

# 北半球高纬地区年际尺度循环过程中的 气-海-冰相互作用关系<sup>\*1</sup>

刘喜迎<sup>1,2</sup> 刘海龙<sup>2</sup> 李 薇<sup>2</sup> 张学洪<sup>2</sup> 宇如聪<sup>3</sup> 俞永强<sup>2</sup>

1 解放军理工大学气象学院军事气象系, 南京, 211101

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京, 100029

3 中国气象局, 北京, 100081

## 摘 要

基于一个全球气-海-冰耦合模式数值模拟结果, 对北半球高纬度地区年际尺度的气-海-冰相互作用进行了分析。在所使用的全球气-海-冰耦合模式中, 大气环流模式和陆面过程模式来自国家气候中心, 海洋环流模式和海冰模式来自中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室。采用一种逐日通量距平耦合方案实现次网格尺度海冰非均匀条件下大气环流模式和海洋环流模式在高纬地区的耦合。只对 50 a 模拟结果中的后 30 a 结果进行了分析。在分析中, 首先对滤波后的北半球高纬度地区海平面气压、表面大气温度、海表面温度、海冰密集度及海表面感热通量的标准化距平做联合复经验正交函数分解, 取第一模进行重建, 然后讨论了一个循环周期(约 4 a)中北半球高纬度地区气-海-冰的作用关系。结果表明:(1)当北大西洋涛动处于正位相时, 格陵兰海出现南风异常, 使表面大气温度升高, 海洋失去感热通量减少, 海洋表面温度升高, 海冰密集度减小; 当北大西洋涛动处于负位相时, 格陵兰海出现北风异常, 使表面大气温度降低, 海洋失去感热通量增多, 海洋表面温度降低, 海冰密集度增加。巴伦支海变化特点与格陵兰海相似, 但在时间上并不完全一致。(2)多年平均而言, 北冰洋内部靠近极点区域为冷中心。当北冰洋内部为低压异常时, 因异常中心偏向太平洋一侧, 使北冰洋内部靠近太平洋部分为暖平流异常, 靠近大西洋一侧为冷平流异常。伴随着暖、冷平流异常, 这两侧分别出现暖异常和冷异常, 海表面给大气的感热通量分别偏少和偏多, 上述海区海表面温度分别偏高和偏低, 海冰密集度分别偏小和偏大。当北冰洋内部为高压异常时特点正好与上述相反。由上述分析结果可知, 在海洋、大气年际循环中, 大尺度大气环流变率起主导作用, 海洋表面温度和海冰密集度变化主要是对大气环流变化的响应。

**关键词:** 耦合模式, 气-海-冰相互作用, 联合复经验正交函数分解。

## 1 引 言

近年来, 随着极区观测数据的增加以及数据质量的提高, 北极气候越来越得到人们的关注。特别是人们试图从全球气-海-冰系统的自然变率背景中分辨出可能由于人类活动造成的气候变化。随着 1978 年 10 月以后卫星微波遥感海冰数据的投入使用, 数据的连续性有所改善, 而且覆盖范围也得到扩展, 为开展与海冰有关物理过程的研究提供了宝贵资料, 气-海-冰相互作用的研究也得以更加有效地

开展起来。

当前气-海-冰相互作用研究涉及范围很广, 有些研究是建立在局地或区域尺度上, 有些研究在空间上则是扩展至半球甚至是全球。研究方法主要是在观测资料中寻找关系<sup>[1-3]</sup>或探讨大气对海冰异常响应的数值试验<sup>[4-6]</sup>。我们知道, 观测资料分析工作受可用的观测资料限制, 而海冰强迫大气试验是单向作用研究。耦合模式是现实耦合气候系统的简化实现, 由于耦合模式中考虑了气-海-冰作用物理过程, 利用它开展气-海-冰相互作用研究具有独特的

