

纪旭鹏,赵进平. 北极中央区海冰密集度与云量相关性分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(11): 92-104. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.009

Ji Xupeng, Zhao Jinping. Analysis of correlation between sea ice concentration and cloudiness in the central Arctic[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(11): 92-104. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.009

北极中央区海冰密集度与云量相关性分析

纪旭鹏¹, 赵进平¹

(1 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 本文使用海冰密集度以及低云、中云、高云的日平均数据,借助滑动相关分析方法,研究了北极中央区海冰密集度与云量之间的相关性,分析了海冰与云的相互作用机制。研究表明,在春季海冰融化季节(4、5月)、秋季海冰冻结季节(10、11月),低云与海冰密集度之间表现为较好的负相关,表明在这段时间内冰区海面蒸发强烈,对低云的形成有重要贡献。在10月和11月,中云与海冰密集度也有很好的负相关,表明秋季低云可以通过抬升形成中云。高云与海冰密集度之间并没有明显的相关性,可能原因:一方面海冰的空间分布对高云无影响,另一方面,高云主要影响到达的短波辐射,从而影响海冰的融化和冻结速度,与海冰厚度有直接显著的关系,而与海冰密集度的关系不明显。此外,在海冰密集度与低云存在较好负相关的情况下会出现某些年份相关性不好的情况,我们的研究发现这是北极中央区与周边海区发生了海冰交换或云交换的结果。

关键词: 北极中央区;海冰密集度;云量;滑动相关

中图分类号: P732.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)11-0092-13

1 引言

海冰作为北极重要的自然现象,强烈制约着海气热量交换,对北极气候乃至北半球气候起到了重要的调控作用,北极海冰通过影响大洋表面的辐射平衡、物质平衡、能量平衡以及大洋温、盐流的形成和循环而影响全球气候变化^[1-3]。自20世纪70年代末开始,北极夏季海冰覆盖范围始终在不断减少,厚度不断变薄,多年冰的数量不断变少,且最近几年减少的速度明显加快,整个北极地区一年冰及多年冰的总面积从1979—1996年的每10年减少2.2%和3.0%变为1998—2007年的每10年减少10.1%和10.7%^[4]。在2012年9月16日,海冰覆盖范围出现了有历史记录以来的最低值^[5]。

云作为一种自然现象,对辐射有两种近乎相反的重要影响:一方面,云的存在阻碍了太阳短波辐射到达北极地区表面,海冰吸收热量减少,有利于海冰的维持;另一方面,云的存在阻碍了地球表面长波辐射的射出,造成气温升高,促进海冰融化^[6]。大气中云和雾的大幅度减少会导致海冰吸收热量的大幅度增加,是导致北冰洋密集冰区的海冰快速融化的重要因素^[7]。因此,北极地区的云在北极海冰变化中起到非常重要的作用。另外,北极地区海冰的增加或减少同样可能对云有重要的影响。所以探究北极地区海冰与云之间的关系十分重要。

云的高度实际上指示了云来源的差异。低云主要来自下垫面的蒸发过程,早期形态可能是海雾。在太阳辐射加热条件下,表面蒸发的水汽发生抬升,形

收稿日期:2015-04-16;修订日期:2015-06-16。

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2015CB953903);国家自然科学基金委员会重点基金项目(41330960)。

作者简介:纪旭鹏(1990—),男,山东省莱阳市人,从事极地海洋学与全球海洋变化研究。E-mail:jixupeng90@126.com

成低云。由于在北极有强烈的逆温层,有很好的静力稳定度,不易产生强对流天气,因而低云难以成为高云。高云的形成主要是在强对流区域发生的蒸发形成的,在北极周边形成强对流的区域通常靠近冰岛低压和阿留申低压,形成的高云随大气环流扩展到北极。

前人已经对北极地区海冰与云之间的相关性进行了研究。Schweiger 等研究发现,在海冰边缘区,云量变化与海冰变化有很强的关系,海冰减少,低云减少,同时中云增加^[8]。Liu 等的研究表明,海冰密集度每减少 1%,云量会增加 0.36%~0.47%^[9]。海冰的厚度受到云量保温作用的显著影响,在春季,云量的改变影响到达冰面的短波辐射,是造成海冰厚度变化的主要驱动因子;但是,云量的变化对海冰密集度几乎没有影响^[10-11]。在夏季,低云对海冰减少几乎无响应,云量与海冰没有表现出显著的关系^[12-13]。然而,2007 年夏季北极海冰面积出现的极端低值,与云量减少造成的地面接收短波辐射增加有关^[14]。在秋季,海冰边缘区的开阔水域上方有云形成,但在海冰上方并没有云形成^[15]。在靠近太平洋的北极边缘海中,新形成的开阔水域上方确实有低云量的增加^[16],这可能促成一个初秋云-冰反馈机制的产生^[13]。在冬季,云量的减少有助于海冰的增加^[10]。Eastman 指出,相比于中云和高云,低云是总云量的重要贡献因子^[16]。前人的研究表明,云量和海冰面积在春季和秋季有明显的负相关性,夏季和冬季的相关性较弱。

此外,数值模拟也被用于研究北极海冰与云之间的相关性。Beesley 通过一个理想化能量平衡模式和单柱模式(SCM)研究北冰洋海冰厚度与云量的相关性时发现,低云的增加有利于冰变厚,高云的增加将会导致冰变薄^[17]。Vavrus 等通过国际气候系统模式 CCSM3 进行模拟,结果表明,海冰与中云及高云在各个季节都没有明显的相关关系,但是海冰减少与低云增加是相对应的,只是两者的超前滞后关系并不明确,并且夏季低云的减少可能会促进秋季海冰减少及云量增加^[18]。Koenigk 等利用全球耦合气候模式 EC-Earth2.3 模拟的结果表明,在巴伦支海,海冰减少最为明显,并且伴随着海冰减少,低云大量减少,与此同时,中云与高云有少量增加^[19]。

前人的研究表明了海冰与云之间存在着季节性的相关性。不同研究者的结果表现出了较大的差异,可能与区域性差异有关。海冰与云量存在显著的多年变化,人们对这种变化的认识不多。另外,以往的

研究主要分析北极海冰边缘区海冰密集度与云量的相关性,而北极海冰边缘区的海冰变化会受到多种因素的影响。北极中央区主体由密集冰区覆盖,与云的相关性与海冰边缘区有很大不同,但随着海冰的减少,北极中央区海冰逐渐也呈现出海冰边缘区的特征。因此,就目前北极海冰的物理状态来说,研究北极中央区海冰密集度和云量的相关关系显得重要起来。为此,本文采用云量数据和海冰密集度数据,研究北极中央区不同季节云与海冰密集度的相关性,研究云与海冰之间关系的多年变化,较全面地认识北极云量与北极中央区海冰密集度的关系。

