第 37 卷 第 11 期 海 洋 学 报 Vol. 37, No. 11
2015 年 11 月 Haiyang Xuebao November 2015

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,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.006

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, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.006

大气环流优势模态对北极海冰变化的响应

I. 北极涛动

王宏[1,2],周晓[1,2],黄菲[1,2,3*]

(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. 中国海洋大学 山东省高校海洋－大气相互作用与气候重点实验室,山东 青岛 266100;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 315211)

摘要: 利用美国冰雪中心海冰密集度数据,分析了 1979－2012 年北极海冰面积的时间变化特征,发现北极海冰具有显著的年代际变化特征,分别在 1997 和 2007 年前后存在两次年代际转型突变点,相应的大气环流优势模态——北极涛动(AO)也存在显著的时空变化。1979－1996 年阶段海冰下降趋势较弱并以较强的年际振荡为主,AO 模态较强且显示出低频振荡特征;1997－2006 年阶段北极海冰快速减退趋势占优,同时伴随着较弱的年际振荡,AO 模态减弱且振荡周期缩短;2007－2012 年阶段海冰范围较快下降同时具有极强的年际振荡,方差变化是前两个阶段的 2～3 倍,AO 不仅强度加强,空间结构也发生了变化,极涡中心分别向格陵兰岛和白令海峡一侧延伸,这种结构有利于极地冷空气入侵欧洲和北美。利用 ECHAM5 大气模式进行的数值试验结果也证实了较强振荡的海冰强迫对 AO 模态的改变具有决定作用。

关键词: 北极海冰;北极涛动;大气环流;年际振荡;年代际差异

中图分类号: P731.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2015)11-0057-11

1 引言

北极作为地球冷源之一,北极地区主要由海冰覆盖。海冰具有与海洋完全不同的地表反照率[1],海冰的融化和冻结,可以改变北极地区对热量的吸收;而海冰隔绝大气和海洋,当海冰消失后,则会引起海洋大气的直接热交换,会对大气系统产生影响[2]。同时海冰的融化和冻结,也从大气吸收或释放热量,对大气有加热和冷却作用,因此海冰本身也具有对大气环流的驱动作用。由于北极存在海冰－反照率的正反馈机制[3],一旦给北极海冰一个扰动,就会引起海冰的一系列快速变化并持续下去,这也是北极海冰称作气候系统临界点的原因[4]。

近几十年北极地区海冰一直在持续减退[5－10],而夏季北极海冰锐减尤其显著[11],从而海冰的季节振幅显著增强[10,12]。海冰变化也会反馈给大气环流,

收稿日期: 2015-04-15;**修订日期:** 2015-08-20。

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2015CB953904,2012CB955604);国家自然科学基金委员会－山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406401)。

作者简介: 王宏(1979—),女,内蒙古喀喇沁族人,博士,主要从事气候变化数值模拟的研究。E-mail:wanghong@ouc.edu.cn

*通信作者:** 黄菲,女,陕西省宝鸡市人,教授,主要从事气候动力学研究。E-mail:huangf@mail.ouc.edu.cn

很多研究指出近些年北半球一些冷冬和暴雪事件,都与北极海冰的锐减有关[13—17],而且也会导致大气环流异常响应[18—22]。北极涛动(AO)是北半球中高纬度大气环流异常的主要模态,能够反映中上层极涡强度的调整[23]。而 AO 作为近地面大气变化的主要模态,更能体现大气对于下界面改变的响应。同时 AO 也能够影响海冰分布[24],从而进一步对大气进行反馈。前人对于海冰和北极涛动的研究,主要集中在海冰指数和 AO 指数的相关,研究发现,近年来由于全球变暖北极海冰加速融化,在 20 世纪 90 年代以前 AO 呈现出与全球变暖一致的上升趋势[25],且 AO 与北极海冰变化存在很强的耦合关系[24,26],但在此之后 AO 指数却呈现出下降的趋势,特别是最近几年北极海冰快速融化并屡创历史之最,AO 的振幅变化却越来越小并与海冰之间的耦合关系出现"退耦"现象[20,27]。在这样的不同年代背景下,海冰异常变化对北极涛动有何影响?其空间结构有哪些显著改变?并对北半球气候存在什么样的潜在影响?这些将是本文重点关注的主要问题。

2 资料与方法

本文使用的观测数据主要有:

(1)美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center)Bootstrap Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR 和 DMSP SSM/I—SSMIS, Version 2 海冰密集度数据[28],使用 1979—2012 年日平均资料,空间分辨率为 25 km×25 km。为表征北极海冰变化特征,利用北极海冰密集度数据计算北极海冰覆盖范围(Sea Ice Extent,SIE)月平均指数,定义为海冰密集度大于 15%的格点的面积累加,它能很好地表征海冰面积的变化。

(2)为分析北极涛动变化,使用了 1979—2012 年 NCEP/NCAR Reanalysis 的月平均再分析资料[29]的海平面气压场(SLP)以及 500 hPa 位势高度场,水平分辨率为 2.5°×2.5°。

使用了回归分析和合成分析,对北极涛动模态的年代际差异进行检验。在回归分析和合成分析中分别使用 F 检验和 t 检验进行显著性检验。对合成分析中样本的选取,采用标准化的时间序列绝对值超过 0.8 的样本年进行物理量合成。

为验证北极海冰变化对 AO 的可能影响,进行了模式敏感性试验,使用德国 Max Planck Institute for Meteorology 开发的 ECHAM5 大气模式,模式采用 T63 网格,运行 50 年,选取后 40 年数据进行分析。

3 北极海冰的年代际变化

Wang 和 Ikeda[25]通过分析 1900—1999 年北极海冰的 Arctic Sea-Ice Oscillation(ASIO)模态,指出北极海冰存在较长周期的年代际变化,尤其是在 1978 年以后海冰发生快速降低趋势。Comiso 和 Fumihiko[7]用不同微波辐射计的海冰反演数据分析了 1979—2006 年 SIE 指数变化,指出 1996 年前后月平均 SIE 指数变化存在不同变化特征,1996—2006 年海冰变化年际振荡小,呈现超过 8%/(10 a)下降趋势。而 1979—2006 年的 SIE 整体下降趋势为 3.383%/(10 a)。Ogi 和 Rigor[30]分析了 9 月份的海冰数据也指出海冰的下降趋势在 1996 年前后存在显著不同,1996—2010 年 SIE 的线性趋势为—18%,相比之下,1979—1996 年的 SIE 线性趋势为—4%。上述研究均表明 1996 年前后北极海冰的确存在年代际变化,但这些研究主要关注线性趋势的年代际变化,本文将从线性趋势和年际振荡两个方面进行分析。