\* 初稿时间: 2005 年 12 月 5 日; 修改稿时间: 2006 年 9 月 25 日。

资助课题: 国家重点基础研究专项经费项目(2005CB32170X)和国家自然科学基金项目(40675065)。

作者简介: 刘喜迎, Email: liuxy@lasg.iap.ac.cn

优势。

根据基于观测的分析结果,大气和海冰的作用关系与时间尺度有关。在年际时间尺度上,对于大气和海冰何者起主导作用问题目前还有一定的争议,较多的观点认为,海冰年际变化是由大尺度大气环流变率造成的<sup>[7-9]</sup>,但也不排除在有些地方大气环流对冰盖变化有响应<sup>[10]</sup>。基于观测资料的分析研究可能存在一个问题,即气-海-冰相互作用的分析会涉及来自不同圈层的资料,而这些资料的来源不同,误差各异,资料间的协调性无法保证,这些问题可能会掩盖气-海-冰间真实存在的关系。在基于耦合模式的研究中,模拟结果各种资料间是协调的,不会存在此问题。但会存在另一个问题,即模拟结果的可信度问题。当前,基于耦合模式的气-海-冰相互作用研究结果还较少。

本文将利用一个考虑了海冰中水道作用的全球大气-海洋-海冰耦合模式的数值模拟结果,采用联合复经验正交函数分解方法对滤波后的物理量场,包括北半球高纬地区海平面气压、表面大气温度、海表面温度、海冰密集度及海表面感热通量进行分解。之后,取第一模进行重建,分析在一个周期循环(约4年)中这些物理量的变化特征以及这些变化间的关系,进而讨论此年际循环过程中气-海-冰相互作用特征。

## 2 模式和分析方法

### 2.1 模式

所用大气环流模式来自国家气候中心<sup>[11]</sup>。该模式在水平方向对预报变量进行谱展开,采用三角形截断,取63波(约 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ )。垂直方向采用混合坐标,除垂直速度外,其他变量均配置在整数层上(上下边界定义为半整数层),其在接近地面层类似于常用的 $\sigma$ 坐标而在平流层为 $p$ 坐标,中间为二者的混合形式。模式大气共分为16层,其中4层位于边界层内。模式中包含一个简单的陆面模式。

所用海洋模式是中国科学院大气物理研究所设计并发展起来的全球海洋环流模式第3版<sup>[12]</sup>。它采用球坐标系下的斜压原始方程组,忽略了科氏力项中的曲率项并取静力近似和 Boussinesq 近似,水平分辨率与大气模式相同(约 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ )。模式上边界取自由面<sup>[13]</sup>,垂直方向上采用 eta 坐标<sup>[14-15]</sup>,模式海洋不等距地分为30层,其中有12层

位于海洋上部300 m以内,以增强对这一部分的描述能力。模式变量水平配置采用B网格方式。海洋模式中包括一个参考 Semnter<sup>[16]</sup>、Parkinson 和 Washington<sup>[17]</sup>方案构造的热力学海冰模式,利用它来模拟海冰密集度分布、海冰厚度以及冰面温度。有人<sup>[18]</sup>曾利用相同的海洋模式与一个考虑热力和动力过程的海冰模式实现冰-海洋耦合。

文中采用一种通量整合方案<sup>[19-20]</sup>描述海冰非均匀性作用,利用较成熟的逐日通量距平耦合方案<sup>[21]</sup>实现了次网格尺度海冰非均匀条件下大气环流模式和海洋环流模式在高纬度地区的耦合,并完成了一个50 a的长期积分。考虑到数值模式初始积分阶段内部调整过程对结果的影响,分析时只使用后30 a结果。

### 2.2 分析方法

首先要对一些物理量做数字滤波,保留年际尺度变化。滤波器构造为

$$Y_t = \sum_{k=-K}^K a_k X_{t+k}$$

这里 $\{a_{-K} \cdots a_K\}$ 是 $2K+1$ 个实数权重系数,且 $a_{-k} = a_k$ 。文中取 $K=48$ ,权重系数 $a_0 \cdots a_{48}$ 取值如表1。

表1 滤波器权重系数

Table 1 Weight coefficients of the digital filter

个位	十位				
	0	1	2	3	4
0	0.022222	0.003781	-0.019227	-0.009189	0.010684
1	0.022001	0.000757	-0.019842	-0.006792	0.013040
2	0.021344	-0.002256	-0.020053	-0.004326	0.013771
3	0.020264	-0.005193	-0.019862	-0.001842	0.011197
4	0.018784	-0.007997	-0.019282	0.000606	0.014319
5	0.016937	-0.010610	-0.018331	0.002968	0.014147
6	0.014761	-0.012981	-0.017036	0.005197	0.013697
7	0.012303	-0.015064	-0.015432	0.007250	0.012989
8	0.009615	-0.016818	-0.013559	0.009090	0.012050
9	0.006755	-0.018214	-0.011462	0.010684	