2 数据和分析方法

2.1 数据

本文使用的海冰密集度数据是 85 GHz 的 SSM/I 与/或 SSM/IS 通道测量的亮温数据经过 ARTIST Sea Ice(ASD)算法得到的日平均数据,并且在数据发布之前,整个时间序列都使用了中值滤波算法,空间分辨率为 12.5 km×12.5 km。本文使用的云量数据是 NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis version 2 的日平均数据,分为 3 种,分别是低云数据、中云数据、高云数据,该数据是空间分辨率为 1.875°(经度)×~1.904°(纬度)的经纬度网格数据,其中低云是地面至 650 hPa 之间的云,中云为 400~650 hPa 之间的云,高云是 400 hPa 至大气层顶之间的云。海冰密集度数据与云量数据的时间跨度都为 1992 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日。此外,为了剔除极端天气现象的影响,我们对 3 种云量数据都进行了 7 点时间平均的平滑处理。

同时,由于本文使用的云量数据是经纬度网格数据,在北半球,随着纬度的增加,1°×1°范围的面积在不断变小,而且越靠近极地区域,面积变小的速率越大。所以我们需要引进一个面积系数 A_c ,将经纬度网格数据转化为面积数据。

$$A_c = R^2 \cos\varphi \Delta\lambda \Delta\varphi, \quad (1)$$

式中, R 为地球半径, λ 为经度, φ 为纬度。每一个云量数据都乘以其对应的面积系数便可以将云量的经纬度网格数据转化为面积数据。

2.2 分析区域

由于云具有很强的流动性,局地的云与海冰之间很难有显著的相关。海冰密集度与云量如果有联系,也只能在大范围云和大范围海冰之间存在相关性。因此,本文将北极地区分为北极太平洋扇区、北极大

西洋扇区以及北极中央区(图 1)。确定北极中央区的形状是比较任意的,主要是反映密集冰区的大致范围,我们的试验表明,形状的改变对结果影响很小。本文重点分析北极中央区云与海冰的关系。

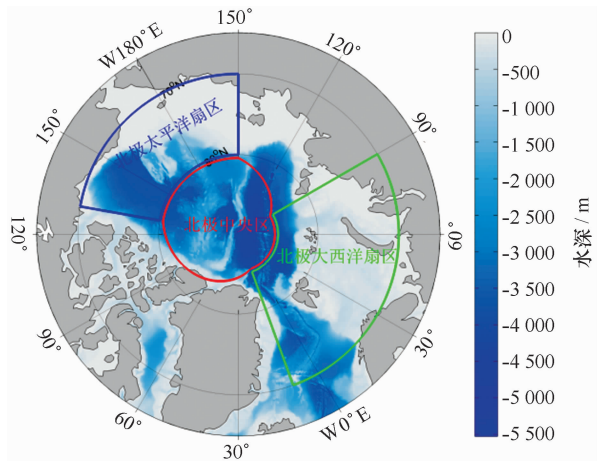


图 1 北极地区分区图

Fig. 1 Regional divisions of Arctic region

2.3 滑动相关分析法

本文借鉴 Zhao 等在研究北极涛动指数(AOI)与海表面压强(SLP)之间相关性分析时使用的滑动相关方法^[20],具体原理如下:

$$R_i = \frac{\sum_{k=i-n}^{i+n} (X_k - \bar{X}_k)(Y_k - \bar{Y}_k)}{\sqrt{\sum_{k=i-n}^{i+n} (X_k - \bar{X}_k)^2} \sqrt{\sum_{k=i-n}^{i+n} (Y_k - \bar{Y}_k)^2}}, \quad i = 1+n, \dots, N-n \quad (2)$$

式中, N 为总的的数据点数, X 代表海冰密集度数据, Y 代表云量数据, R_i 是第 i 个滑动窗口($-n, n$)中心点对应的海冰密集度与云量之间的滑动相关系数。经过顺序移动计算窗口,可以得到海冰密集度与云量数据在 $2n$ 时间段相关系数的时间序列。通过分析滑动相关系数在各月以及各季节的高低,就能够分析海冰密集度与云量之间的相关性随时间的变化。

滑动窗口 n 的选择是滑动相关分析的关键,需要根据研究的物理量变化的时间尺度来确定。通常情况下,随着 n 值的增加,得到的滑动相关系数会不断变小。如果 n 值选择太小,就会显现更多高频成分的影响;反之,如果 n 值选择太大,就会突出低频的成分,一些重要的较高频率的现象将被消除。

图 2 显示的是取不同滑动窗口得到的时间范围为 1993—1994 年的北极中央区域海冰密集度与云量滑动相关系数绘制的曲线。 n 取 15、30、45 时分别代

表 1、2、3 个月的滑动窗口。从图中可以看出, $n=15$ 时,滑动相关系数的波动范围太大,这是由天气尺度的高频扰动造成的。而 $n=45$ 时,滑动相关系数与 $n=30$ 时接近。因此,本文中进行北极中央区域海冰密集度与云量之间滑动相关分析时使用 $n=30$,即两个月的滑动窗口。需要说明的是,滑动窗口取两个月,那么 1 月份的滑动相关系数应该涉及 12 月至 2 月这一时间范围内的所有数据,只是滑动窗口中心在 1 月份。

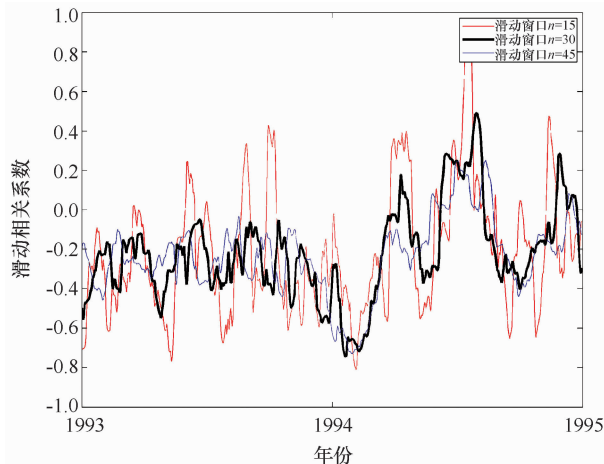


图 2 不同时间窗口滑动相关系数对比图

Fig. 2 Comparison of running correlation coefficients with different window lengths

3 海冰密集度变化与云量的相关性

本文在使用滑动相关方法进行北极中央区海冰密集度与云量之间相关性分析时,主要是分析两者在各月以至各季节的相关性。以 1 月份为例,具体的相关性分析是将 1992—2010 年总共 19 年的海冰密集度与云量的日平均数据进行总体滑动相关,得到滑动相关系数的 19 年时间序列,然后从这 19 年的滑动相关系数中,取出 1 月份的滑动相关系数,绘制图像,从图像中就可以看出在这 19 年中,海冰密集度与云量在 1 月份所表现出的相关性。