图 1 为 1979—2012 年北极月平均 SIE 指数的变化曲线,可以看到在 1996 年前后下降趋势存在显著变化,其中 1979—1996 年的线性趋势为—2.53%/(10 a),1997—2006 年的线性趋势为—8.42%/(10 a),同样我们也计算了 1979—2006 年的线性趋势为—3.43%/(10 a),与 Comiso 和 Nishio[7]计算的—3.383%/10a 相近。同时,1979—1996 年阶段具有较强的年际振荡,从图 1 中可以看到,去趋势振荡方差贡献比占时间序列总方差的 85.3%。而 1997—2006 年阶段,下降趋势方差贡献为主(占总方差 61.1%),去趋势方差贡献远远小于前一阶段的贡献比,第二阶段 SIE 变化主要表现为线性下降为主,年际振荡较弱。

2007—2012 年 SIE 又表现为与第二阶段不同的变化特征,最显著的是具有十分强烈的年际振荡。这一阶段的线性趋势为—6.27%/(10 a),比第二阶段的—8.42%/(10 a)有所降低,但从时间指数的方差上看,趋势方差贡献只占到总方差的 3.1%,而去趋势方差贡献则达到 96.9%,说明第三阶段主要体现为海冰的年际振荡特征。从图 2 的小波分析图中,可以看到 1996—2007 阶段,5 年以下周期都不通过置信度检验;而第一阶段和第三阶段都存在显著的年际振荡周期。

因此,结合年代际和年际变化特征,可以将 1979—2012 年划分为 3 个海冰具有不同变化特征的阶段。第一阶段具有相对较弱的下降趋势,同时具有很强的年际

变化,下降趋势为−2.53%/(10 a),SIE 时间序列方差为 1.555×10^5 km^2,其中去趋势方差贡献为 85.3%;第二阶段具有快速下降趋势,同时具有较弱的年际变化,下降趋势为−8.42%/(10 a),方差为 1.164×10^5 km^2,其中线性趋势方差贡献为 61.1%;第三阶段表现为最强的年际振荡,SIE 方差为 4.162×10^5 km^2,去趋势方差贡献为 96.9%,同时线性趋势为−6.27%/(10 a)。

海冰在快速衰减同时,年际振荡从强到弱再到更强,特别是 2007 和 2012 年夏季北极海冰范围连续出现创纪录的低点,而冬季海冰的冻结范围却显著增大,造成更加剧烈的年际振荡,这种变化可能会对大气环流产生更深远的影响。

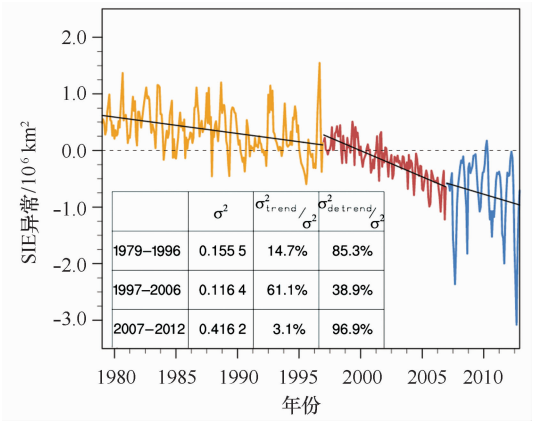


图 1　1979−2012 年北极 SIE 指数变化趋势

Fig. 1　The Arctic sea ice extent index from 1979 to 2012

黄线表示 1979−1996 年,红线表示 1997−2006 年,蓝线表示 2007−2012 年变化;图中表格 3 列分别为总体方差 σ^2,线性趋势方差贡献比 $\sigma^2_{trend}/\sigma^2$,线性趋势方差贡献比 $\sigma^2_{detrend}/\sigma^2$ 总体方差的单位为 10^6 km^2

Yellow line indicates 1979−1996, red line indicates 1997−2006, blue line indicates 2007−2012; the table lists the variance of the total SIE timeseries (σ^2), the variance ratio between SIE trend line and total timeseries ($\sigma^2_{trend}/\sigma^2$), the variance ratio between SIE detrend timeseries and total timeseries ($\sigma^2_{detrend}/\sigma^2$) for three periods (unit is 10^6 km^2)

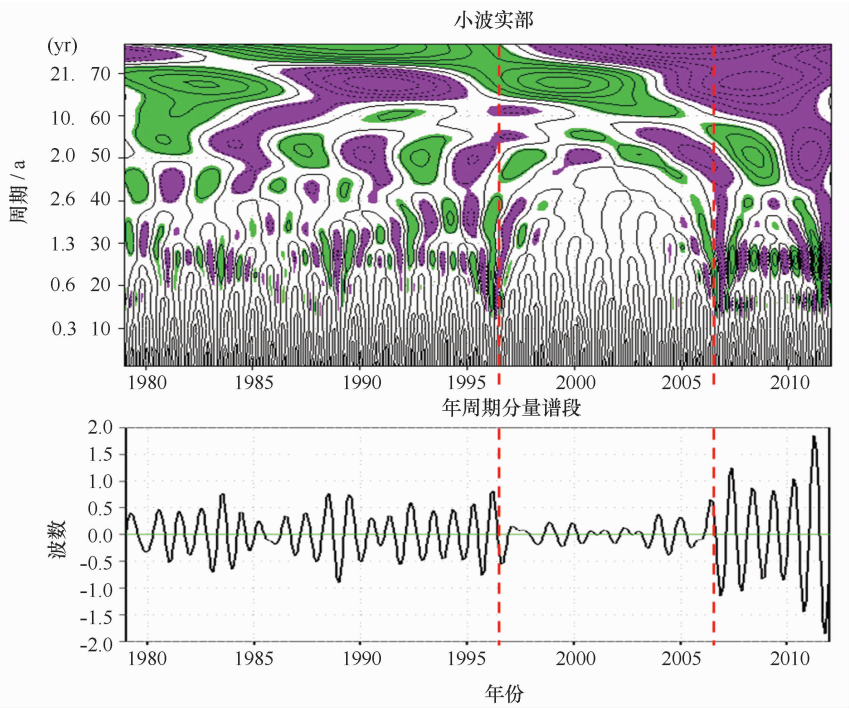


图 2　北极海冰月平均 SIE 指数的 Molet 小波分析(阴影区表示过 90%信度区域)