由此滤波器的频率响应函数图(图略)可知,滤波后主要保留周期为3—5 a的信号。

对过滤后的信号作联合复经验正交函数(CCEOF)分解,取第1模进行重建。这里,作联合分解的目的是为了保证各变量具有相同的初位相,便于分析几个同时变化异常场的联合变率。复经验正交函数(CEOF)分解也称为希尔伯特经验正交函数(Hilbert EOF)方法,它不但具有传统 EOF 分解特点,而且可以检测出数据中的传播特征。关于此

方法的详细细节可参阅文献[22, 23]。这里只给出这种方法的简单说明:对于给定的时间序列首先采用 Hilbert 变换方法使其复化,得到的复序列实部为原序列,虚部为实部的 Hilbert 变换。Hilbert 变换提供原时间序列在某一时刻随时间的变化率信息。然后对复序列进行 EOF 分解。分解后得到的特征向量和时间系数均为复数,可以象传统方法一样对主要模进行重建,一般只对重建后场的实部进行分析即可。

本文中有限时间序列进行 Hilbert 变换估计方法如下:

将时间序列  $x_t$  表示成傅氏展开形式,

$$x_t = \sum_k a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right)$$

其 Hilbert 变换  $\hat{x}_t^H$  估计为,

$$\hat{x}_t^H = \sum_k b_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) - a_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right)$$

首先对海洋表面温度(SST)、海冰密集度(IC)、海平面气压(SLP)、海洋表面感热通量(SHEAT)及表面大气温度(TS,取最低模式层气温)按月求取偏差场,然后利用以上介绍的方法作带通滤波,保留年际尺度信号。对过滤后 5 个偏差场进行标准化,作联合复经验正交函数(CCEOF)分解,之后取第 1 模(解释总方差的 32%)进行重建。CCEOF 分解第 1 模对应的时间系数辐角随时间演变特点(图略)是,随着时间变化,位相从  $360^\circ$  减小到  $0^\circ$ ,之后再从  $360^\circ$  减小到  $0^\circ$ ,如此反复。在  $360^\circ$  区间内,辐角随时间呈准线性变化趋势,时间跨度大约是 4 a。这说明 SST、SLP、SHEAT 和 TS 的联合变化具有准 4 a 周期。选取 8 个辐角,即  $360^\circ$ 、 $315^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $45^\circ$  对重建后的 5 个标准化偏差场进行合成。两个相邻的辐角间时间间隔大约是半年。在此基础上,分析数值模拟结果中大气、海洋(包括海冰)及其相互作用中的年际循环特征。

### 3 大气、海洋及其相互作用中的年际循环

#### 3.1 大气中的年际循环

从 SLP 重建后对应 8 个辐角的合成(图 1)可见,SLP 异常最显著的特征是,纬向对称性的破坏、重建以及北大西洋涛动(NAO)正、负位相的转变。0 年(图 1a)时,高纬度地区主要被一 SLP 正异常区

所占据,此正异常区之外为负异常,这种纬向对称性明显的 SLP 异常很像北极涛动(AO)。随后,位于东西伯利亚的负异常区向北冰洋内部伸展、移动,0.5 年(图 1b)时北冰洋内部已部分被负异常区覆盖,与此同时,大西洋一侧为 NAO 负位相。2 年(图 1e)时,北冰洋负异常区伸展范围达到最大,负异常区之外是正异常区,环流异常型与 0 年正相反,纬向对称性特征重建起来。2.5 年(图 1f)时,位于东西伯利亚的正异常区向北冰洋内部伸展、移动,此时大西洋一侧为 NAO 正位相。3 年(图 1g)时北冰洋内部主要被正异常区所覆盖。之后,正异常区扩展,4 年(0 年)时达到最大,开始了新一轮循环。

从 TS 重建后对应 8 个辐角的合成情况(图 2)可见,北冰洋内部靠近波弗特海、楚科奇海海区 TS 与其他海区 TS 呈相反变化趋势,0—1.5 年时前者为负异常,2—3.5 年时后者为负异常。这种相反趋势是由大气环流变化特点造成的。0 年(图 2a)时,格陵兰海海区 TS 为正异常,巴伦支海部分为负异常。0.5 年(图 2b)时,巴伦支海完全为负异常所覆盖,格陵兰海正异常区开始缩小。之后,格陵兰海负异常区扩展,2.0 年(图 2e)时占据了整个海区,此时巴伦支海海区已部分转变为正异常。之后,正异常区扩展,3.5 年(图 2h)时格陵兰海已全部转变为正异常,而巴伦支海已部分地被负异常区所覆盖,随后又开始了新一轮循环。