下面,我们对北极中央区海冰密集度与低云、高云、中云 3 种云在各季节的相关性进行分析。

3.1 海冰密集度与低云的相关性

春季的时间范围为 3—5 月,在北极,海冰面积在 3 月达到最大值,4、5 月份是北极海冰开始融化的季节,但是在北极中央区,这个时期海冰变化较小。从图 3 中可以看到,北极中央区的海冰密集度与低云在

不同年份的3月表现出的相关性差异很大,所以两者并没有较好的相关性;4月除了1994、2001、2004、2008年之外,海冰密集度与低云的滑动相关系数都为负值,并且大部分都通过了95%置信度检验;5月,除了在1995、1997、1999、2007、2008、2010年的部分时间以及2004年,海冰密集度与云量表现为较好的负相关。以上分析表明,4月和5月北极中央区的海冰密集度与低云表现为较好的负相关性。但是,有些年份相关性不好。

6—8月是北冰洋的夏季,在北极中央区,低云与海冰密集度在整个夏季都没有表现出显著的相关性。

秋季的情况与夏季不同。9月在北极中央区,海冰密集度与低云在不同年份表现出的相关性差异很大,表明两者并没有较好的相关性。10月除了在1996、1998、2000、2004年的小部分时间,以及2008—2010年海冰密集度与低云在10月表现为较好的负相关性。而在11月海冰密集度与低云的相关性最好,只有在1994、2008年的小部分时间以及2009—2010年相关性较差。10月和11月是北极地区的秋季海冰冻结季节,上面的结果表明,在这段时间内,北极中央区的海冰密集度与低云表现为较好的负相关性。

12月至翌年2月是北冰洋的冬季,虽然从图中看出冬季海冰密集度与低云在整体上表现为负相关性,但是冬季海冰密集度很高,只在小范围内变化,冰间水道的比例很低,蒸发量小不足以形成大范围的低云,不能较好地研究海冰密集度与低云的相关性,因此本文对冬季的情况不进行深入研究。

低云与海面蒸发有明显的关系,本文的结果表明,春季4、5月份和秋季10、11月份,低云与海冰密集度有较好的相关,这与Eastman^[16]的结果一致。这两个季节的气温较低,开阔水道可以形成强烈的蒸发,产生低云。负相关表明,海冰密集度越低云量越高,体现了蒸发对低云的贡献。夏季海冰大幅度减少,而海冰密集度与低云的相关性却很差,原因可能是夏季海冰大幅度减少,有更多的开阔水域,因而有更多的蒸发^[21],但是由于夏季温度高,饱和水汽压高,蒸发的水汽并不会立即形成较多的低云,到了秋季,当温度降低时,更多的低云才会形成^[22]。此外,也可能是由于夏季海冰密集度时间变化率比较大,云不存在同步的时间变化率,两者即使有关联,也可能被海冰自身的时间变换率所掩盖。冬季由于海冰密集度很高,气温低,开阔水道稀少,蒸发率小,不足以

形成大范围低云。

3.2 海冰密集度与高云的相关性

由于北极下表面温度较低、逆温层较强,没有很强的对流形成高云,因而,北极的高云都不是当地海洋蒸发的结果,而是在对流区形成并被输送到北冰洋。高云极大地影响到达海冰的太阳辐射,对于海冰的融化产生强烈的影响,云量与海冰之间应该有显著的正相关。然而,从图4中我们可以看出,在北极中央区,海冰密集度与高云之间在全年都没有表现出较好的相关性,这与Vavrus等^[18]的研究结果有很好的 consistency。

研究表明,海冰的空间分布不会影响高云,并且高云虽然通过影响到达的太阳辐射影响海冰融化过程,但其影响的主要是海冰厚度的变化,对海冰密集度的影响很小。

3.3 海冰密集度与中云的相关性

中云的高度介于低云与高云之间。中云的来源比较复杂,低云垂直对流上升可以转化为中云,高云下沉可以转化为中云,邻近区域中云的平流输入也是重要来源。在北极中央区,4月和5月的海冰密集度与低云有很好的负相关,但图5表明,海冰密集度与中云之间并没有表现出较好的相关性。

10月,除了在1998、2000、2004、2008年的小部分时间以及1996年、2010年,海冰密集度与中云表现为较好的负相关性。同样,在11月除了在2000、2004年的小部分时间以及1994、1996、2010年,海冰密集度与中云表现为较好的负相关性(图5)。10月和11月的负相关特性与低云的情形相似,即海冰密集度越低,云量越高。因而,在秋季,北极中央区的中云来自于低云的对流上升或抬升。

北极地区大气普遍存在着逆温层。逆温层限制了垂向混合,增加了大气稳定性,在很大程度上限制了低云的对流上升过程,而逆温层主要发生在1 km高度以下,2~3 km以上的大气稳定性并不是很强,并且随着季节并不会发生太大变化^[23—25]。Schweiger等^[8]将秋季海冰与中云的负相关关系归因于近地表温度增加造成的大气静力稳定度降低,进一步导致低云经垂直对流转化成为中云,而1997—1998年的SHEBA(Surface Heat Budget of the Arctic Ocean Experiment)计划实测数据分析结果表明,秋冬季节的逆温层强度要强于春夏季节^[26],仅仅依据逆温层强度无法解释春季海冰密集度与中云相关性差。

