

郝光华, 苏洁, 黄菲. 北极冬季季节性海冰双模态特征分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(11): 11—22, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.002

Hao Guanghua, Su Jie, Huang Fei. Analysis of the dual-mode feature of Arctic seasonal sea ice[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(11): 11—22, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.002

北极冬季季节性海冰双模态特征分析

郝光华¹, 苏洁^{1*}, 黄菲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: 近年来北极海冰快速变化, 北极中央区边缘正由以多年冰为主转为季节性海冰为主。通过对北极冬季季节性海冰的 EOF 分解发现, 2002—2012 年期间北极季节性海冰变化的前两模态主要体现为 2005 年和 2007 年的季节性海冰距平。其中第二模态主要体现了北极海冰在 2005 年的一种极端变化, 而第一模态不仅体现了北极海冰在 2007 年的变化, 还体现了北极季节性海冰的从负位相到正位相的转变。通过比较发现, 在研究时段北极季节性海冰最主要的变化发生在北极太平洋扇区, 在 2007 年, 冬季季节性海冰距平发生位相转变, 2007—2010 年一直维持正位相, 北极太平洋扇区冬季季节性海冰保持显著正距平。太平洋扇区表面温度最大异常也发生在 2007 年, 从大气环流来看, 2007 年之后波弗特海区异常高压有利于夏季太平洋扇区海冰的减少, 而西风急流的减弱有利于夏季波弗特海区异常高压的维持, 结合夏季海冰速度, 顺时针的冰速分布有利于海冰离开太平洋扇区, 因而会导致冬季太平洋扇区季节性海冰转为正距平并且从 2007 年一直维持到 2010 年。

关键词: 北极; 季节性海冰; 海冰密集度; 双模态特征

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)11-0011-12

1 引言

季节性海冰主要存在于冬季和夏季海冰外缘线之间, 具有明显的季节变化, 季节性海冰冬季覆盖范围较大, 春季开始融化, 夏季基本会被融化掉, 没有融化掉的部分就是多年冰。研究表明, 随着气候变暖, 近 10 年北极多年冰面积减少比总体海冰面积减少的更为显著^[1-2], 具有多年冰转变为一年冰的趋势^[3-4], 在这种情况下, 北极海冰的特征发生了较大的变化, 即多年冰减少, 季节性海冰增多, 季节性海冰的年际变化具有增大的趋势。

近 10 年以来, 伴随着北极海冰的快速减少, 北极多年冰发生了急剧的减少^[5], 2007 年多年冰范围只有 1979—2007 年平均范围的 40%^[6-7], 北极海冰的减少, 尤其是多年冰的减少, 是全球变暖大趋势下热力作用和动力作用共同的结果, 北极多年冰的减少是长期累积的结果^[8-9], 由于缺少连续异常冷的环境, 多年冰难以恢复到 20 世纪 80 年代的水平^[6], 多年冰的减少导致北极海冰整体冰厚变薄, 最新的研究表明, 2007 年北极中央区出现开阔水区域, 对于太阳辐射的吸收产生了重要的影响^[6]。北极中央区的海冰厚度从 1980 年的 3.64 m 下降到了 2008 年的 1.89 m, 下降

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-06-06。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)全球变化研究重大科学研究计划项目(2015CB953900, 2013CBA01800); 国家自然科学基金委员会重点基金项目(41330960)。

作者简介: 郝光华(1988—), 男, 山西省长治市人, 博士研究生, 从事海洋—大气相互作用研究。

* 通信作者: 苏洁(1966—), 女, 山东省青岛市人。E-mail: sujie@ouc.edu.cn

了近 48%^[10],而且季节性海冰的厚度也在减小;海冰对于风和气温的响应更敏感,容易出现快速的响应,导致海冰的急剧减少^[11],使得北极海冰通过弗拉姆海峡向外的输送增加,观测表明,从弗拉姆海峡输出的海冰面积在 2007—2008 冬季增加了 37%^[12];同时,由于开阔水比例的增加而引发的正反馈机制加速了北极海冰的减少。北极多年冰在过去的 30 年减少的速度要快于北极海冰减少的速度^[2,13-14],最终的结果就是北极季节性海冰范围的增加^[4],使得北极中央区海冰开始变为季节性海冰,尤其是在中央区边缘,北极正在由多年冰为主向季节性海冰覆盖转变^[3]。

目前,季节性海冰的范围越来越大,尤其是在北冰洋太平洋扇区一侧更为明显。继 2007 年和 2012 年北极海冰两次达到历史最小范围之后,北极海冰夏季融化的范围已经影响到了北极中央区,这里过去是北极多年冰分布的主要区域。柯长青等^[15]指出,北极多年冰减少的区域就是北极季节性海冰增加的区域。季节性海冰的范围越来越大,北极夏季开阔水的范围也就越来越大,吸收更多的太阳辐射。自 1995 年以来,北极海冰开始融化的时间为负距平,而开始冻结的时间为正距平,说明伴随着北极海冰的减少,北极海冰开始融化的时间在不断的提前,而开始冻结的时间在推迟,这也导致了北极海冰融冰期的延长,加速了海冰的减少^[16-17]。1979—2006 年,北极季节性冰区的平均无冰季节长度以每年 1.1 d 的速度增长,而到 2007 年平均无冰季节长度达到了 168 d^[18]。北极海冰融化季节时间长度的增加,伴随着北极海冰融化的增多。近年来,随着北极海冰的减少,夏季北极海冰的范围不断向北极中央区撤退,因而,在冬季的时候会有更多的季节性海冰生成,意味着北极多年冰的减少,因而研究北极季节性海冰的变化对于理解北极海冰的变化有重要意义。

2 数据

本文研究主要采用的数据为基于动态系点值 ASI 算法^[19]使用 AMSR-E 数据反演得到的海冰密集度,空间分辨率为 6.25 km×6.25 km。为分析季节性海冰与大气环流的关系,本文还选取了 2001—2011 年来自于 NCEP/NCAR 再分析月平均数据集,该资料是美国国家环境预测中心(National Center for Environmental Prediction)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research)合作进行全球数据同化得到。本文使用的资料包括海平面气

压场,表面气温场以及 500 hPa 位势高度场,水平分辨率为 2.5°×2.5°。

为研究冰速场变化对季节性海冰的影响,还采用了美国冰雪数据中心提供的月平均的冰速数据,该数据为分辨率 25 km×25 km 的等面积投影网格数据^[20]。该数据由多个卫星遥感数据同化得到,包括 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer),SMMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)以及 SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)和国际北极浮标计划(IABP)的实测数据。在月平均处理时,保证每个格点的数据不少于 20 d,进行了良好的质量控制。

3 季节性海冰双模态特征研究

海冰密集度的分类反演可以得到多年冰和一年冰密集度,通过海冰密集度分类反演得到季节性(一年冰)海冰密集度数据,是研究北极季节性海冰的最佳途径,而国际上目前尚无海冰分类密集度数据(一年冰和多年冰)发布。本文采用了基于动态系点值 ASI 算法反演的总体海冰密集度^[19],结合参考多年冰密集度^[21],得到北极季节性海冰密集度。其中,参考多年冰密集度的获取方式如下,首先分别选取每年海冰范围最小值当天的海冰密集度场为基础,并分别统计比较每个格点从前一年 9 月到当年 9 月每天的海冰密集度值,把每个格点在一年中出现过密集度为 0 的点密集度设为 0,而密集度不为 0 的点的海冰范围最小值当天的密集度就作为当年的参考多年冰密集度。我们首先利用总体海冰密集度分析近 10 年北极海冰的整体状况,继而在此背景下研究北极冬季季节性海冰的变化特征及其相应的大气环流的特征。