#### 3.2 海洋中的年际循环

从 SST 重建后对应 8 个辐角的合成结果(图 3)可见,在北冰洋内部,SST 正(负)异常表现为逆时针传播特征。这种异常的逆时针传播和大气环流异常中心的移动(见图 1)相联系。0 年(图 3a)时,北冰洋内部正异常中心位于  $90^\circ\text{E}$  附近。随后,该异常沿逆时针移动。2 年(图 3e)时,中心移至  $120^\circ\text{W}$  附近,3.5 年(图 3h)时中心移至  $60^\circ\text{E}$  附近。之后,开始一轮新的循环(4 年=0 年)。在正异常沿逆时针移动的同时,北冰洋内部另一负异常区(0 年时最强中心位于  $120^\circ\text{W}$  附近)也沿逆时针方向移动。整个北冰洋内部主要被这一对沿着逆时针方向移动的正、负异常区所覆盖。在格陵兰海、巴伦支海及挪威海,SST 异常呈静止扰动,2.0—2.5 年时为正位相,0.0—0.5 年时为负位相,1 年和 3 年时为转换点。

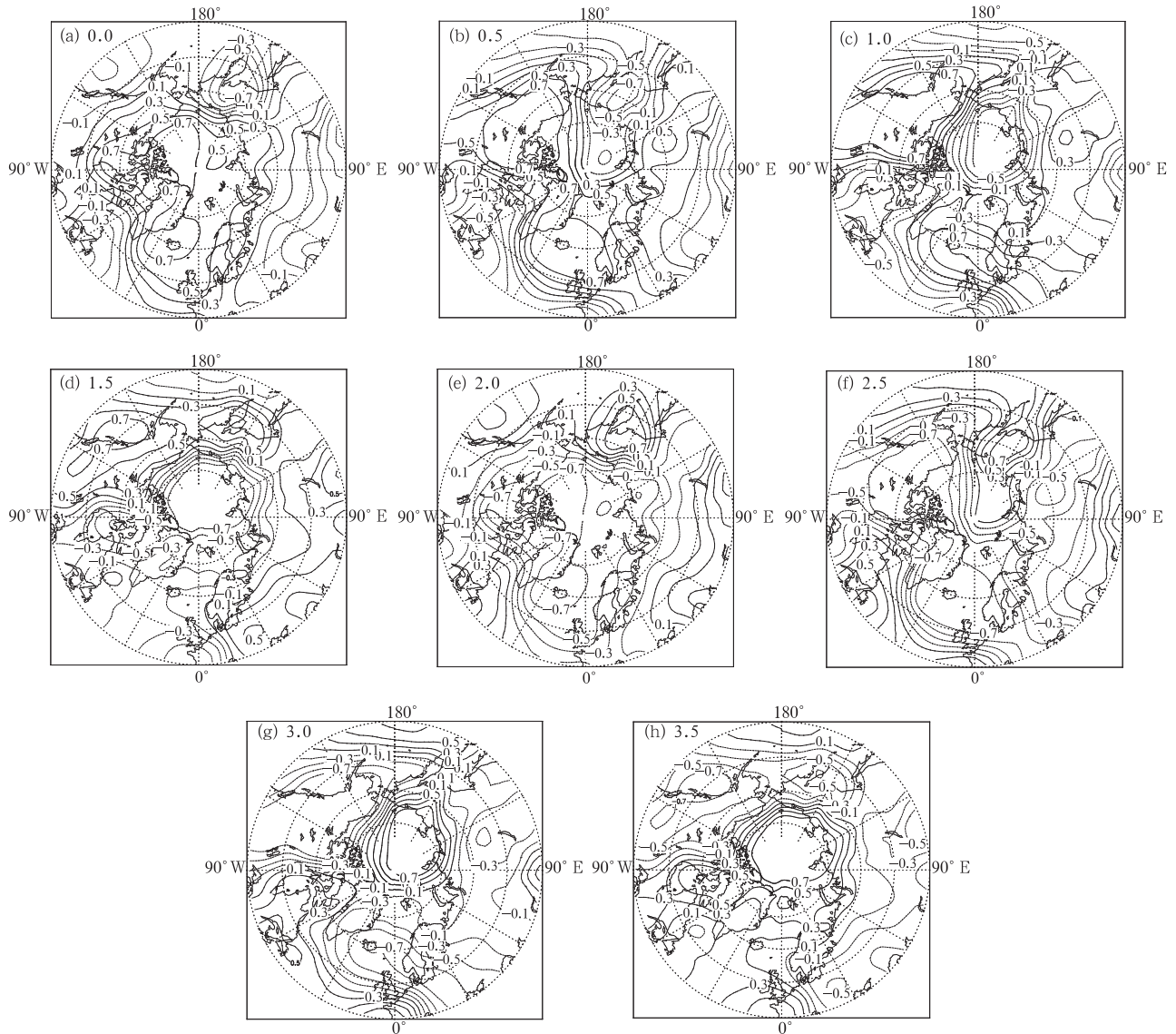


图1 海平面气压重建后对应8个辐角的合成

(a. 0年, b. 0.5年, c. 1年, d. 1.5年, e. 2.0年, f. 2.5年, g. 3.0年, h. 3.5年; 表示在一个循环周期(约4a)里所处的阶段)