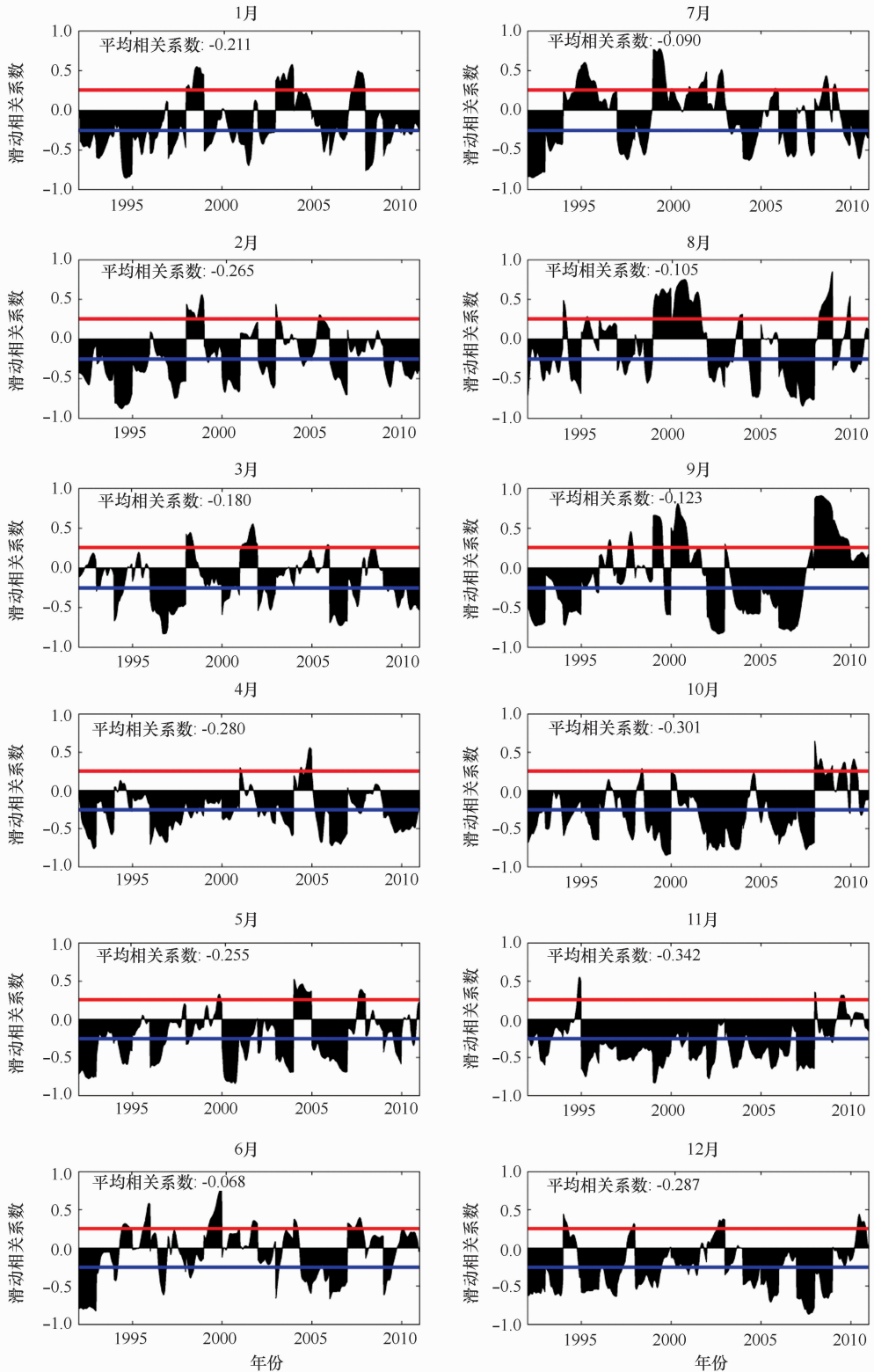


图 3 海冰密集度与低云的滑动相关图

Fig. 3 Running correlation between sea ice concentration and low cloud

图中的红线以及蓝线表示 95%置信度检验线,由于滑动窗口为 2 个月(61 天),95%置信度检验的相关系数值为 ± 0.254

The red line and blue line indicate the lines of 95% confidence level, a 2-month(61-day) window is adopted, the critical value of the correlation coefficient for a 95% confidence level is ± 0.254

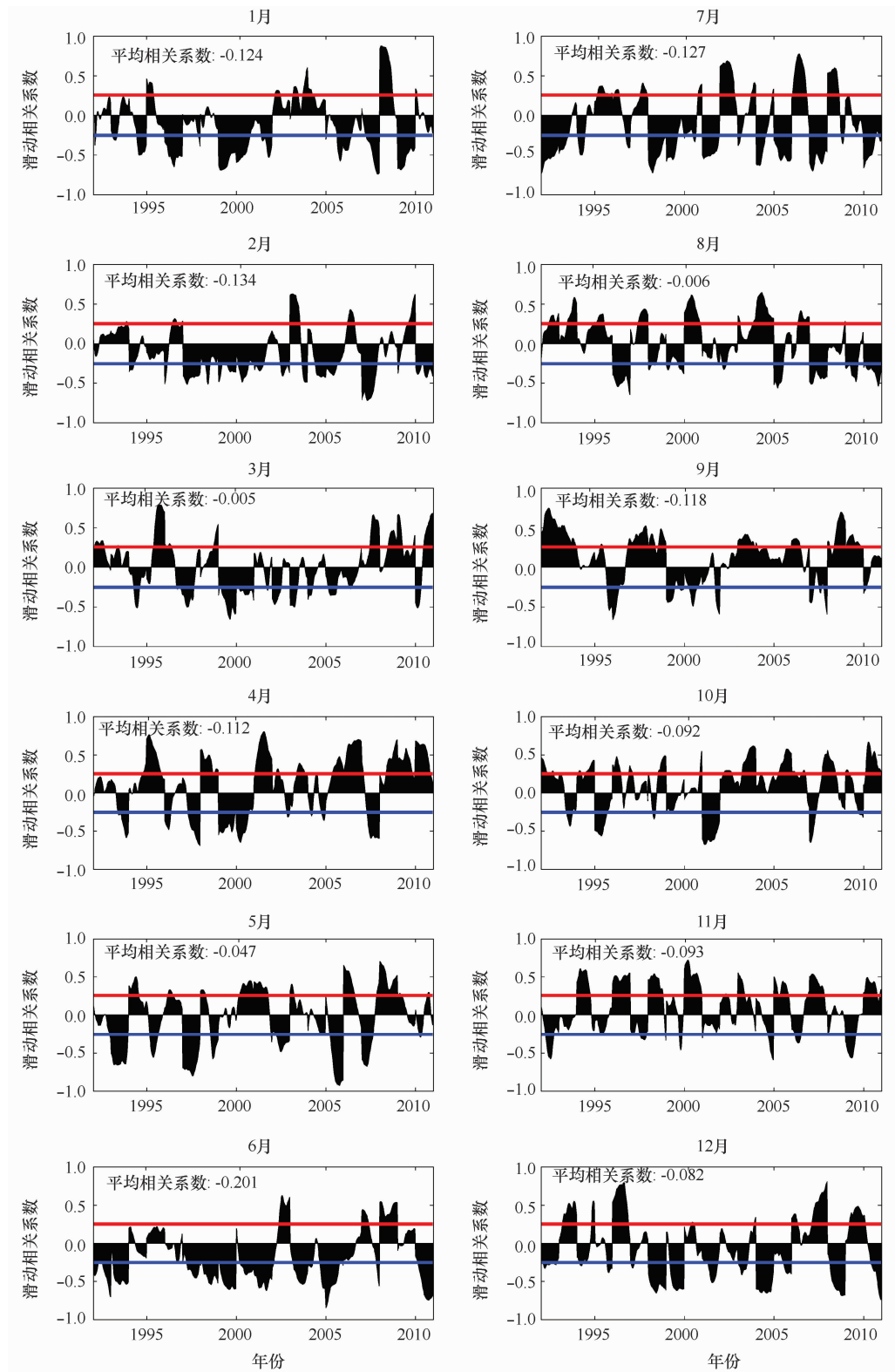


图 4 海冰密集度与高云的滑动相关图

Fig. 4 Running correlation between sea ice concentration and high cloud

图中的红线以及蓝线表示 95%置信度检验线,由于滑动窗口为 2 个月(61 天),95%置信度检验的相关系数值为 ± 0.254

The red line and blue line indicate the lines of 95% confidence level, a 2-month(61-day) window is adopted, the critical value of the correlation coefficient for a 95% confidence level is ± 0.254