3.1 2002—2011 年北极海冰分布及变化

为了能够反映出北极海冰密集度的变率,本文计算了 2002—2011 年冬半年和夏半年海冰密集度距平场的均方根差(图 1)。均方根差的分布状态和平均海冰密集度的分布基本呈相反的状态,平均海冰密集度大的区域均方根差小,反之亦然。均方根差的分布具有明显的分界线,90%海冰密集度等值线包围的区域内,均方根差基本为 0,说明海冰密集度相对稳定,而变率最大的区域分布在北极边缘海,包括太平洋一侧的楚科奇海,白令海和鄂霍次克海以及大西洋一侧的拉布拉多海、戴维斯海峡、巴芬湾、丹麦海峡、格陵兰海以及巴伦支海。除了边缘海外,北极中央区边缘部分海冰密集度距平的均方根差在 20%左右。

均方根差大于30%的区域基本为季节性海冰覆盖,而且夏半年会比冬半年明显的向高纬度延伸,中央区域常年被海冰覆盖,中央区边缘冬季被海冰覆盖,夏季海冰不完全消失,决定于北极夏季海冰的融化程度。北极海冰密集度距平均方根差大的区域也就是北极海冰变化大的区域,因此,北极海冰变化最显著的地方在北极中央区边缘以及北极边缘海,比较稳定的是北极中央区海冰。在北冰洋同一纬度上的

海冰分布,靠近太平洋一侧的平均海冰密集度距平均的均方根差要明显大于靠近大西洋一侧,而且靠近太平洋一侧的区域是北极海冰变化的关键区域,存在着多年冰和季节性海冰之间的转变,因此本文将重点关注介于北极中央区 and 北极边缘海之间部分的海冰变化,这部分海冰正在由多年冰向季节性海冰转变,其在夏季的退缩是北极海冰变化的关键部分。

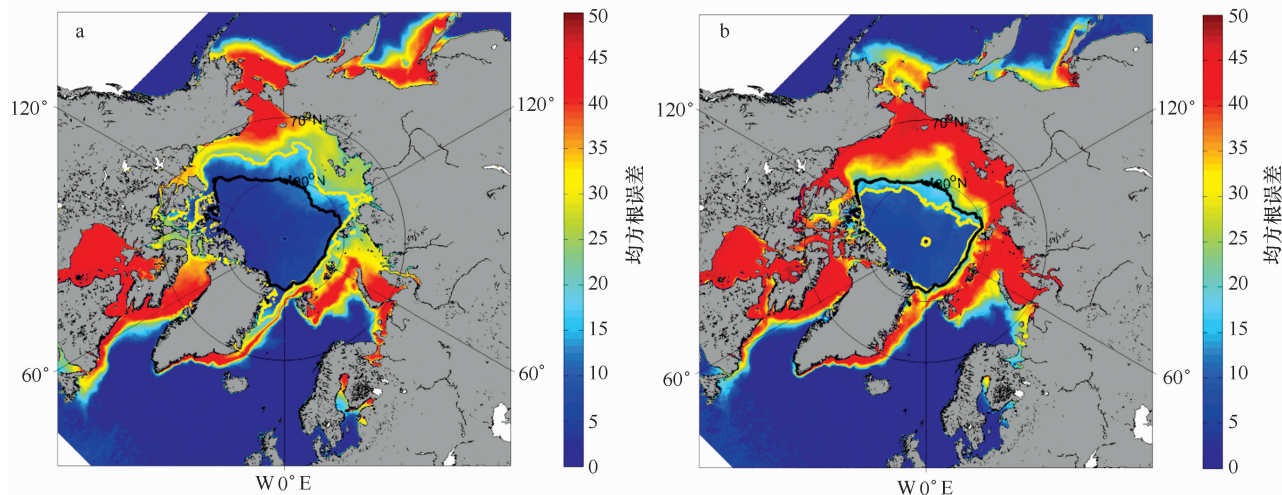


图1 2002—2011年冬半年(10月至翌年3月,a)和夏半年(4—9月,b)北极海冰密集度距平均的均方根误差

Fig. 1 The root mean square error of Arctic sea ice concentration anomaly during winter time (October to next March, a) and summer time (April to September, b) from 2002 to 2011

黑线为全年平均的90%海冰密集度等值线,黄线为冬半年或者夏半年平均的90%海冰密集度等值线

Black line is 90% of the annual average of sea ice concentration contour, yellow line is the winter time or summer time averaged 90% sea ice concentration contour

3.2 2002—2011年北极季节性海冰的年际变化

基于动态系数点值ASI算法^[19]反演得到的2002—2011年北极海冰密集度数据,结合3.1节提到的参考多年冰^[21]作为标准,得到北极季节性海冰的海冰密集度。具体做法为每年3月及之前逐日海冰密集度减去上一年的参考多年冰密集度,9月之后的逐日海冰密集度减去当年的参考多年冰密集度。将每年10月到翌年3月的逐日海冰密集度和参考多年冰密集度之差进行时间平均,作为本文的季节性海冰密集度,用来研究北极冬季季节性海冰的年际变化。

伴随着北极夏季海冰的减少,北极多年冰也在减少,而季节性海冰在增多。2005年冬季季节性海冰在波弗特海一侧偏少,而在东西伯利亚海和拉夫捷夫海一侧偏多,而2007年,冬季季节性海冰主要分布在东西伯利亚海和拉夫捷夫海,并且延伸至北极中央

区。图2显示了北极季节性海冰距平的空间分布。在2006年之前(2005年除外),冬季季节性海冰基本以负距平为主,在巴伦支海和波弗特海有正距平分布。2005年在拉夫捷夫海、喀拉海和巴伦支海为强烈的正距平,而东西伯利亚海沿着中央区边缘一直到波弗特海都呈现为负距平。2007年北极季节性海冰距平的分布有重要的变化,2007年之后,北极季节性海冰明显增多,季节性海冰基本以正距平分布为主,2007年最为明显,尤其是北冰洋太平洋扇区一侧的季节性海冰明显的增加。

图3显示了2002—2011年逐日的北极冬季季节性海冰面积和范围距平的时间序列,季节性海冰面积和范围的距平变化很相似,由图可见,在2002年冬季,季节性海冰面积和范围均为正距平,而2003—2006年,季节性海冰面积和范围距平基本为负值,到