Fig. 2　Wavelet analysis of monthly sea ice extent based on a Molet wavelet(the shading indicates the area above 90% confidence level)

4 大气环流优势模态的年代际变化

从前面分析中可以看到北极海冰具有显著的年代际变化，那么对应于不同时期的大气环流又是如何响应？图 3a～d 展示了不同阶段 SIE 月平均指数回归到 SLP 场的空间分布，可以看到，虽然 1979 年以后海冰 3 个阶段都为下降趋势，但是得到的空间回归场差异很大，这说明这 3 个阶段中，与海冰相关的大气环流可能受海冰的年际振荡影响较大。Quadrelli 和 Wallace[31] 曾指出北半球 SLP 场存在两个主要模态：AO 和类太平洋－北美型(PNA)模态(PNA＊)，分别是 EOF 分析的第一、二模态，可以解释北半球大气环流变化的大部分方差贡献。但 Overland 和 Wang[32] 在 2005 年研究中又指出 2000－2005 年春季 SLP 异常场的合成场与 1950－1999 年冬季(DJF)海平面气压场 EOF 的第三模态空间场更为接近，说明 EOF 第三主成分的作用也不可忽视。如果与海冰相关的大气环流发生了改变，那么相应的大气环流主要模态是否也发生了改变，无论第二、三模态如何，北半球大气环流的优势模态第一模态总是 AO 模态，因此后文主要研究在 AO 模态在不同年代阶段中的时空变化特征。

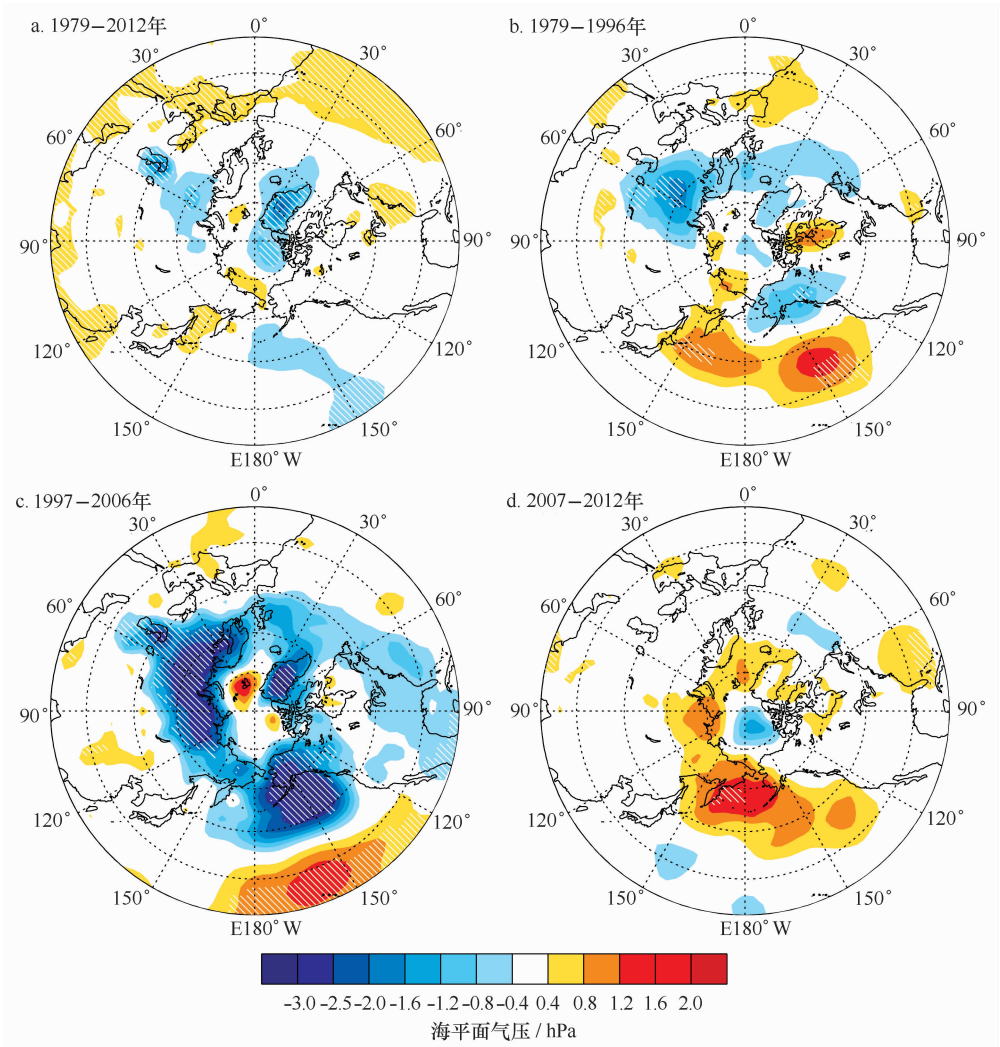


图 3 北极 SIE 月平均指数回归北半球海平面气压场(斜线区表示过 80％回归信度区域)

Fig. 3 Regression of SIE monthly index with sea surface pressure (white backslashes indicate the area above 80％ confidence level)

北极涛动是北半球中高纬度大气环流的主导模态，代表了北极地区大气环流的重要气候指数，定义为 20°N 以北 SLP 距平场的主成分分析(EOF)第一模态。当它正位相时，北极与中纬度的气压差较正常加强，中纬度西风急流加强，限制极区冷空气向南扩展；当它处于负位相时，系统的气压差较正常减弱，中纬