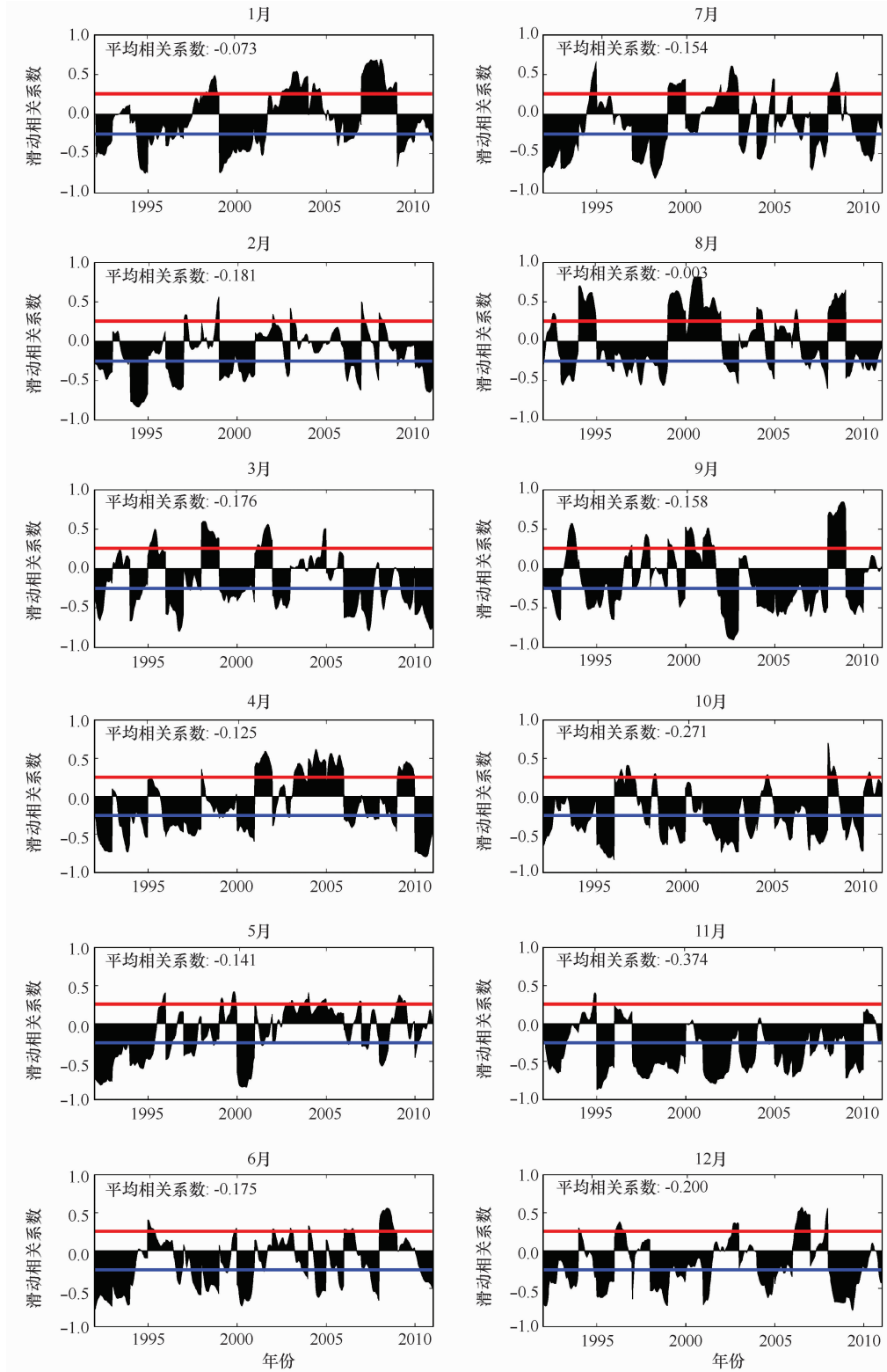


图 5 海冰密集度与中云的滑动相关图

Fig. 5 Running correlation between sea ice concentration and medium cloud

图中的红线以及蓝线表示 95%置信度检验线,由于滑动窗口为 2 个月(61 天),95%置信度检验的相关系数值为 ± 0.254

The red line and blue line indicate the lines of 95% confidence level, a 2-month(61-day) window is adopted, the critical value of the correlation coefficient for a 95% confidence level is ± 0.254

我们认为,低云是否抬升与逆温层的结构有关。春夏以悬浮逆温层为主,在低云的范围内存在很强的静力稳定度,不容易抬升到中云的高度,这是4、5月份的中云与海冰密集度相关性差的原因。秋冬季节以近地表逆温层为主,低云通常发生在逆温层之外,比较容易抬升^[23-25]。此外,风会破坏逆温层、降低大气稳定度,而北极秋季平均风速要比春季大,所以北

极低云的垂直对流上升过程在秋季要强于春季^[23]。

为进一步明确北极中央区中云的来源及季节差异,我们分别对北极中央区的中云与低云,中云与高云以及中央区的中云与大西洋扇区和太平洋扇区的中云进行滑动相关分析($n=30$),得到的平均相关系数如表1所示。

表1 各区域云量与北极中央区中云的平均相关系数

Tab. 1 The average correlation coefficients between each regional cloud amount and the central Arctic medium cloud

季节	春季			夏季			秋季			冬季		
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
北极中央区低云	0.662	0.581	0.546	0.547	0.617	0.611	0.630	0.620	0.665	0.595	0.521	0.559
北极中央区高云	0.098	0.271	0.161	0.402	0.344	0.215	0.128	0.125	0.002	0.008	0.085	-0.003
大西洋扇区中云	0.189	0.360	0.167	0.107	0.127	0.143	0.063	0.102	0.154	0.084	0.110	0.075
太平洋扇区中云	0.361	0.277	0.227	0.286	0.251	0.121	0.097	0.055	0.170	0.221	0.297	0.377