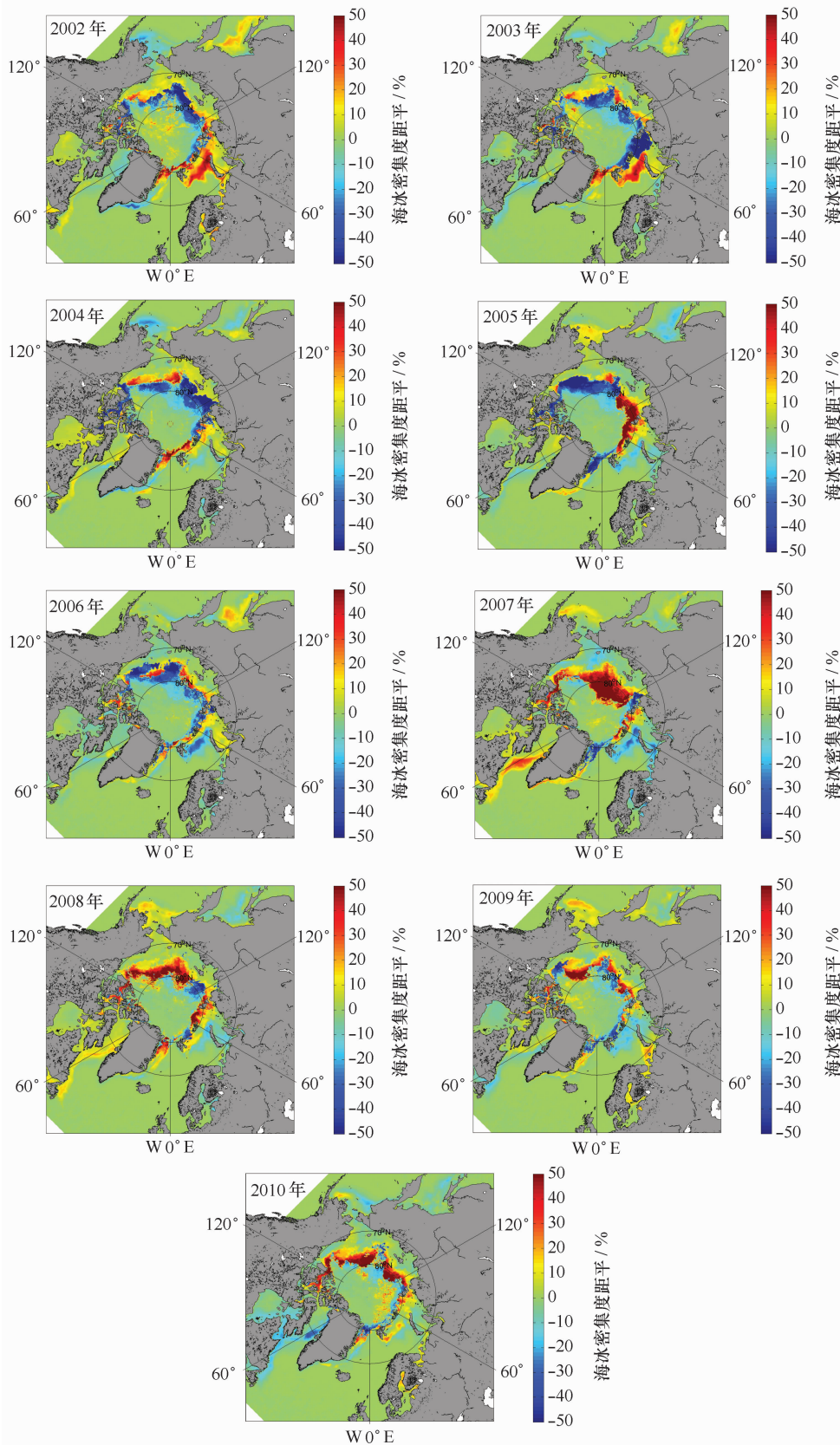


图2 2002—2010年北极冬季(10月至翌年3月)季节性海冰密集度距平场分布

Fig. 2 The seasonal sea ice concentration anomaly of the Arctic during winter time (October to next March) from 2002 to 2010

2007 和 2008 年冬季, 季节性海冰面积和范围的距平明显增大, 为这 10 年来最大的正距平, 之后的 2009 和 2010 年的正距平相比于 2008 和 2009 年有所减少。季节性海冰距平的变化和北极海冰的变化趋势是相一致的, 在 2002 年夏季, 北极海冰范围也是自 1978 年有观测以来的极小值^[22], 随之冬季的季节性海冰出现了正距平。从图 3 可以看出, 2007 年夏季北极海冰范围达到历史最小值, 因而冬季结冰期的时

候, 会生成更多的季节性海冰, 导致了 2007 年冬季季节性海冰面积和范围异常大的正距平, 一直持续到 2008 年。2009 年之后的夏季北极海冰最小范围相比于 2007 年有了回升, 但是冬季季节性海冰仍然是正距平, 整体来看, 2002—2010 年冬季北极季节性海冰面积和范围的变化基本分为 2002, 2003—2006 以及 2007—2010 年 3 个时间段距平正负交替的变化。

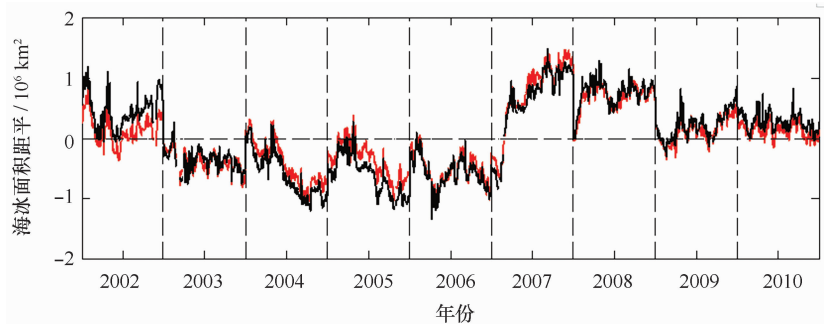


图 3 2002—2010 年冬季(10 月到翌年 3 月)北极季节性海冰面积和范围逐日距平场

Fig. 3 The daily seasonal sea ice area and extent anomaly during winter time (October to next March) during 2002—2010

红线为面积距平, 黑线为范围距平, 竖线表示次年 3 月冬季分隔线

The red line is for the area anomaly, the black line for the extent anomaly and the dotted line represents end of the following March

3.3 北极季节性海冰的双模态特征

为了能够得到冬季季节性海冰的分布, 首先要根据北极海冰的特殊季节性特点进行季节划分, 选取了 10 月至翌年 3 月作为北极冬季。对得到的冬季的季节性海冰密集度进行经验正交函数 EOF (Empirical Orthogonal Function) 分解, 得到其空间分布和时间系数, 其中前两模态的方差贡献为 46%。从图 4 可以看出, 第一模态和第二模态的空间分布都呈现带状分布, 第一模态展示了季节性海冰在太平洋扇区一侧和大西洋扇区一侧的不同变化, 第二模态展现了其变化振幅明显的区域既不是位于北冰洋中央区, 也不是位于均方根差大的区域, 而是位于北极中央区和边缘海之间的过渡区域以及格陵兰岛的东侧。从第一模态空间分布来看, 除了其正异常的分布, 在楚科奇海和欧亚海盆一侧还有负异常分布。第一模态时间系数基本呈现增大的趋势, 结合第一模态的空间分布和时间系数可以看出, 以 2007 年为分界线, 自 2007 年北极中央区季节性海冰开始增加, 说明边缘区附近的多年冰在融化季融化消失; 2007 年出现最大变化, 之前被多年冰覆盖的区域现在被季节性海冰所覆盖, 楚科奇海和欧亚海盆等边缘海为季节性海冰覆盖, 呈现明