度西风减弱,冷空气较易向南侵袭。

图 4 展示了 1979－1996 和 1997－2006 年阶段 EOF 第一模态空间分布(图 4a,c)以及两个模态的差值场(图 4b,为图 4c 与图 4a 之差),为了验证这个模态差值场是否可信,我们先分别用每个阶段的 PC1 超过 0.8 标准方差的 SLP 场进行合成,然后再用两个合成场做差值,得到图 4d。从图 4a,c 可以看出,两个阶段 EOF 分析的第一模态都为典型的 AO 模态,但第二阶段 AO 的极地低涡更向南扩张,极涡边缘低压槽波数增加。两个年代时段 AO 的主要差异(图 4b)表现在北冰洋地区、北大西洋中高纬度地区以及白令海峡在 1997－2006 年阶段为正异常,环绕极区正异常区域外侧,包括欧亚大陆北侧、北太平洋、北美大陆北部,以及太平洋中纬度为负异常,存在显著差异的区域主要分布在北冰洋、欧亚中高纬度地区以及北美东部地区(图 4d),这表明第二阶段 AO 模态相比第一阶段是减弱的。

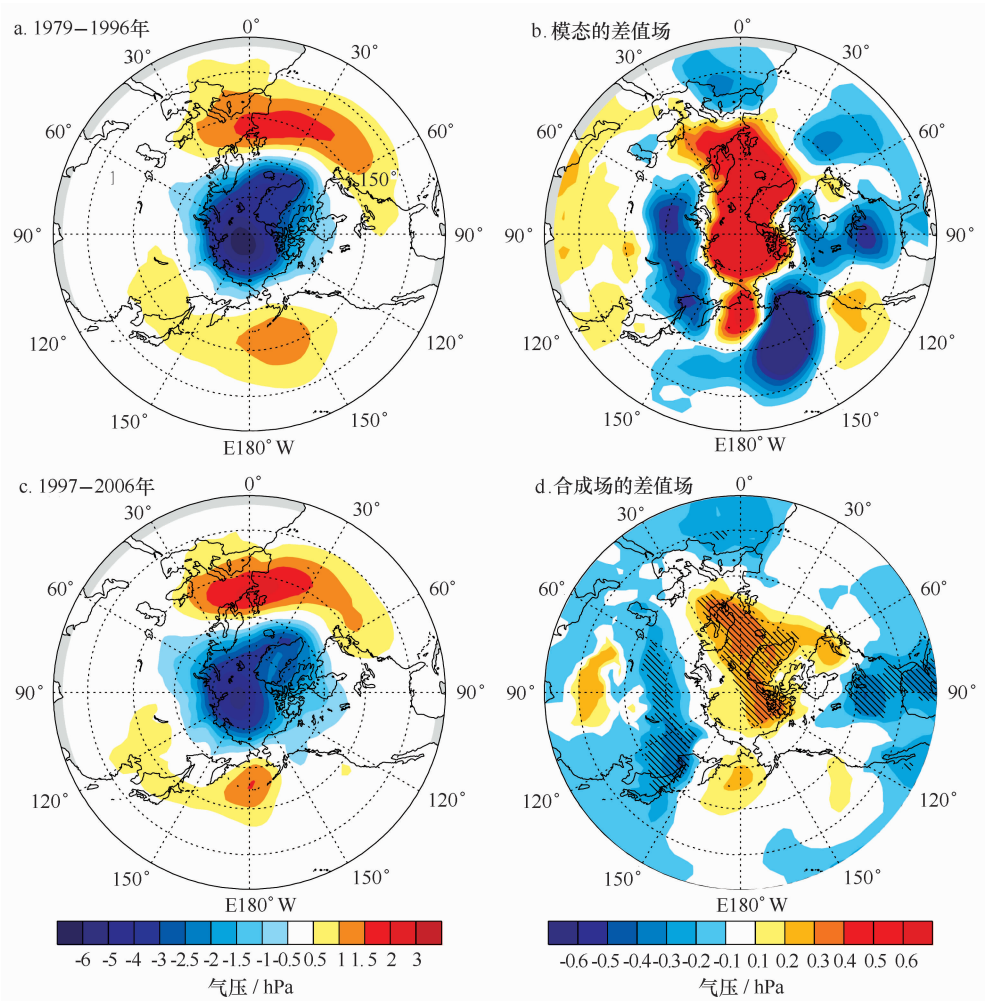


图 4　1979－1996 和 1997－2006 年阶段海平面气压场的 EOF 第一模态(a,c),1997－2006 与 1979－1996 年阶段的模态差值场(b),两个阶段 PC1 大于 0.8 标准差的海平面气压场的合成场的差值场(d),斜线区表示过 80%信度区域

Fig. 4　The first leading EOF mode of sea level pressure for 1979－1996 (a), 1997－2006(c). The difference between 1997－2006 and 1979－1996 (b). The difference of regressed SLP by PC1 for two epochs (1997－2006 minus 1979－1996)(d). White lines donate the area that the significant level above 80% confidence level

注意到在亚洲北部从乌拉尔山到库页岛一带为显著负异常,而格陵兰岛一带则为显著正异常(图 4d)。对比图 3 中海冰变化导致的大气环流异常分布(图 3b,c)可以发现,1997－2006 年北极海冰快速减退对应着 AO 的负位相,欧亚和北美中纬度均产生 SLP 异常降低。对比图 4d 和图 3c 可以发现,亚洲北部的显著负异常可能主要由海冰快速减退引起的,而格陵兰地区和阿拉斯加地区的显著正异常则可能主要由海冰的年际

振荡贡献抵消了线性趋势的贡献所导致。

2007－2012 年阶段的 EOF 第一模态与 1979－1996，1996－2006 年两个阶段都进行了比较，发现第三阶段与前两个阶段的模态差值场空间分布比较类似，这里只展示 2007－2012 与 1997－2006 年阶段的模态差值比较，如图 5。可以看到两个阶段 AO 模态的差异（图 5b）主要在格陵兰岛附近、北太平洋区域以及白令海峡南侧库页岛到阿拉斯加的负异常，模态差值场的负异常中心并不在北极点附近，而是存在两个分别偏向北大西洋和北太平洋的中心。中低纬度基本为正异常，在北大西洋、东北太平洋、欧亚大陆存在 3 个正异常中心。显著区域基本集中在极涡两大洋的负异常中心和环中纬度的正异常区（图 5c）。这说明第三阶段 AO 总体上来看强度加强，负异常中心向格陵兰岛一侧移动，同时负异常区域向白令海峡、阿拉斯加一侧延伸，冷空气更容易直接输送到这两个地区。同时在亚洲中部正异常，则加强了亚洲和极区的气压梯度，不利于冷空气从西伯利亚地区向南输入。这有点像是 AO 模态在第三阶段加强，但更重要的是 AO 模态空间结构变化。