从表1中可以看出,北极中央区的中云与低云有非常好的相关性。北极中央区的中云与高云相关性很差,表明中云不是高云下沉的结果。同样,北极中央区的中云与太平洋扇区和大西洋扇区的中云没有显著的相关性,并非是水平运输的结果。因此,北极中央区的中云主要是北极中央区的低云经对流上升转化而来的,并且秋季要强于春季。这也解释了北极中央区的中云与海冰密集度只有在秋季的10月和11月表现出较好的负相关关系,与低云具有相似的性质,而在春季没有。

3.4 个别年份相关性差异的原因分析

从滑动相关曲线可以看出,海冰密集度与云量的滑动相关系数很好地体现了云与海冰之间的相关性,基本可以确定相关性较好的云类和月份。例如:低云在4、5、10、11月与海冰的滑动相关最好,反映了云与冰之间的密切物理联系。

然而,在相关性较好的时期也有相关度很差的时间段,包括:在1994、2001、2004、2008年的4月份;在1995、1997、1999、2004、2007、2008、2010年的5月份;在1996、1998、2000、2004、2008、2009、2010年的10月份;在1994、2008、2009、2010年的11月份。我们很希望知道,在这些年份究竟发生了什么而导致二者的相关性降低。只有找出了相关性差的原因,才能真正认识云量与海冰密集度的关系。

如前所述,在相关性较好的年份,海冰密集度与云量呈现较高的负相关。从系统的角度看,北极中央区更像一个封闭系统,海冰与低云云量的相关性表现为系统内部的耦合变化,即:海冰密集度降低,云量增大。某些年份两者相关性降低,甚至呈现正相关,表明系统的封闭性变差,在风或流的作用下北极中央区云或者海冰与邻近区域发生了交换。与邻近区域的交换有3种类型,云交换、海冰交换、海冰和云同时交换。

为了深入探究4、5、10、11月相关性较差的年份中,北极中央区究竟与哪一邻近区域发生了海冰和云的输入输出交换,我们将北极中央区以南 5° 的范围划分了7个环区,各个环区以所对应的边缘海命名,如图6所示。

另外,如果北极中央区与某一环区发生了海冰(或云)的交换,那么这两个区域之间的海冰密集度(或云量)有可能呈反向变化,相关性表现为负相关,因此我们计算了北极中央区与各个环区之间海冰密集度(或云量)的滑动相关系数(滑动窗口为2个月),并且给出了两个区域之间的海冰密集度(或云量)变化趋势,从而探究了4、5、10、11月相关性较差的年份中,北极中央区究竟与哪一环区发生了海冰和云的交换。在此以2009年(图7)和2010年(图8)的11月份为例说明。

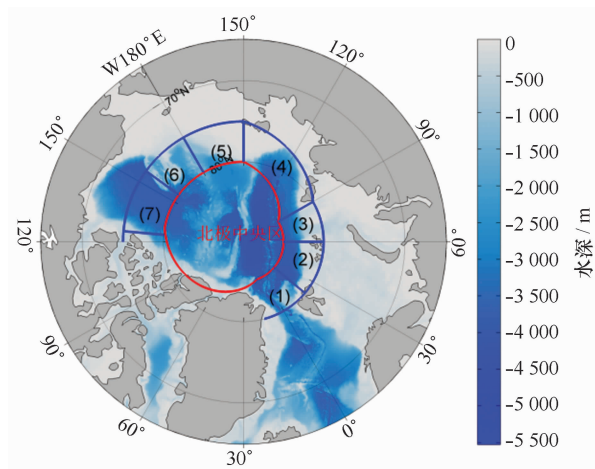


图6 北极地区细化分区图

Fig. 6 Detailed regional divisions of Arctic region

(1)格陵兰海环区,(2)巴伦支海环区,(3)喀拉海环区,(4)拉普捷夫海环区,(5)东西伯利亚海环区,(6)楚科奇海环区,(7)波弗特海环区

(1)Greenland Sea region,(2)Barents Sea region,(3)Kara Sea region,(4)Laptev Sea region,(5)East Siberian Sea region,(6)Chukchi Sea region,(7)Beaufort Sea region

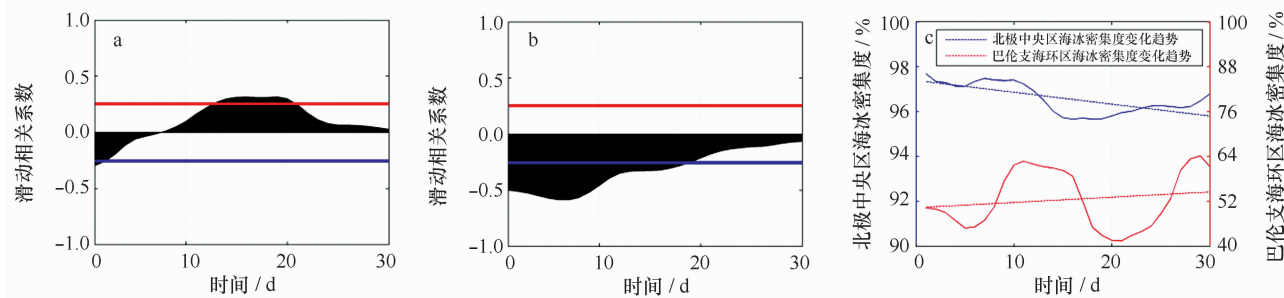


图7 2009年11月北极中央区与巴伦支海环区之间海冰交换分析图

Fig. 7 Sea ice exchange between the central Arctic and Barents Sea region during November 2009

a. 2009年11月北极中央区海冰密集度与低云量滑动相关图;b. 2009年11月北极中央区与巴伦支海环区海冰密集度滑动相关图;

c. 2009年11月份北极中央区与巴伦支海环区海冰密集度变化趋势对比图

a. Running correlation between sea ice concentration and low cloud amount in the central Arctic during November 2009;b. running correlation of sea ice concentration between the central Arctic and Barents Sea region during November 2009;c. comparison of sea ice concentration variation trend between the central Arctic and Barents Sea region during November 2009

由图7可见,2009年11月北极中央区与巴伦支海环区的海冰密集度呈负相关,由两个区域之间海冰密集度变化趋势的对比看出,两个区域的海冰密集度发生了反向变化,表明两个区域可能发生了海冰交换。图8表明,2010年11月份,与北极中央区进行交换的区域是拉普捷夫海,交换类型是云交换。需要说明的是:第一,北极中央区与相邻区域的反向变化仅仅是可能发生交换的条件,其他非交换因素也可以导致反向变化;第二,如果发生交换导致二者反向变化可以用这种方法加以判别,有些情况下发生交换却不能产生反向变化,用这种方法就无法判别。虽然这

种方法具有这些局限性,但其结果为我们理解云量与海冰密集度的相关性提供了方法。

使用该方法对所有相关性差的时间段进行分析,汇总结果如表2所示。

由表2~5可以看出,4月份,全部是海冰交换,5、10、11月份,海冰交换和云交换都有,整体上以海冰交换为主,未见同一环区发生海冰和云同时交换的情况。与北极中央区发生交换的区域以格陵兰海环区和东西伯利亚海环区为主。此外,2007和2008年的5月份、2008年的10月份以及1994年的11月份,这4个时段较差的相关性无法用北极中央区与环区之