显的负异常。结合图 2 可以看出, 在大西洋一侧, 略有减少的趋势, 但是相比于太平洋扇区一侧, 其变化并不明显。汪代维和杨修群指出, 冬季(2—4 月)北极海冰面积异常变化的关键区, 主要位于北大西洋一侧的格陵兰海、巴伦支海和戴维斯海峡以及北太平洋一侧的鄂霍次克海和白令海^[23]。在中央区边缘的正位相区域, 无论其为多年冰还是季节性海冰, 在冬季都会被海冰覆盖, 进一步说明了其正在由多年冰向季节性海冰覆盖转变。

从时间系数可以看出, 两个模态的峰值分别为 2005 和 2007 年, 而从空间分布可以看出, 第一模态和 2007 年海冰距平非常相似, 而第二模态与 2005 年冬季海冰距平分布相似, 而且从时间上看, 第二模态的峰值发生在 2005 年, 先于第一模态的峰值发生时间(2007 年), 这与图 2 给出的 2005 年以及 2007 年北极季节性海冰的距平变化相一致。图 5 显示了季节性海冰距平空间分布和 EOF 前两模态空间分布的相关关系, 相关关系最大的分别为 2007 年和 2005 年, 因而其 EOF 的前两模态表现出来的特征主要为 2005 年和 2007 年北极季节性海冰的距平特征, 说明 2005 和 2007 年在北极近 10 年海冰变化的重要性, 结合历

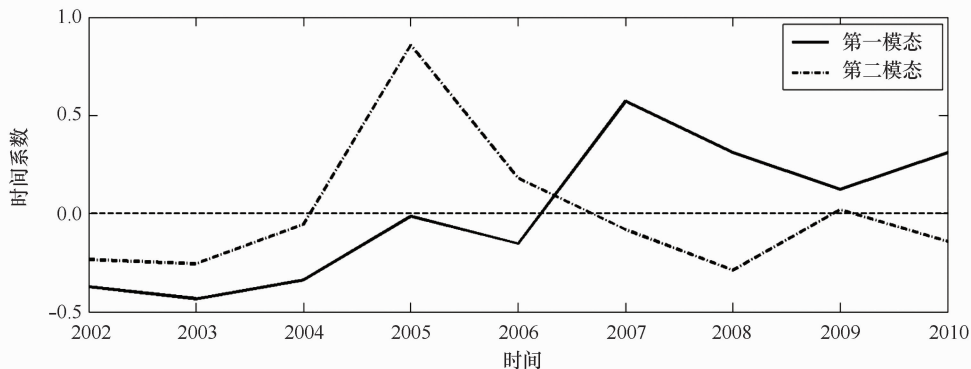
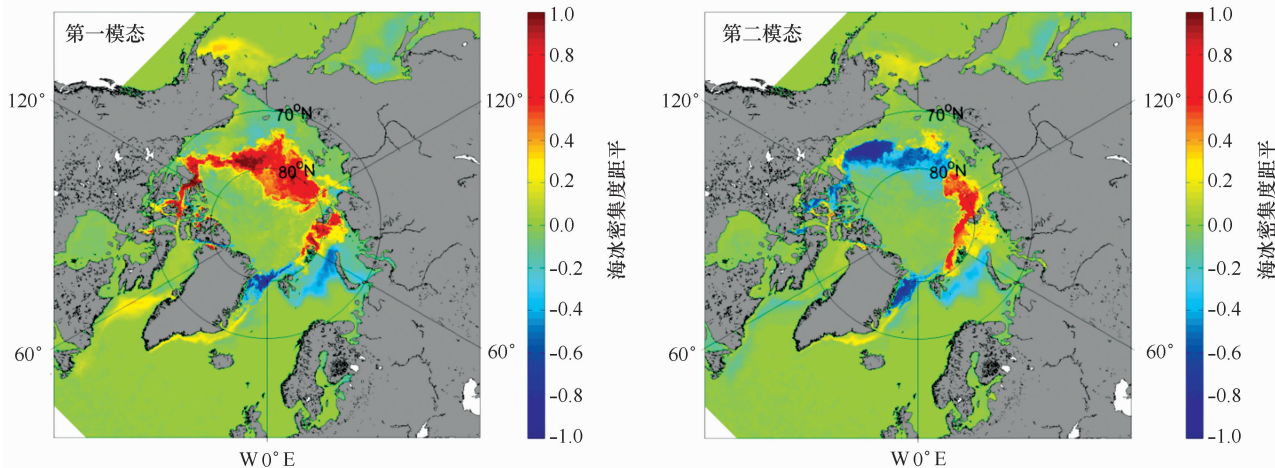


图 4 冬季季节性海冰密集度距平 EOF 前两模态空间分布(a,b)和时间系数(c)

Fig. 4 The first two EOF mode's spatial distribution (a,b) and time coefficient (c) of the seasonal sea ice concentration anomaly during winter time

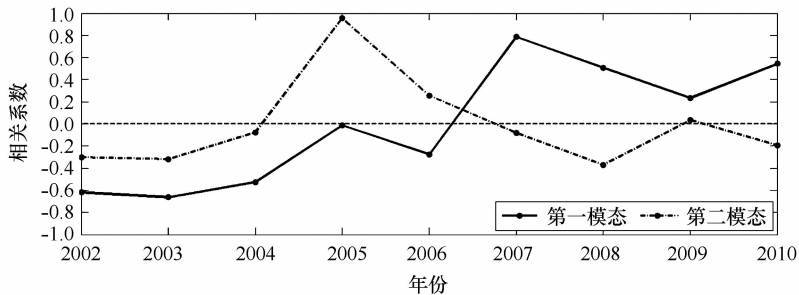


图 5 2002—2010 年北极冬季(10月至翌年 3 月)季节性海冰密集度距平场分别和 EOF 前两模态空间分布场的相关关系

Fig. 5 The spatial correlation of seasonal sea ice concentration anomaly of winter time (October to next March) with the first two EOF modes distribution from 2002 to 2010

史数据可知,2005 年曾是北极海冰范围历史最小值,而 2007 年是紧随之后的北极海冰范围历史最小值。分别以 2005 年和 2007 年为界,取其前后季节性海冰密集度平均的差值和 EOF 前两模态做空间相关,可以看出 2005 年前后之差和第二模态的相关系数为

0.34,2007 年前后之差和第一模态的相关系数为 0.94。可见,第二模态反映的是 2005 年北极季节性海冰变化的个例,而第一模态的变化不仅反映了 2007 年北极季节性海冰的变化,更反映了北极季节性海冰 2007 年前后的转型,而北极海冰在 2007 年急剧的减

少,使得北极海冰发生了不可逆转的变化^[6]。另外,从季节性海冰的距平分布看,北极季节性海冰的这种转变主要集中在太平洋扇区。由图 2 可知,太平洋扇区在 2007 年以负距平为主,而在 2007 年之后太平洋扇区基本以正距平为主。因而 EOF 第一模态反映了北极冬季季节性海冰的转型,尤其是在太平洋扇区,而第二模态可能反映了在这个转变的过程中的过渡形态,更多的是 2005 年北极海冰极端情况的一种体现。

