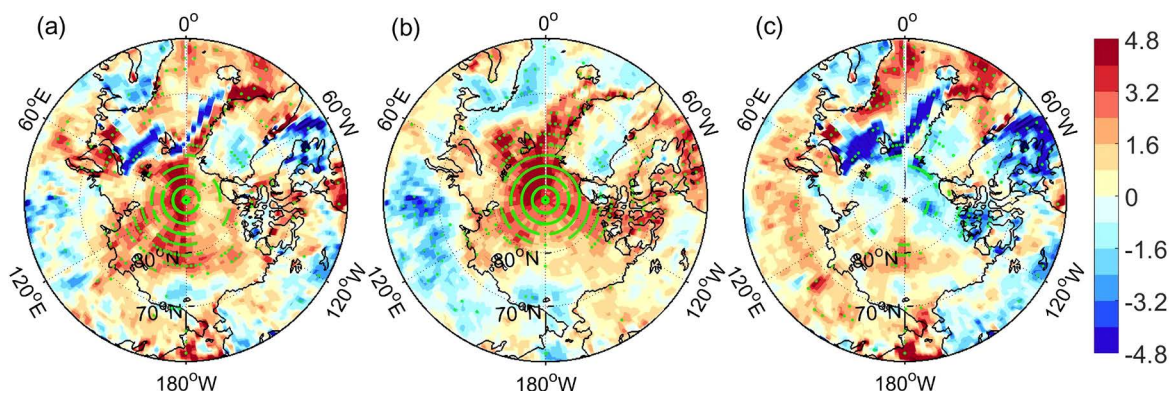


Figure 7. Same as in Figure 4, but for the second mode
图 7. 同图 4，但为第二模态的回归场

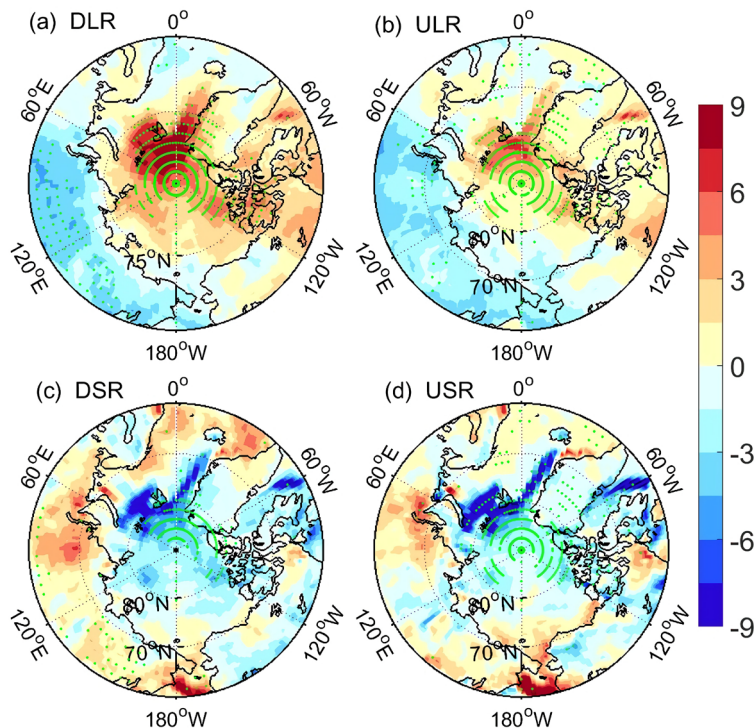


Figure 8. Same as in Figure 5, but for the second mode
图 8. 同图 5，但为第二模态的回归场

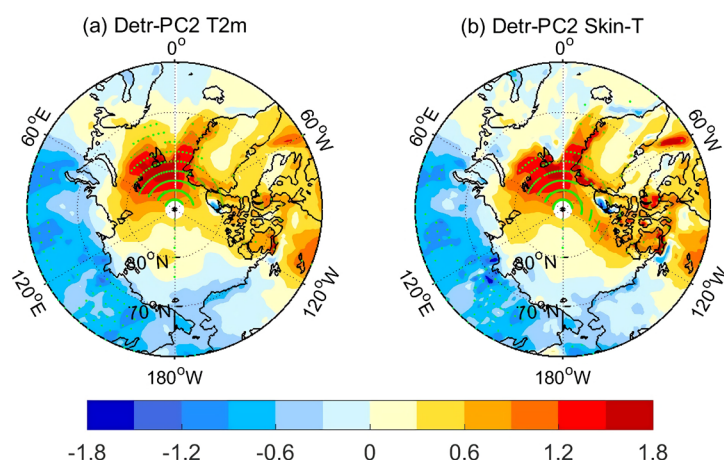


Figure 9. Same as in Figure 6, but for the second mode
图9. 同图6, 但为第二模态的回归场

由于低云的异常偏多, 阻挡地表向上长波辐射向太空放出, 向下长波辐射异常增强(图8(a)), 因此在北冰洋云的长波辐射加热效应增强(图8), 并强于云短波辐射产生的冷却效应, 因此表层温度异常偏高(图9)。同时在年际变化尺度上低云增多, 地表向下长波辐射增强, 表层温度异常增加, 海冰密集度减小, 表层反照率减小, 向上短波辐射异常减小(图8(d)), 因此加强了海冰-反照率正反馈过程, 增强了北极放大反馈的增温效应。

5. 结论和讨论

北极地区长期被云覆盖, 云作为影响地气能量平衡的关键因子, 在北极放大反馈有着重要作用。本文利用 CERES 云量、辐射资料和 ERA 再分析资料对 2000~2017 年北极春季低云量、中云量和高云量进行 MV-EOF 分析, 并通过辐射因子探究了不同高度层云量年际变化对北极放大反馈中的贡献, 具体成果体现为以下几点。

第一模态云量变化特征: 春季北冰洋大部分区域云量呈现高低空反位相变化特征, 主要区域有大西洋扇区的格陵兰海-巴伦支海、东西伯利亚海-加拿大群岛以及北冰洋中心区域, 低云量呈负位相信号, 高云呈正位相信号, 尤其是格陵兰海-巴伦支海区域, 太平洋扇区的喀拉海-拉布捷夫海以及北冰洋中心区域, 呈高低空云量正异常变化, 时间序列具有显著的线性上升趋势和准 4 年周期的年际振荡特征。

第一模态云量年际变化的作用: 大西洋扇区的格陵兰海-巴伦支海低云量减少, 中高云量增加造成了该区域云辐射强迫明显负异常, 对表层起冷却效应, 抵消了北极放大的增温效应。大西洋陆地区域在云辐射冷却效应作用下表层温度呈现明显负异常。在太平洋扇区, 可能是水汽正反馈对表层辐射平衡的贡献更大, 而云辐射反馈的贡献较小。

第二模态云量变化的特征: 整个北极地区上空云量的空间整体分布也呈现高低空反位相变化特征, 显著性信号位于除了格陵兰海-巴伦支海以外的北冰洋上空, 低云呈正位相信号, 高云呈负位相信号。第二模态时间序列具有显著的线性上升趋势, 并且年际振荡明显。

第二模态云量年际变化的作用: 低云增多, 地表向下长波辐射的增强, 表层温度增加, 有利于海冰融化, 加强了海冰-反照率正反馈过程, 增强了北极放大反馈的增温效应。

基金项目

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

参考文献

- [1] Holland, M.M. and Bitz, C.M. (2003) Polar Amplification of Climate Change in Coupled Models. *Climate Dynamics*, **21**, 221-232. <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0332-6>