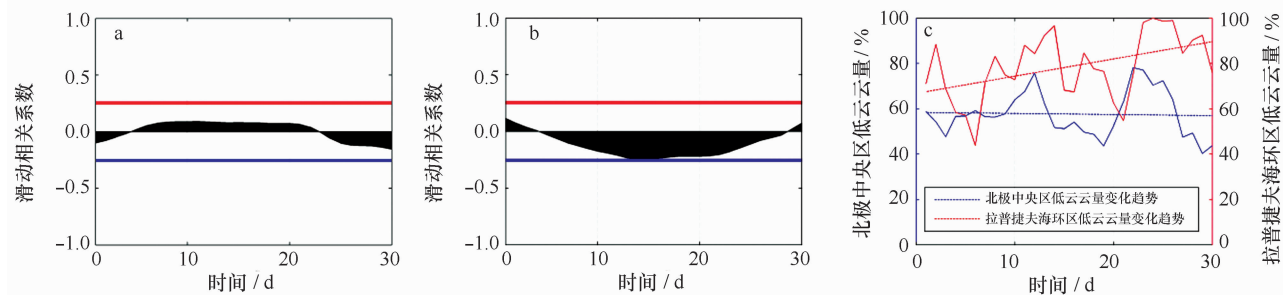


图 8 2010 年 11 月北极中央区与拉普捷夫海环区之间低云交换分析图

Fig. 8 Low cloud exchange between the central Arctic and Barents Sea region during November 2010

a. 2010 年 11 月北极中央区海冰密集度与低云云量滑动相关图; b. 2010 年 11 月北极中央区与拉普捷夫海环区低云云量滑动相关图; c. 2010 年 11 月北极中央区与拉普捷夫海环区低云云量变化趋势对比图

a. Running correlation between sea ice concentration and low cloud amount in the central Arctic during November 2010; b. running correlation of low cloud amount between the central Arctic and Laptev Sea region during November 2010; c. comparison of low cloud amount variation trend between the central Arctic and Laptev Sea region during November 2010

间发生海冰交换或云交换进行解释。我们的研究结果表明,低云与海冰密集度相关性较差的时段中,有 81.8%的时段可以用北极中央区与环区之间发生海

冰交换或云交换进行解释,表明在风或流的作用下北极中央区与邻近区域之间云及海冰的输入输出交换是最主要的原因。

表 2 4 月份与北极中央区进行海冰和云交换的各环区汇总表

Tab. 2 The summary of each region with which the central Arctic has sea ice and cloud exchange during April

年份	交换的区域	交换类型
1994 年	东西伯利亚海环区	海冰交换
2001 年	楚科奇海环区	海冰交换
2004 年	东西伯利亚海环区	海冰交换
2008 年	格陵兰海环区	海冰交换

表 3 5 月份与北极中央区进行海冰和云交换的各环区汇总表

Tab. 3 The summary of each region with which the central Arctic has sea ice and cloud exchange during May

年份	交换的区域	交换类型
1995 年	拉普捷夫海环区	海冰交换
	东西伯利亚海环区	云交换
	楚科奇海环区	云交换
1997 年	巴伦支海环区	海冰交换
1999 年	格陵兰海环区	海冰交换
2004 年	格陵兰海环区	云交换
2007 年	—	—
2008 年	—	—
2010 年	巴伦支海环区	云交换
	东西伯利亚海环区	海冰交换

表 4 10 月份与北极中央区进行海冰和云交换的各环区汇总表

Tab. 4 The summary of each region with which the central Arctic has sea ice and cloud exchange during October

年份	交换的区域	交换类型
1996 年	巴伦支海环区	海冰交换
1998 年	格陵兰海环区	云交换
2000 年	楚科奇海环区	海冰交换
2004 年	巴伦支海环区、拉普捷夫海环区	云交换
2008 年	—	—
2009 年	格陵兰海环区、喀拉海环区、拉普捷夫海环区	海冰交换
2010 年	格陵兰海环区	云交换

表 5 11 月份与北极中央区进行海冰和云交换的各环区汇总表

Tab. 5 The summary of each region with which the central Arctic has sea ice and cloud exchange during November

年份	交换的区域	交换类型
1994 年	—	—
2008 年	喀拉海环区、拉普捷夫海环区、东西伯利亚海环区、楚科奇海环区、波弗特海环区	海冰交换
2009 年	巴伦支海环区、喀拉海环区、东西伯利亚海环区、楚科奇海环区	海冰交换
2010 年	拉普捷夫海环区	云交换

4 结果与讨论

本文将北极中央区的海冰密集度和低云、中云和高云云量作整体平均,得到二者的时间序列。为了体现二者相关程度的变化,我们计算了滑动相关系数。滑动相关的主要价值是能够体现那些有时相关好,有时相关不好的现象。由于海冰的密集度不仅取决于云,还与多种因素有关,因此,预期海冰密集度与云量的相关系数不会很高。但是,本文的结果表明,海冰密集度与云量之间还是有比较显著的联系。

结果表明,春季 4、5 月份海冰密集度与低云相关度很高,主要是春季冰间水道强烈的蒸发形成低云;由于春季低云的垂直对流上升过程较弱,海冰密集度对中云的贡献不大。秋季 10 月和 11 月海冰密集度与低云有很高的相关度,也是由于气温逐渐降低过程中冰间水道的强烈蒸发形成低云。与春季不同的是,10 月和 11 月的海冰密集度与中云也有很高的相关度,意味着秋季的对流上升过程强烈,低云可以上升到中云的高度。冬季海冰密集度接近 1,与云的相关性应该较差。而夏季虽然蒸发强烈,但是饱和水汽压高,难以形成低云,此外,海冰密集度时间变化率较大,会将它与云量可能存在的关联信号掩盖。春季和秋季的相关性主要体现了海冰对云形成的影响。而高云对海冰密集度的影响从二者的相关度来看并不

明显,表明海冰的空间分布不会影响高云,高云主要体现为对海冰厚度变化的影响,而不是影响海冰密集度的变化。

在海冰密集度与低云有较好相关性的 4、5、10、11 月份中,某些年份出现相关性不好的情况。我们对此进行了详细的分析。在正常情况下,北极中央区在大多数年份体现为相对封闭的特性,海冰密集度与低云呈现较好的负相关。而在某些相关性较差或呈正相关的年份,北极中央区与周边的环区进行了海冰或云的交换,交换的区域主要以格陵兰海环区以及东西伯利亚海环区为主。北极中央区与周边海域发生冰或云的交换可以对 81.8% 的情形进行解释,表明北极中央区之外的海冰和低云会通过海流和风场与北极中央区进行交换。