4 季节性海冰双模态特征的大气环流背景分析

4.1 季节性海冰变化与表面气温和气压的关系

北极季节性海冰有明显的年际变化,融化季结束之后基本消失,在 3 月前后北极海冰范围达到最大的时候,季节性海冰也随之达到最大范围,春季之后北极海冰也是以季节性海冰最先开始融化的,并在夏季快速融化消失。表面温度是决定北极海冰状态的关键参数,同表面反照率一起,决定了大气和海洋之间的感热和潜热交换,而且还会影响北极海冰的范围和厚度^[4]。张璐等^[24]指出,采用气候态气温和逐日气温分别强迫同一模式,发现在积分 40 年之后海表面气温的变化对于海冰总体的变化贡献率超过 20%。Francis 和 Hunter 指出白令海和巴伦支海是影响冬季北极海冰最大范围的两个关键海区^[25];受到风和表面温度的影响,北极冬季海冰的减少主要是巴伦支海表面气温升高引起的,北极海冰减少还会造成中纬度冬季型天气系统北缩^[26]。

本文使用 NCEP/NCAR 的月平均的表面气温数据,选取了 20°N 以北的区域,研究时段为 2002—2011 年。分别以每年春季(4—6 月),夏季(7—9 月),秋季(10—12 月),冬季(1—3 月)和次年春季(4—6 月)表面气温与季节性海冰 EOF 分解时间系数进行回归。从春季一直到秋季,在北冰洋太平洋扇区一侧,第一模态时间系数和表面温度有很好的正相关性,而夏季和秋季相关性更高,是重点关注的季节,图 6a、b 给出了夏季和秋季表面气温与季节性海冰的相关场。可见,表面气温在夏季和秋季越高,冬季季节性海冰就会越多。在冬季和翌年春季,则与美国气温有很好的相关性(图略),第一模态可以看出,春、夏、秋季太平洋扇区气温都显著升高,美国冬季和翌年春季呈现西冷东暖的异常分布。季节性海冰第一模态时间系数与海表面气压场的回归(图 6c、d)可以看出,夏季和秋

季波弗特海受到波弗特高压的控制,而在西伯利亚上空有低压控制,在高压和低压之间的强南风,有利于低纬度热量的输送。结合表面气温和海表面气压来看,夏季波弗特高压和西伯利亚低压共同作用有利于南风从低纬度输送热量,也有利于海冰离开东西伯利亚海,Stroeve 等曾指出,这是 2007 年海冰突然减少的重要原因^[27]。同时,被穿极流卷携到达大西洋扇区一次,进一步从弗拉姆海峡输出,离开北冰洋,而且再加上较高的表面温度,两者结合,导致了第一模态在 2007 年夏季的最大位相,即 2007 年夏季海冰融化的多,因而冬季季节性海冰明显增多。可以看出,2002、2005 和 2007 年依此分别为北极海冰历史极小值年份,但是 2007 年对北极季节性海冰的影响远大于前两者,导致北极太平洋扇区季节性海冰由负距平转为正距平。

通过对季节性海冰的距平及其 EOF 分解发现,太平洋扇区的季节性海冰距平在 2007 年有明显的位相转换。本文计算了北冰洋太平洋扇区(70°~85°N, 120°W~120°E)冬季季节性海冰面积的距平(图 7)。在太平洋扇区,冬季季节性海冰在 2007 年出现最大正距平,而且在 2007—2010 年冬季,太平洋扇区一直维持季节性海冰的正距平。可见,2007 年北极海冰的变化对于北极海冰的影响一直持续至 2010 年。所以,北极季节性海冰近 10 年的变化,主要体现在 2007 年的转变。文中计算了太平洋扇区 4—9 月累积表面气温的距平(图 7),同样,其最大距平出现在 2007 年,而且冬季太平洋扇区季节性海冰距平和气温的变化除了 2002、2006 及 2008 年外,两者变化基本一致,2007 年季节性海冰的增加与夏季高温距平,生成大量开阔水有直接关系,可见太平洋扇区气温的升高是 2007 年北极季节性海冰增加的重要原因之一。

4.2 2007 年之后北极季节性海冰位相维持的大气环流背景

北极冬季季节性海冰 EOF 分解的前两模态表明了 2002—2010 年冬季北极季节性海冰变化的两个主要模态,EOF 第二模态时间序列的峰值发生较早,该模态反映了 2005 年北极海冰的历史极小值,更多地反映了个例的极端情况。而第一模态的峰值出现稍晚,该模态不只反映了 2007 年北极海冰历史极小值的情况,而且反映了 2007—2010 年整个时段北极季节性海冰的变化。从图 5 的分析中也说明了这一点,为了研究 2007 年北极季节性海冰变化的维持机制,本文对 2007 年前后北半球的大气环流场做了合成分

析。从位势高度来看,从低空到高空基本为正压模式,主要的环流异常体现为波弗特海区异常高压,顺时针的风场。图 8 显示了 500 hPa 夏季和秋季的环流异常,夏季大的环流形势是负 AO 的异常分布,气温和压强是冷低压和暖高压异常的配置,导致波弗特海区异常高压加强;秋季,中高纬度为三波定常波结构,太平洋阻塞、大西洋阻塞以及乌拉尔山阻塞异常环流加强,这种中高纬度三波定常波结构有利于南北向的动量热量交换以及波弗特高压的维持。而且从

图 9 秋季和冬季的纬向风的合成场可以看出,夏季急流轴基本以减弱为主,特别是东半球,而且急流轴向东向北加强,急流向北收缩也是北极变暖影响的结果。秋季急流减弱的 3 个主要区域对应位势高度场上 3 个主要的阻塞异常环流发生的地方:乌拉尔山、北太平洋和大西洋。200 hPa 高空西风急流减弱,也就是纬向环流减弱,有利于经向环流加强,有利于阻塞环流的加强;因而,从 200 hPa 高空西风急流异常来看,也是有利于波弗特海区异常高压的维持。