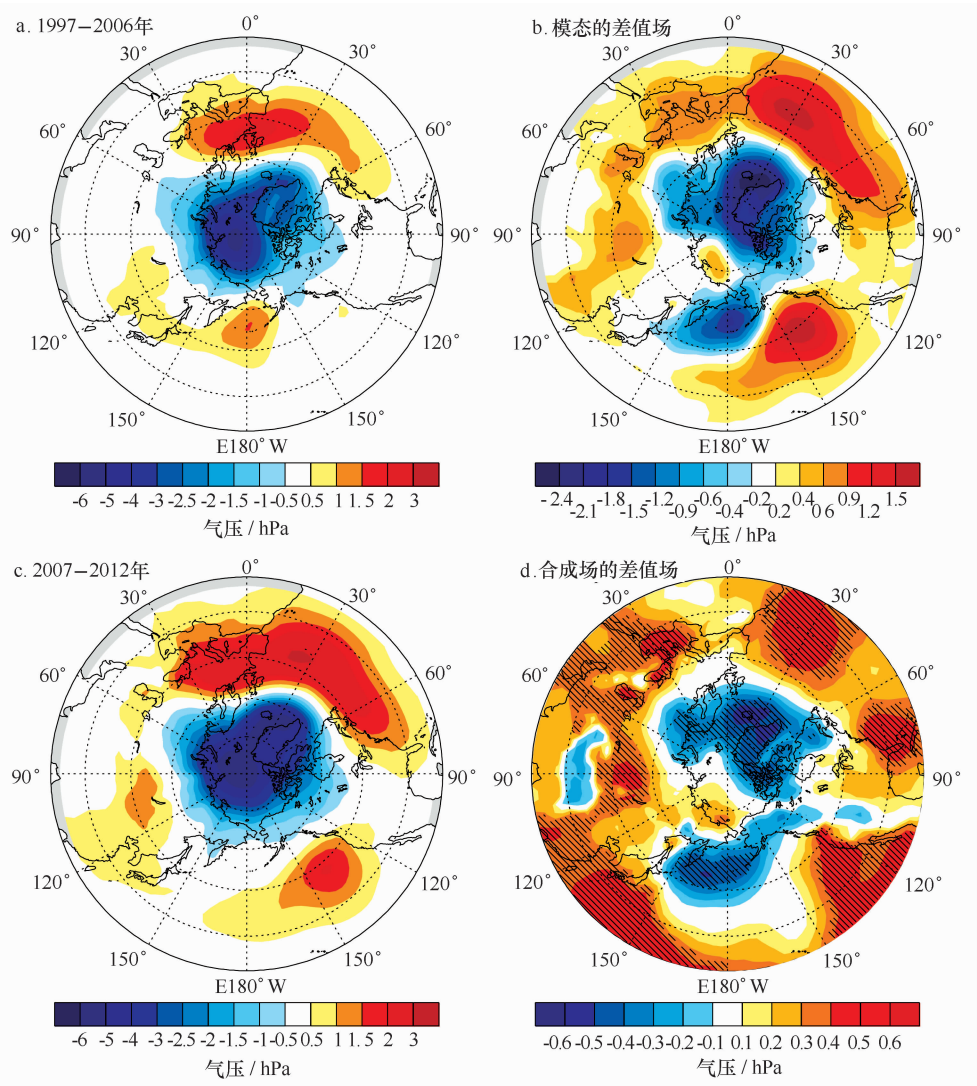


图 5 1996－2006 和 2007－2012 年阶段海平面气压场的 EOF 第一模态（a，c），2007－2012 与 1996－2006 年的模态差值场（b），两个阶段 PC1 大于 0.8 标准差的海平面气压场的合成场的差值场（d），斜线区表示过 80％信度区域

Fig. 5 The first leading EOF mode of sea level pressure for 1996－2006 (a), 2007－2012(c). The difference between 2007－2012 and 1996－2006 (b). The difference of regressed SLP by PC1 for two epochs (2007－2012 minus 1996－2006)(d). White lines donate the area that the significant level above 80% confidence level

前面提到,2007－2012 阶段的 AO 模态与前两阶段 AO 模态的差值场相近,但从海冰年代际变化趋势上看,似乎应该是第三阶段与第二阶段相近,而 AO 模态差值场却没有支持这个假设。第三阶段的 AO 模态,相比第一、第二阶段都表现为类似空间结构的差值场,区别就是第三阶段与第二阶段的差值场更显著一些,而与第一阶段的差值场稍弱。从海冰变化特征上看,第三阶段最大的特点是海冰的年际振荡十分强烈,占据时间序列总方差的 96.7%,而第一阶段年际振荡方差贡献为 85.3%,第二阶段年际振荡方差贡献为 38.9%。因此第三阶段 AO 模态与第一、二阶段 AO 模态相近的差值场,说明这种差异可能主要与海冰的年际振荡相关较大。

综合图 4、图 5 以及海冰变化分析,可以得出,海冰快速融化的年代际变化特征,对应于 AO 模态强度减弱(正负异常中心都减弱),一方面不利于极地冷空气对于中纬度的侵扰,同时也容易使得 AO 正负位相的转换,如图 6,在 1996－2007 年阶段,AO 的振幅相比第一阶段偏弱,同时 AO 正负振荡周期大大缩短。第三阶段海冰具有强烈的年际振荡,对应 AO 模态在格陵兰岛附近,以及白令海峡周围加强,导致北美和欧洲更容易出现极端低温事件,但对于亚洲北部,则更容易出现暖冬。从图 6 的第一模态时间系数变化曲线来看,2007 年以后的 AO 模态负位相振幅增强,这可能是由海冰的较强的年际振荡强迫的。而第二阶段中海冰快速减少,但海冰年际变率较弱,同时 AO 模态强度减弱,可能是海冰与极区大气共同变暖缘故,但此时海冰与大气的相互作用还较弱。到第三阶段,夏季北极出现大量无冰的开阔海域,从而出现较强的海气相互作用,而无冰海域主要出现在波弗特海,以及北大西洋入口区,在第三阶段 AO 模态负异常区域,也就是这两个区域附近。这两块区域的年际变率,影响了 AO 模态的空间分布发生中心偏移,也使得 AO 模态在这两个区域加强,从而进一步影响西欧和北美部分。而 AO 模态的正负位相转换,在第三阶段仍然表现为 1～2 a 的短周期振荡,而不再像 90 年代以前 AO 正负位相具有较长的振荡周期,说明极地对大气的影响更加活跃。