Fig. 1 Composites of reconstructed sea level pressure for eight phases. The number below each panel represents the corresponding phase within one cycle

(approximately 4 years; a. 0 year; b. 0.5 year; c. 1 year; d. 1.5 year; e. 2.0 year; f. 2.5 year; g. 3.0 year; h. 3.5 year)

SST异常的符号与北冰洋内部靠近北美大陆一侧的SST异常符号相同。此区域的SST异常变化与北大西洋涛动(NAO)的不同位相相联系。拉布拉多海北部海区和巴芬湾东、西部SST异常呈相反变化趋势,这可能是NAO和海洋过程共同作用的结果,也可能是受模式边界影响的结果。白令海SST异常与北冰洋内部靠近欧亚大陆一侧海洋的变化趋势一致。鄂霍茨克海SST异常符号半数时间与白令海的相同,在变化步调上比白令海变化慢一年。

在模式中,海冰密集度变化主要由SST决定。

当SST高于冰点时,海冰从海水中获得热通量,通过侧向融化海冰密集度减小;当SST低于冰点时,有新冰生成,海冰密集度增大。海冰质量变化后,吸收或释放相变潜热,影响SST变化。在北冰洋内部,伴随着SST正、负异常沿逆时针方向传播,海冰密集度异常表现为负、正异常沿逆时针方向移动(图略)。在格陵兰海和巴伦支海海冰区,与SST异常呈准静止性扰动相联系,海冰密集度异常也呈准静止扰动。与SST异常特点相一致,巴芬湾东、西部海冰密集度异常也呈相反变化趋势。