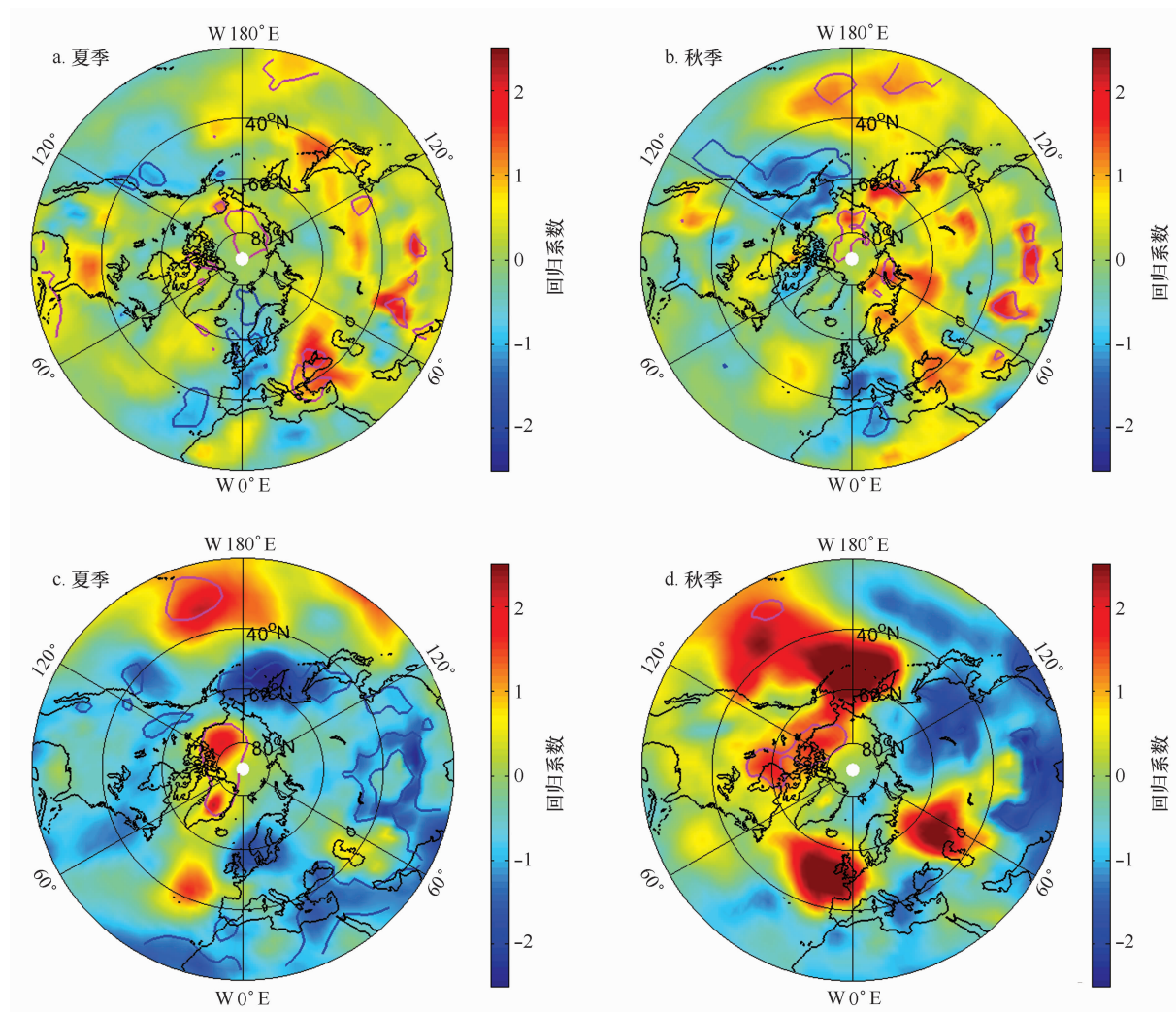


图 6 夏季(7—9月)和秋季(10—12月)表面气温(a,b)及海表面气压(c,d)与冬季(10月至翌年3月)季节性海冰 EOF 第一模态时间系数回归,红线和蓝线分别表示过相关性过 95% 置信的区域

Fig. 6 The regression of surface air temperature (a,b) and sea level pressure (c,d) during summer time (July to September) and fall time (October to December) with the first mode time coefficient of seasonal sea ice EOF analysis during winter time (October to next March), the red and blue lines indicate that the region of the correlation over 95%

为了体现在与不同的大气环流相互作用下海冰的运动特征,本文同样对 2002—2010 年夏季冰速进

行 EOF 分解(图 10),前两模态方差贡献为 73%,其中第一模态方差贡献为 49%,第一模态主要体现了

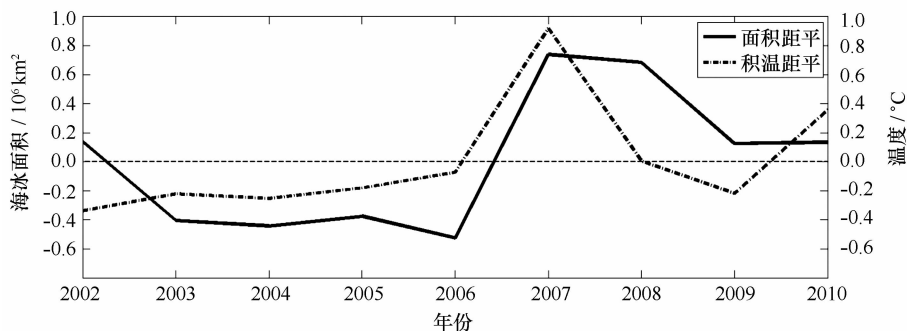


图 7 太平洋扇区冬季季节性海冰面积距平(实线)和 4—9 月积温距平(点线)

Fig. 7 The seasonal sea ice area anomaly of winter time (solid line) and April to September accumulated temperature anomaly in Pacific sector (dash line)

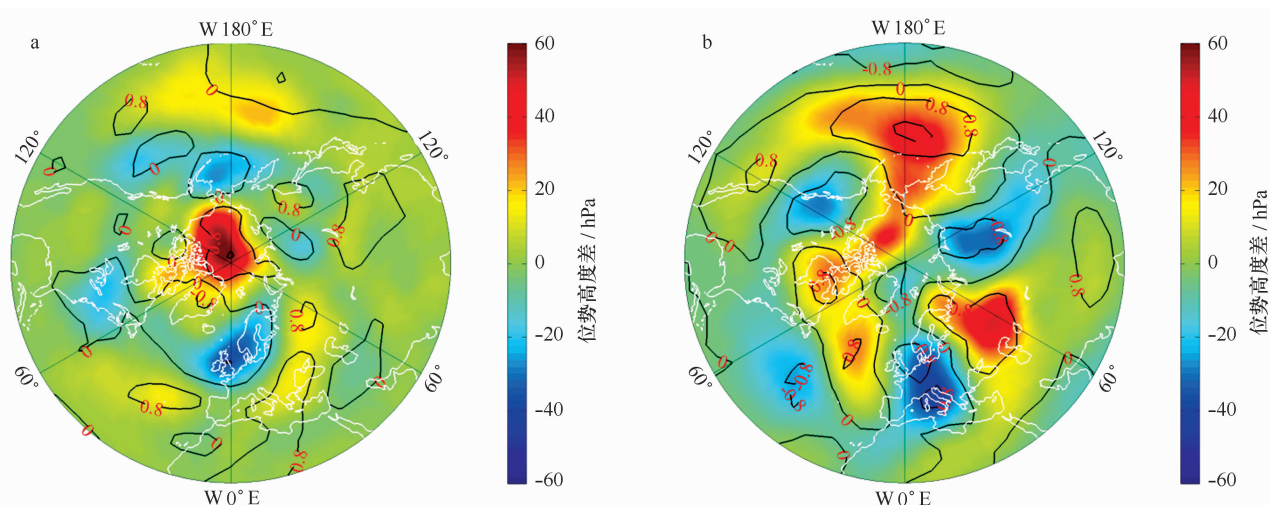


图 8 2007 年前后夏季(7—9 月, a)和秋季(10—12 月, b)500 hPa 位势高度(填色)和气温(等值线)合成场之差

Fig. 8 The difference synthesis fields of 500 hPa geopotential height and the air temperature during summer time (July to September, a) and fall time (October to December, b) between before and after year

海冰在夏季的顺时针旋转,尤其是在靠近东西伯利亚海沿岸一侧,而且第一模态的时间系数从 2005—2007 年一直为正值,这与环流异常是相一致的。第二模态主要体现了北极海冰中央区内部的运动。结合两者来看,2007 年的高温加上环流异常,导致了太平洋扇区靠近东西伯利亚海一侧的多年冰被融化,而多年冰融化之后要恢复到之前状态需要长时间的冷距平,而在 2007 年之后,除了 2009 年气温异常为负距平外,其余基本为正距平,因而不利于太平洋扇区海冰度过融化季变为多年海冰。同时,季节性海冰对风的响应更敏感,有利于海冰在风场作用下离开东西伯利亚海沿岸,被卷入穿极流,进一步通过弗拉姆海峡离开北极,从图 2 和图 4 中也可以看出,大西洋扇区一侧季节性海冰略有减小的趋势,这是由于海冰在此堆积,