- [2] Serreze, M.C. and Francis, J.A. (2006) The Arctic Amplification Debate. *Climate Change*, **76**, 241-264. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9017-y>
- [3] Curry, J.A., Rossow, W.B., Randall, D. and Schramm, J.L. (1996) Overview of Arctic Cloud and Radiation Characteristics. *Journal of Climate*, **9**, 1731-1764. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<1731:OOACAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<1731:OOACAR>2.0.CO;2)
- [4] Johansson, E., Devasthale, A., Tjernström, M., *et al.* (2017) Response of the Lower Troposphere to Moisture Intrusions into the Arctic. *Geophysical Research Letters*, **44**, 2527-2536. <https://doi.org/10.1002/2017GL072687>
- [5] Kapsch, M.L., Graversen, R.G. and Tjernström, M. (2013) Springtime Atmospheric Energy Transport and the Control of Arctic Summer Sea-Ice Extent. *Nature Climate Change*, **3**, 744-748. <https://doi.org/10.1038/nclimate1884>
- [6] Huang, Y., Dong, X., Xi, B., Dolinar, E.K., *et al.* (2017) The Footprints of 16 Year Trends of Arctic Springtime Cloud and Radiation Properties on September Sea Ice Retreat. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **122**, 2179-2193. <https://doi.org/10.1002/2016JD026020>
- [7] Mace, G.G., Benson, S. and Kato, S. (2006) Cloud Radiative Forcing at the Atmospheric Radiation Measurement Program Climate Research Facility: 2. Vertical Redistribution of Radiant Energy by Clouds. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D11S91. <https://doi.org/10.1029/2005JD005922>

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: ccl@hanspub.org