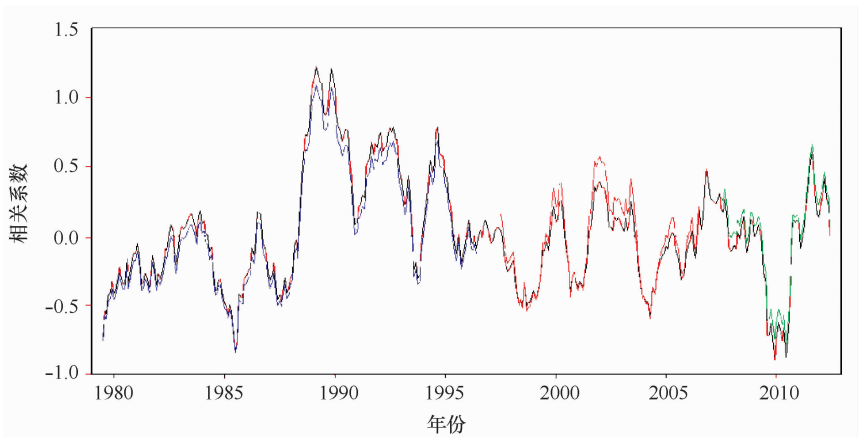


图 6　各阶段 EOF 第一模态时间系数(经过 11 点平滑,其中黑线为 1979－2012 年,蓝线为 1979－1996 年,红线为 1997－2006 年,绿线为 2007－2012 年)

Fig. 6　PC1 of monthly sea level pressure for 1979－2012(black line),1979－1996 (blue line), 1997－2006(red line),2007－2012(green line) with 13－points smoothing

5　海冰变化影响北极涛动年代际响应的模拟验证

从前面分析可知,第三阶段的 AO 模态相比前两个阶段,极地负异常中心向格陵兰岛一侧迁移,南侧负异常边缘向白令海峡、阿拉斯加地区延伸。这种模态变化分析可能与增强的海冰年际振荡相关,但第三阶段的海冰年际振荡信号中还同时包含了较强的线性下降趋势(－6.27%/(10 a))。另外虽然我们是根据海冰的变化特征划分的年代时段,进而分析 AO 模态的年代际差异,但这种模态差异是否由海冰变化造成的? 因此我们继续用模

式结果来进行验证。

采用 ECHAM5 模式，分别用 1979－1996 年气候态多年月平均海冰（控制组）和 2007 年海冰（试验组）作为强迫场驱动大气，两组试验各运行 50 年，选取后 40 年数据进行分析。两组试验只改变了北极地区海冰以及相应的海温场，北极以外地区均为气候平均态，这样扣除了中纬度和热带海温如 ENSO 信号的影响，来检验海冰强的年际振荡对于大气的驱动响应。2007 年海冰具有 2007 年以后海冰变化的特性，有较强的年际振荡，夏季最低海冰面积衰减到 3.8×10^6 km^2，几乎是 1979－1996 年夏季平均态的一半，而冬季海冰减少只有不到 10%，如图 7 所示。

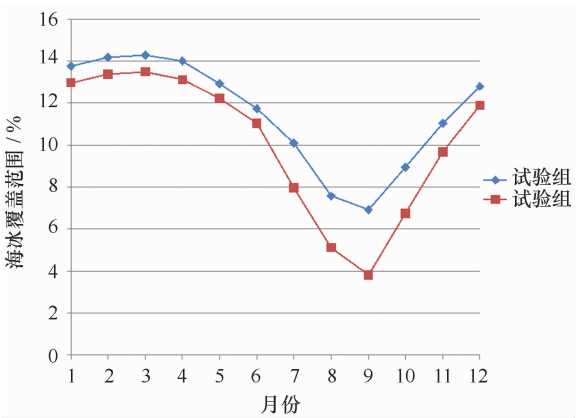


图 7 控制组与实验组北极海冰覆盖范围季节变化曲线

Fig. 7 Sea ice extent of seasonal cycle of experiment and control

图 8 展示了控制组和试验组海平面气压 EOF 的第一模态（图 8a，b），以及第一模态的差值场（图 8d）。可以看到两组试验的第一模态仍然是典型的北极涛动，而其差值场（图 8d）与图 3d 有类似的空间分布，特别是中高纬度地区，表明近年来北极海冰的快速融化和强的年周期振荡确实是造成北极涛动年际变化的主要因素。另外注意到差值场（图 8d）与图 5d 也有类似的空间结构，在极区附近的格陵兰岛以及白令海峡区域有负异常，极区存在的两个负异常区域外，围绕着环状的正异常区域。但模式模拟与观测显著差异的地方是，模式模拟的 AO 模态差异场纬度都偏高，正负异常区域向极地缩进。图 5d 观测的正异常区域基本位于 60°N 以南，一直延续到 20°N 以南。但模式模拟的模态差异（图 8d）正异常区域位于 60°～75°N 之间，正异常位置纬度偏高，同时范围狭窄的多。而极区部分的模态差异的负异常区域，在观测模态异常场中可以向南延伸到 60°N（图 5b），而模式模拟中，主要在极区附近。图 5 是相对于 AO 减弱海冰以下降趋势为主变化的第二阶段的差异，对比数值模拟结果说明依赖于 2007 年较强的海冰季节循环强迫，能够激发出类似图 5d 的 AO 模态变化，揭示出第三阶段中 AO 模态的改变，的确是与海冰加剧的年际振荡相关。但同时，图 5d 的信号中包含了大气对北极海冰快速下降的线性趋势的响应（图 3c），由于模式中海冰仅仅作为大气的固定强迫场，而没有海冰对大气的反馈作用，因此可能会低估大气最终的实际响应效果。图 8c 展示了控制实验和敏感实验 SLP 第一模态时间系数的概率谱分析，可以看到当北极海冰减少后，AO 模态的正负位相偏差总体上相比并不明显，只在极端值域上有所增强。