有利于季节性海冰转变为多年冰。2007 年太平洋扇区季节性海冰剧烈增加,而且 2007 年之后的环流异常有利于夏季太平洋扇区海冰的减少,因而使得 2007 年北极海冰的减小对太平洋扇区的影响持续到 2010 年,甚至更久。

5 结论

近十几年北极海冰快速减少,部分多年冰转化为季节性海冰,对北极气候产生重要影响。本文基于 AMSR-E 数据反演得到的北极海冰密集度,获取北极季节性海冰密集度场,分析 2002—2010 年北极冬季季节性海冰的变化特征及其与表面气温和海表面气压以及与高空环流场的关系,具体结论如下:

(1) 2002—2010 年北极冬季季节性海冰的 EOF

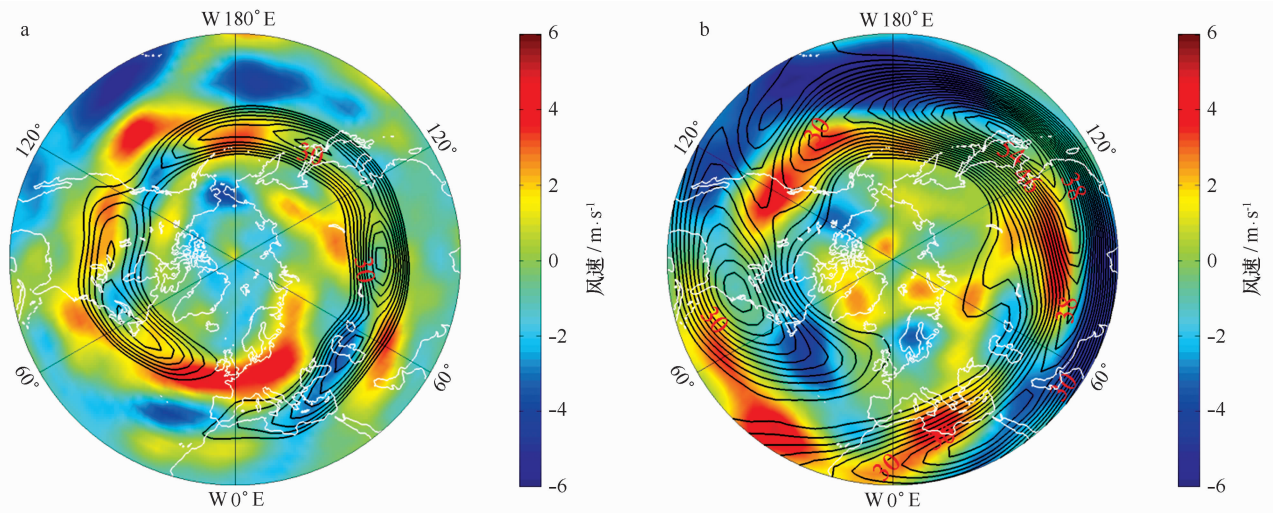


图9 2007年前后200 hPa夏季(7—9月,a)和秋季(10—12月,b)纬向风场合成场之差(填色)和平均纬向风场(等值线)
 Fig. 9 The difference synthesis fields of 200 hPa zonal wind during summer time (July to September, a) and fall time (October to December, b) between before and after year

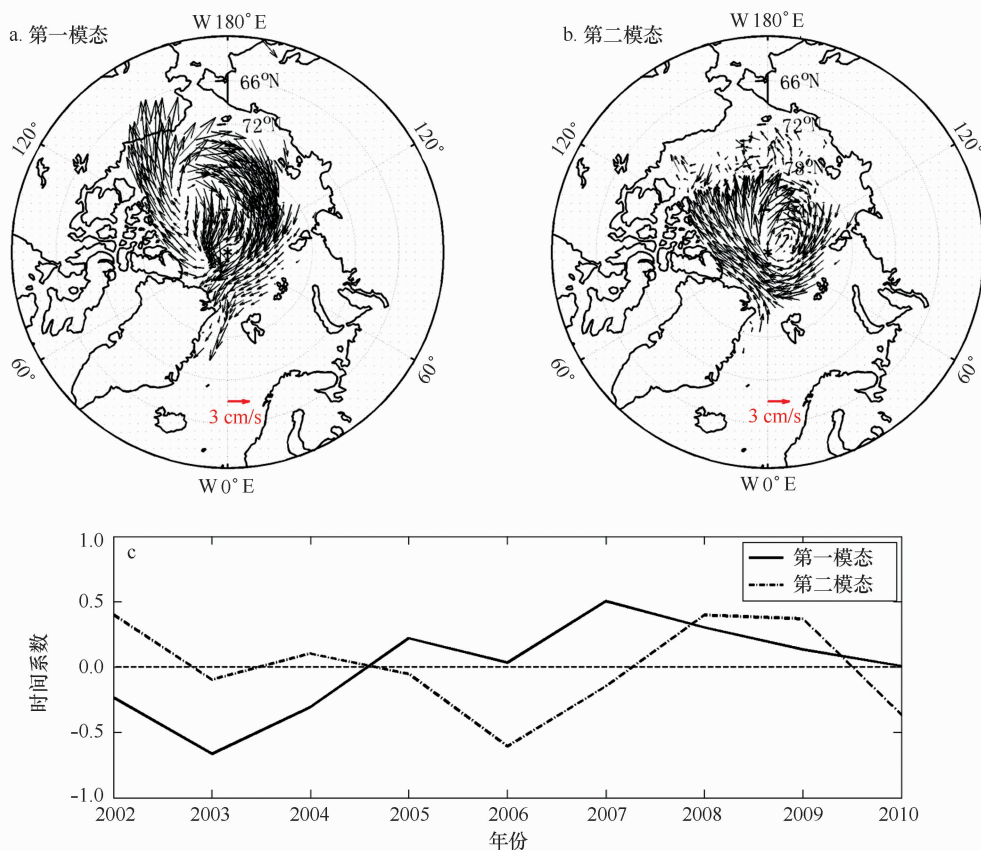


图10 北极夏季(7—9月)冰速 EOF 前两模态空间分布(a,b)和时间系数(c)

Fig. 10 The first two EOF mode's spatial distribution (a, b) and time coefficient (c) of the ice drift during summer time (July to September)

分解分析显示,2002—2010年北极冬季季节性海冰有 增多的趋势。从空间分布来看,发现2002—2010年

北极冬季季节性海冰年际变化的前两个模态空间分布分别体现了 2007 年和 2005 年的北极季节性海冰距平场。其中,第一模态的空间分布不仅体现了 2007 年北极冬季季节性海冰的变化,还体现了 2007 年之后北极冬季季节性海冰正距平的持续,为北极季节性海冰近 10 年的最主要模态,第二模态主要体现了 2005 年北极季节性海冰变化。从时间系数来看,第一模态整体上有随时间加强的趋势,第二模态的峰值在时间上先于第一模态。