我们认为,北极中央区海冰与云的关系有两种。一种是云削弱了太阳辐射,减缓了海冰的融化;另一种是海冰减少,蒸发增大,形成低云。如果云是冰间水道产生的,海冰密集度与云量之间应该是负相关,即海冰密集度越低云量应该越大;如果是云影响了海冰,二者应该是正相关,即云量越大,海冰密集度应该越高。在我们的研究结果中,海冰密集度与云量之间没有出现显著的正相关,表明在北极中央区,云虽然改变了太阳辐射,但海冰的变化主要体现在海冰融化加剧导致的厚度的变化,海冰密集度与云量联系不

大。而在海冰开裂、密集度减少的春季和秋季,由于海洋蒸发强烈,容易形成低云,因此,海冰密集度与低云有密切的关系。夏季的情况不同,夏季虽然海冰密

集度最低,但由于夏季海面气温高,饱和水汽压高,不利于低云形成,并且海冰密集度的时间变化率较大,所以海冰密集度与低云相关性差。

参考文献:

- [1] Morison J H, McPhee M G, Curtin T B, et al. The oceanography of winter leads[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978—2012), 1992, 97(C7): 11199—11218.
- [2] Alam A, Curry J. Lead-induced atmospheric circulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978—2012), 1995, 100(C3): 4643—4651.
- [3] 张树刚. 夏季北冰洋海冰融化过程中能量分配的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Zhang Shugang. Study on the distribution of solar energy in marginal ice zone during ice melting season[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [4] Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): L01703.
- [5] Zhang J, Lindsay R, Schweiger A, et al. The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(4): 720—726.
- [6] Gorodetskaya I V, Tremblay L. Arctic cloud properties and radiative forcing from observations and their role in sea ice decline predicted by the NCAR CCSM3 model during the 21st century[J]. *Arctic Sea Ice Decline: Observations, Projections, Mechanisms, and Implications*, 2008, 180: 47—62.
- [7] 赵进平, 李涛, 张树刚, 等. 北冰洋中央密集冰区海冰对太阳短波辐射能吸收的观测研究[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(1): 33—41.
Zhao Jinping, Li Tao, Zhang Shugang, et al. The shortwave solar radiation energy absorbed by packed sea ice in the central Arctic[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(1): 33—41.
- [8] Schweiger A J, Lindsay R W, Vavrus S, et al. Relationships between Arctic sea ice and clouds during autumn[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(18): 4799—4810.
- [9] Liu Y, Key J R, Liu Z, et al. A cloudier Arctic expected with diminishing sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(5): L05705.
- [10] Schweiger A J. Changes in seasonal cloud cover over the Arctic seas from satellite and surface observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(12): L12207.
- [11] Francis J A, Hunter E. New insight into the disappearing Arctic sea ice[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2006, 87(46): 509—511.
- [12] Herman G, Goody R. Formation and persistence of summertime Arctic stratus clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1976, 33(8): 1537—1553.
- [13] Kay J E, Gettelman A. Cloud influence on and response to seasonal Arctic sea ice loss[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 2009, 114(D18): D18204.
- [14] Kay J E, L'Ecuyer T, Gettelman A, et al. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8): L08503.
- [15] Paluch I R, Lenschow D H, Wang Q. Arctic boundary layer in the fall season over open and frozen sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 1997, 102(D22): 25955—25971.
- [16] Eastman R. Interannual variations of Arctic cloud types in relation to sea ice[D]. Seattle: University of Washington, 2009.
- [17] Beesley J A. Estimating the effect of clouds on the arctic surface energy budget[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 2000, 105(D8): 10103—10117.
- [18] Vavrus S, Holland M M, Bailey D A. Changes in Arctic clouds during intervals of rapid sea ice loss[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(7/8): 1475—1489.
- [19] Koenigk T, Brodeau L, Graverson R G, et al. Arctic climate change in 21st century CMIP5 simulations with EC—Earth[J]. *Climate dynamics*, 2013, 40(11/12): 2719—2743.
- [20] Zhao J, Cao Y, Shi J. Core region of Arctic Oscillation and the main atmospheric events impact on the Arctic[J]. *Geophysical research letters*, 2006, 33(22): L22708.
- [21] Perovich D K, Light B, Eicken H, et al. Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979—2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): L19505.
- [22] Wu D L, Lee J N. Arctic low cloud changes as observed by MISR and CALIOP: Implication for the enhanced autumnal warming and sea ice loss[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 2012, 117(D7): D07107.
- [23] Serreze M C, Barrett A P, Stroeve J C, et al. The emergence of surface-based Arctic amplification[J]. *The Cryosphere*, 2009, 3(1): 11—19.
- [24] Pavelsky T M, Boé J, Hall A, et al. Atmospheric inversion strength over polar oceans in winter regulated by sea ice[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(5/6): 945—955.

- [25] 程刚,高志球,郑友飞,等. 北极低空急流和低层逆温特征观测分析[J]. 气候与环境研究,2013,18(1): 23-31.
Cheng Gang,Gao Zhiqiu,Zheng Youfei, et al. A study on low-level jets and temperature inversion over the Arctic ocean by using SHEBA data[J]. Climatic and Environmental Research,2013,18(1): 23-31.
- [26] Tjernström M,Graversen R G. The vertical structure of the lower Arctic troposphere analysed from observations and the ERA-40 reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2009,135(639): 431-443.

Analysis of correlation between sea ice concentration and cloudiness in the central Arctic

Ji Xupeng¹, Zhao Jinping¹

(1. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Correlation between sea ice concentration and cloudiness in the central Arctic is studied. The running correlation coefficients of daily sea ice concentration averaged for whole central Arctic with the daily averaged low cloud, medium cloud and high cloud are calculated. During the melting period in spring (April and May) and the freezing period in autumn (October and November), sea ice concentration and low cloud present significant negative correlation. This could be explained that the low clouds were formed by strong evaporation from the open water in gaps of sea ice during these periods. In the same period, sea ice concentration is negatively correlated with medium cloud only during the freezing period in autumn, which suggests that in autumn the low cloud could upwell to form medium cloud, but in spring the upwell is much weak because of its stable stratification. There is no a significant correlation between sea ice concentration and high cloud, which is speculated that sea ice can't influence the high cloud and the high cloud is not formed by local evaporation and the influence of high cloud on sea ice is not ice concentration, but is ice thickness. In the periods of significant correlation between ice concentration and low cloud, there still exist some occasional inconsistent between them. The exchanges of sea ice or cloud between the central Arctic and adjacent regions is suggested to cause the inconsistent.

Key words: central Arctic Ocean; sea ice concentration; cloudiness; running correlation