6 结论和讨论

本文利用美国冰雪数据中心的北极海冰密集度数据分析了 1979－2012 年海冰覆盖范围的时间变化特征，并根据年际变化特点将北极海冰变化划分为 3 个阶段，1979－1996 年阶段，海冰下降趋势为 －2.53%/(10 a)，同时具有较强的年际变化；1997－2006 年，SIE 呈现快速的下降趋势，下降趋势为 －8.42%/(10 a)，同时年际变化较小，年际振荡方差贡献为 38.9%；2007－2012 年，北极海冰 SIE 整体下降趋势减缓（－6.27%/(10 a)），具有最强的年际振荡，年际振荡方差贡献占总方差 96.9%。

根据北极海冰变化的年代际特征，研究 3 个时期内北极涛动年代际差异，来分析北极海冰对北极涛动的可能影响。当北极海冰在第二阶段（1997－2006 年）快速衰减时，北极涛动表现为强度减弱，正负振荡周期缩短。第三阶段，海冰具有强烈年际振荡时，北极涛动表现为极地负（正）异常中心向格陵兰岛一侧偏移，同时极地负（正）异常区域向白领海峡一侧延伸，而亚洲中纬度正（负）异常加强。则在 AO 正位相时，北欧和北美容易受到冷空气侵袭，而亚洲容易出现暖冬。而负位相则相反。

敏感试验结果证明，当海冰年际振荡较强时，可以激发出 AO 模态异常中心向格陵兰岛和白令海峡偏移和延伸的空间结构，但模式与观测存在一定差异，主要是负异常中心偏弱，正异常中心纬度偏高。说明海冰的异常变化，对于大气的响应，还需要有更

多的正反馈机制起作用,需要进一步研究。

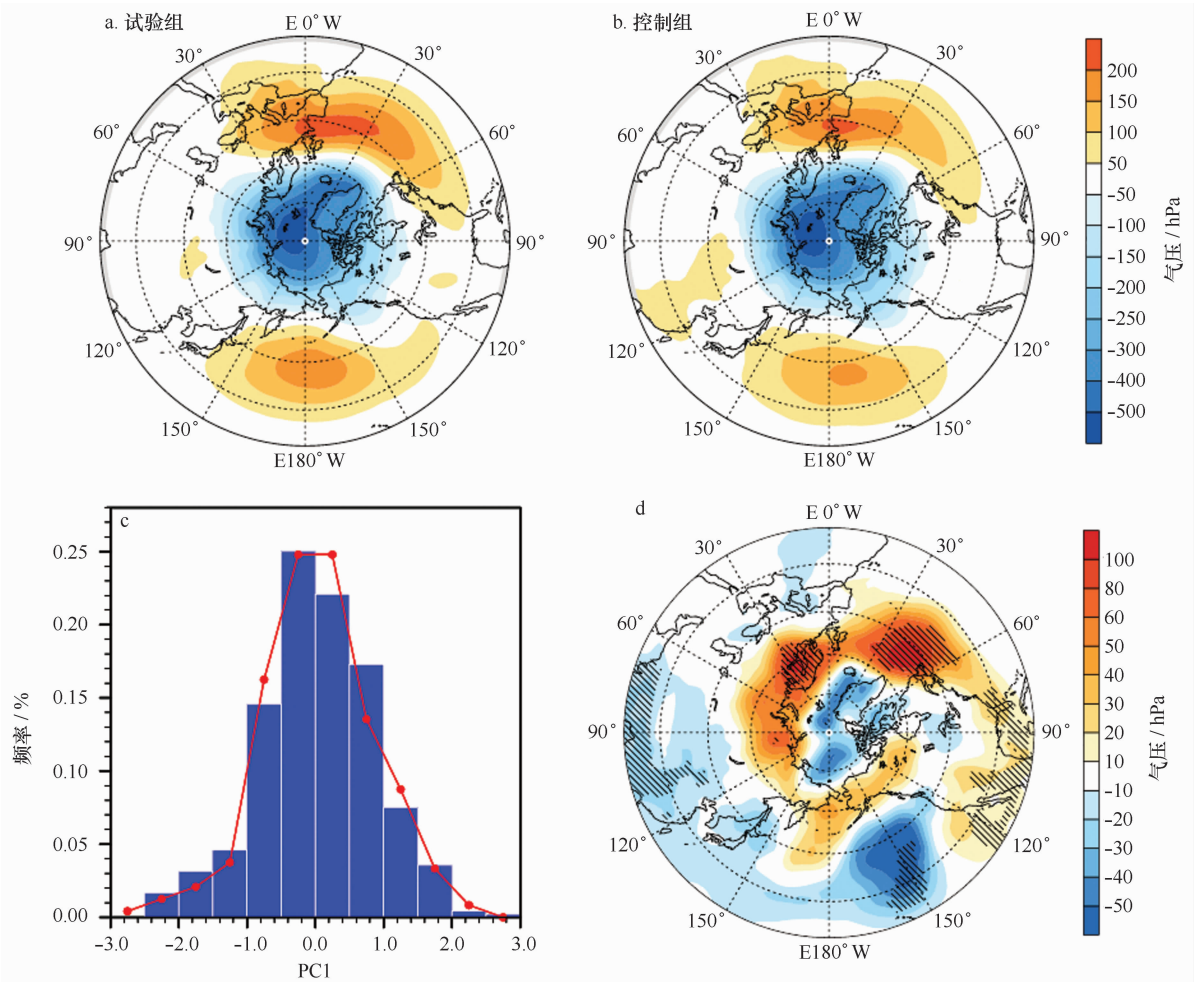


图 8　敏感实验(a)和控制实验(b)海平面气压场 EOF 第一模态,两组实验时间系数的概率谱分布(c)(其中红线表示实验组,蓝色柱表示控制组),图 a 与图 b 模态差值场(d),斜线表示过 80%信度区

Fig. 8　The first leading EOF mode of sea level pressure for experiment run(a), control run (b). The PDF analysis of PC1 for two runs (c, red line for control run and blue bar for control run). The difference of regressed SLP by PC1 for two runs (d, white lines donate the area that the significant level above 80% confidence level)

参考文献:

[1] Hartmann D L. Global Physical Climatology: International Geophysics Series[M]. Academic Press, 1994: 411－412.