(2) 北极季节性海冰近 10 年的变化呈现大西洋扇区和太平洋扇区的不对称性,大西洋扇区的季节性海冰略有减少的趋势,其变化并不明显,太平洋扇区的季节性海冰以 2007 年为界具有明显的位相转变,由负距平转变为正距平,并且一直维持到 2010 年,说明北极季节性海冰的变化主要体现在北冰洋太平洋扇区,更多的海冰由多年冰转变为季节性海冰。从大气环流形势看,低空到高空基本为正压分布,500 hPa 的波弗特海区异常高压有利于夏季太平洋扇区海冰减少,而 200 hPa 西风急流轴上纬向风的减弱有利于波弗特海区异常高压的维持,整体的环流异常有利于北极太平洋扇区夏季海冰减少,维持冬季季节性海冰

增多。

由于本文使用的是基于 AMSR-E 数据反演得到的海冰密集度数据进行分析,因而时间范围限制在 2002—2010 年的冬季,因此所得出的结论也只说明了这段时间北极海冰的变化,但是,2002—2010 年确实是北极海冰快速变化的 9 年,其中 2002,2005 和 2007 年都是当时的历史最小值,2008 年的北极海冰范围虽然不是历史最小值,也仅仅比 2007 年略大,在这 9 年,北极冬季季节性海冰的时间序列确实在 2007 年存在由负到正的转变,不仅是 EOF 分解的结果而且北极海冰面积本身呈现出这样的变化(图 2,3 和 7),尤其是在太平洋扇区一侧。实际上,对美国国家冰雪数据中心 SSM/I 海冰密集度数据计算的 1979—2012 年月平均北极海冰面积进行年际变化分段趋势研究和小波分析结果也显示,整个北极海冰范围的变化存在 2007 年的突变转折^[28],这从侧面支持了本文的观点。可见,伴随着北极海冰快速变化,北极冬季季节性海冰在增加,2007 年实现了从负距平到正距平的转变。季节性海冰的增加使得北极海冰对于外强迫场的响应更加敏感,有关较长时段的季节性海冰变化值得进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Maslanik J, Stroeve J, Fowler C, et al. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13502.
- [2] Comiso J C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(4): 1176—1193.
- [3] Holland M M, Stroeve J. Changing seasonal sea ice predictor relationships in a changing Arctic climate[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(18): L18501.
- [4] Comiso J C, Hall D K. Climate trends in the Arctic as observed from space[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2014, 5(3): 389—409.
- [5] Armour K C, Bitz C M, Thompson L A, et al. Controls on Arctic sea ice from first-year and multiyear ice survivability[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(9): 2378—2390.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Serreze M C, Holland M M, Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover[J]. *Science*, 2007, 315(5818): 1533—1536.
- [9] Lindsay R W, Zhang J. The thinning of Arctic sea ice, 1988—2003: Have we passed a tipping point? [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(22): 4879—4894.
- [10] Kwok R, Rothrock D A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958—2008[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(15): L15501.
- [11] Lindsay R W, Zhang J, Schweiger A, et al. Arctic sea ice retreat in 2007 follows thinning trend[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(1): 165—176.
- [12] Smedsrud L H, Sorteberg A, Kloster K. Recent and future changes of the Arctic sea-ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(20): 293—310.
- [13] Comiso J C. A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(20): 17—1—17—4.
- [14] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979—2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881—889.
- [15] 柯长青, 彭海涛, 孙波, 等. 2002 年—2011 年北极海冰时空变化分析[J]. *遥感学报*, 2012, 17(2): 452—466.
Ke Changqing, Peng Haitao, Sun Bo, et al. Spatio-temporal variability of Arctic sea ice from 2002 to 2011[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 17

- (2); 452–466.
- [16] Markus T, Stroeve J C, Miller J. Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2009, 114(C12): C12024.
- [17] Stroeve J C, Markus T, Boisvert L, et al. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(4): 1216–1225.
- [18] Rodrigues J. The increase in the length of the ice-free season in the Arctic[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 59(1): 78–101.
- [19] Hao Guanghua, Su Jie. A study on the dynamic tie points ASI algorithm in the Arctic Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(11), doi:10.1007/s13131-015-0659-y.
- [20] National Snow and Ice Data Center. Polar Pathfinder daily 25 km EASE-grid sea ice motion vectors[OL]. http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0116_icemotion.gd.html
- [21] Hao Guanghua, Su Jie. Study of multiyear ice concentration retrieval algorithms using AMSR-E data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(9): 1–10.
- [22] Serreze M C, Maslanik J A, Scambos T A, et al. A record minimum arctic sea ice extent and area in 2002[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(3): 1110.
- [23] 汪代维, 杨修群. 北极海冰变化的时间和空间型[J]. *气象学报*, 2002, 60(2): 129–138.
Wang Daiwei, Yang Xiuqun. Temporal and Spatial Patterns of Arctic sea ice variations[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(2): 129–138.
- [24] 张璐, 张占海, 李群, 等. 近 30 年北极海冰异常变化趋势[J]. *极地研究*, 2009, 21(4): 344–352.
Zhang Lu, Zhang Zhanhai, Li Qun, et al. Status of the recent declining of Arctic sea ice studies[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2009, 21(4): 344–352.
- [25] Francis J A, Hunter E. Drivers of declining sea ice in the Arctic winter: A tale of two seas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17): L17503.
- [26] 魏立新, 张海影. 北极海冰减少的气候效应研究[J]. *海洋预报*, 2005, 22(9): 56–61.
Wei Lixin, Zhang Haiying. The climate effect due to the decrease of Arctic sea ice[J]. *Marine Forecasts*, 2005, 22(9): 56–61.
- [27] Stroeve J, Serreze M, Drobot S, et al. Arctic sea ice extent plummets in 2007[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2008, 89(2): 13–14.
- [28] 王宏, 周晓, 黄菲. 大气环流优势模态对北极海冰变化的响应 I. 北极涛动[J]. *海洋学报*, 2015, 37(11): 57–67.
Wang Hong, Zhou Xiao, Huang Fei. Response of dominant mode for atmospheric circulation in northern hemisphere to the accelerated decline of Arctic sea ice: I. the Arctic Oscillation[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(11): 57–67.

Analysis of the dual-mode feature of Arctic seasonal sea ice

Hao Guanghua¹, Su Jie¹, Huang Fei¹

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

Abstract: The change of Arctic sea ice change rapidly mainly occurred in the edge of central Arctic region in recent years. The edge area of the central Arctic is tending to be covered by seasonal ice which was dominated by multi-year ice in the past. The analysis in this paper shows that the first two EOF modes of seasonal sea ice anomaly mainly shows the characteristics of sea ice of year 2007 and 2005. The second mode mainly reflects an extreme change of Arctic sea ice in 2005, while the first mode not only reflects the change of Arctic sea ice in 2007, but also reflects a phase shift of seasonal sea ice in winter during 2002–2010. During the study period, the seasonal sea ice variability mainly occurs in the Pacific sector of the Arctic Ocean. The phase of seasonal sea ice anomaly is negative before 2007 and shifts to positive after 2007, and the positive phase continues to 2010. The maximum anomalies of surface temperature in Pacific sector occur in 2007. And the anomaly high air pressure in Beaufort Sea region helps to reduce the summer sea ice in the Pacific sector, and the weakened westerly jet is in favor of positive anomaly high air pressure in Beaufort Sea region in summer and autumn. Also the clockwise ice velocity distribution is in favor of ice leaving from the Pacific sector, which will lead to the positive seasonal ice anomalies in winter maintained from 2007 to 2010 in Pacific sector.

Key words: Arctic; seasonal sea ice; ice concentration; dual-mode feature