[2] Bader J, Mesquita M D S, Hodges K I, et al. A review on Northern Hemisphere sea-ice, storminess and the North Atlantic Oscillation: Observations and projected changes[J]. Atmospheric Research, 2011, 101(4): 809－834.

[3] Serreze M C, Holland M M, Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover[J]. Science, 2007, 315(5818): 1533－1536.

[4] Lenton T M, Held H, Kriegler E, et al. Tipping elements in the Earth's climate system[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, 105(6): 1786－1793.

[5] Bjorgo E, Johannessen O M, Miles M W. Analysis of merged SSMR SSM/I time series of Arctic and Antarctic sea ice parameters 1978－1995[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24: 413－416.

[6] Overland J E, Wang M. The third Arctic climate pattern: 1930s and early 2000s[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L23808.

[7] Comiso J C, Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: C02S07.

[8] 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 recent declining of Arctic sea ice studies[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2009, 21(4): 344－352.

[9] Eisenman I. Geographic muting of changes in the Arctic sea ice cover[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37: L16501.

[10] Stroeve J C,Serreze M C,Holland M M,et al. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover:a research synthesis[J]. Climatic Change,2012,110(3/4): 1005－1027.
[11] Francis J A,Vavrus S J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes[J]. Geophysical Research Letters,2012,39: L06801.
[12] Comiso C J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover[J]. J Climate,2012,25: 1176－1193.
[13] Ghatak D,Frei A,Gong G,et al. On the emergence of an Arctic amplification signal in terrestrial Arctic snow extent[J]. J Geophys Res,2000,115: D24105.
[14] Cattiaux J,Vautard R,Cassou C,et al. Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate[J]. Geophysical Research Letters,2010,37: L20704.
[15] Guirguis K,Gershunov A,Schwartz R,et al. Recent warm and cold daily winter temperature extremes in the Northern Hemisphere[J]. Geophysical Research Letters,2011,38: L17701.
[16] Cohen J L,Furtado J C,Barlow M A,et al. Arctic warming,increasing snow cover and widespread boreal winter cooling Environ[J]. Res Lett,2012,7:014007.
[17] Coumou D,Rahmstorf S. A decade of weather extremes[J]. Nature Climate Change,2012,2: 491－496.
[18] Wu B,Wang J,Walsh J E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion[J]. Journal Climate,2006,19: 210－225.
[19] Francis J A,Hunter E. Drivers of declining sea ice in the Arctic winter: a tale of two seas Geophys[J]. Research Letter,2007,34:L17503.
[20] Zhang X,Sorteberg A,Zhang J,et al. Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system[J]. Geophysical Research Letters,2008,35:L22701.
[21] Overland J E,Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes associated with the recent loss of Arctic sea ice[J]. Tellus A,2010,62:1－9.
[22] Peings Y,Magnusdottir G. Response of the wintertime northern hemisphere atmospheric circulation to current and projected Arctic sea ice decline: A numerical study with CAM5[J]. Journal of Climate,2014,27(1): 244－264.
[23] Thompson D W J,Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. Geophysical Research Letters,1998,25: 1297－1300.
[24] Rigor I G,Wallace J M,Colony R L. Response of Sea ice to the Arctic Oscillation [J]. Journal of Climate,2002,15: 2648－2663.
[25] Wang J,Ikeda M. Arctic oscillation and Arctic sea－ice oscillation,Geophys[J]. Research Letter,2000,27(9): 1287－1290.
[26] Rothrock D A,Yu Y,MaykutG A. Thinning of the Arctic sea-ice cover[J]. Geophysical Research Letters,1999,26: 3469－3472.
[27] Zhao Jinping,Cao Yong,Shi Jiuxin. Core region of Arctic Oscillation and the main atmospheric events impact on the Arctic[J]. Geophysical Research Letters,2006,33: L22708.
[28] Cho K,Sasaki N,Shimoda H,et al. Evaluation and improvement of SSM/I sea ice concentration algorithms for the sea of Okhotsk[J]. Journal Remote Sensing of Japan,1996,16(2):47－58.
[29] Kalnay E,Kanamitsu M,Kistler R,et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc,1996,77(3): 437－471.
[30] Ogi M,Rigor I G. Trends in Arctic sea ice and the role of atmospheric circulation Atmosph[J]. Sci Lett,2013,14: 97－101.
[31] Quadrelli R,Wallace J M. A simplified linear framework forinterpreting patterns of northern hemisphere wintertime climate variability[J]. J Clim,2004,17: 3728－3744.
[32] Overland J E,Wang M. The third Arctic climate pattern: 1930s and early 2000s Geophys[J]. Res Lett,2005,32: L23808.

Response of dominant mode for atmospheric circulation in northern hemisphere to the accelerated decline of Arctic sea ice: I. the Arctic Oscillation

Wang Hong[1,2], Zhou Xiao[1,2], Huang Fei[1,2,3]

(1. *Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *China*; 2. *Key Laboratory of Ocean-Atmospheric Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *China*; 3. *Ningbo Collabrative Innovation Center of Nonlinear Harzard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo* 315211, *China*)

Abstract: Based on the data of Arctic sea ice concentration from National Snow and Ice Data Center (NSIDC), the variability of Arctic sea ice extent (SIE) from 1979 to 2012 has been analyzed. The result shows that the changes

of Arctic SIE had two decadal shift points in 1997 and 2007 respectively, and experienced three different periods: during 1979－1996, the SIE is downtrend and with strong interannual variability. Arctic Oscillation(AO) is in its strong phase and has low frequency oscillation; during 1997－2006, the interannual variability of SIE is weak but the linear downtrend is strongest. The strength of AO is weakened and AO has shorter period oscillation; during 2007－2012, the sea ice experienced a strongest interannual variability and slower downtrend than in 1997－2006. The interannual variability of AO is stronger that induces two negative anomaly centers move toward Greenland north Atlantic and stretch to Bering Strait, respectively. This pattern is conducive to transport the cold air to the North America and Europe. Experiments with ECHAM5 atmospheric circulation model proved that the strong interannual variability of sea ice is the key for the changes of AO mode for 2007－2012 period.

Key words: Arctic sea ice; Arctic Oscillation; atmospheric circulation; interannual variability; decadal changes