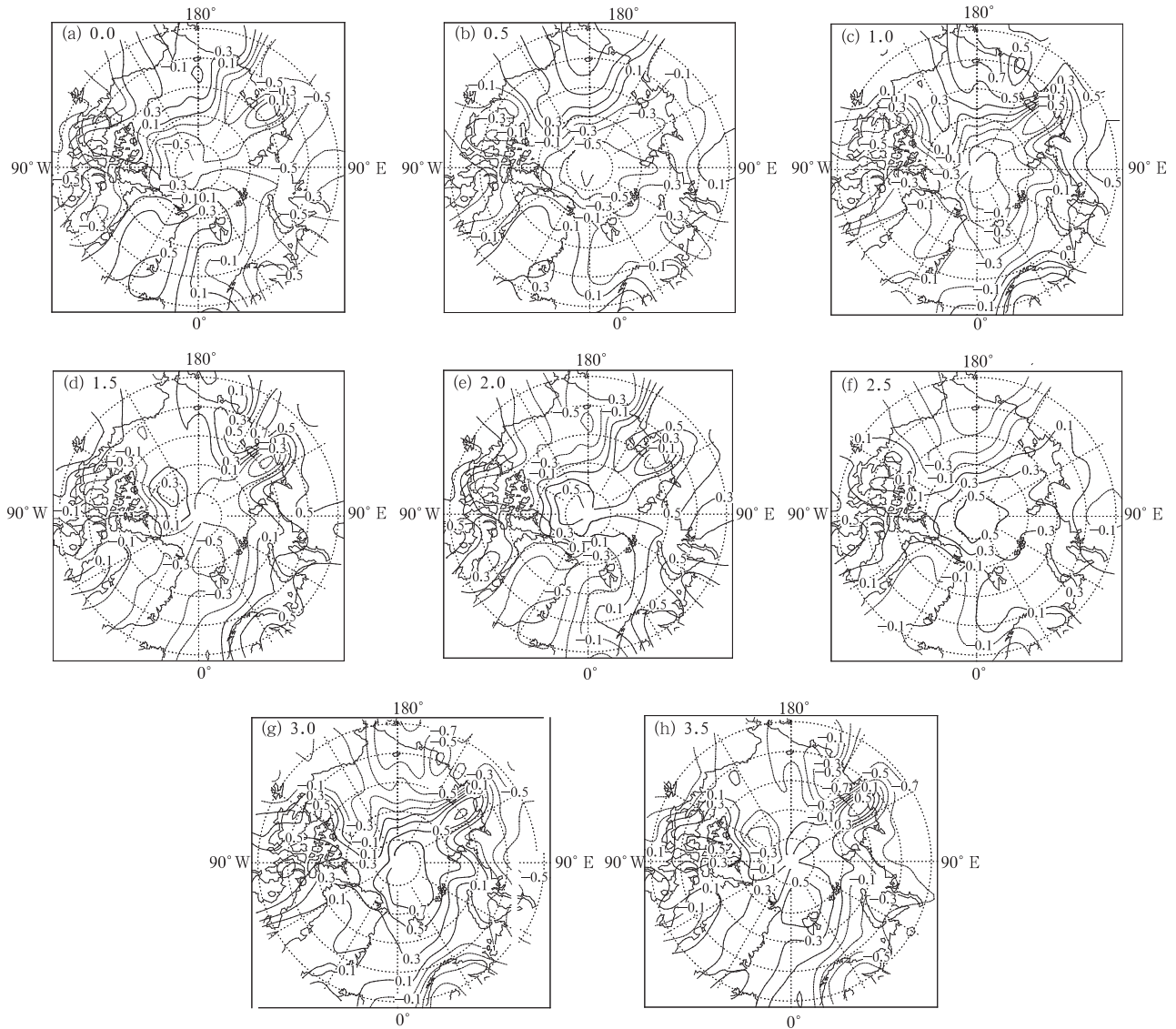


图2 表面大气温度(其他同图1)

Fig. 2 Same as Fig. 1 except for surface air temperature

### 3.3 海气感热通量交换的年际循环

从 SHEAT 重建后对应 8 个辐角的合成结果(图 4)可见,这里 SHEAT 以向下为正,因此,图中负号表示海洋给大气的 SHEAT 为多异常,正号表示海洋给大气 SHEAT 为少异常。北冰洋内部,靠近波弗特海、楚科奇海海区 SHEAT 异常与其他海区的呈相反变化趋势,这是由大气环流造成的。当 TS 升高时,海洋给大气的 SHEAT 减少,反之相反。0—1.5 年时靠近波弗特海、楚科奇海海区给大气的 SHEAT 为少异常,2.0—3.5 年时为多异常。0 年时,巴伦支海海区给大气的 SHEAT 为多异常,格陵兰海、挪威海给大气的 SHEAT 为少异常。之

后,巴伦支海给大气的多异常区开始向格陵兰海、挪威海扩展。2.0 年时这两个海区完全被多异常区所覆盖,而此时巴伦支海已部分地给大气 SHEAT 少异常区所覆盖。然后,这种少异常区开始扩展,3.5 年时格陵兰海、挪威海已完全被给大气 SHEAT 的少异常区所覆盖。这时巴伦支海部分海区给大气 SHEAT 转变为多异常。然后开始新一轮循环。格陵兰海海区海洋给大气 SHEAT 异常变化主要是由大气环流决定的,SHEAT 变化步调与 TS 变化步调基本一致。3.0 年时巴芬湾海洋给大气的 SHEAT 为多异常,0 年时开始减弱(先从东半部分开始),1.0 年时变为少异常。2.0 年时这种少异常开始减弱

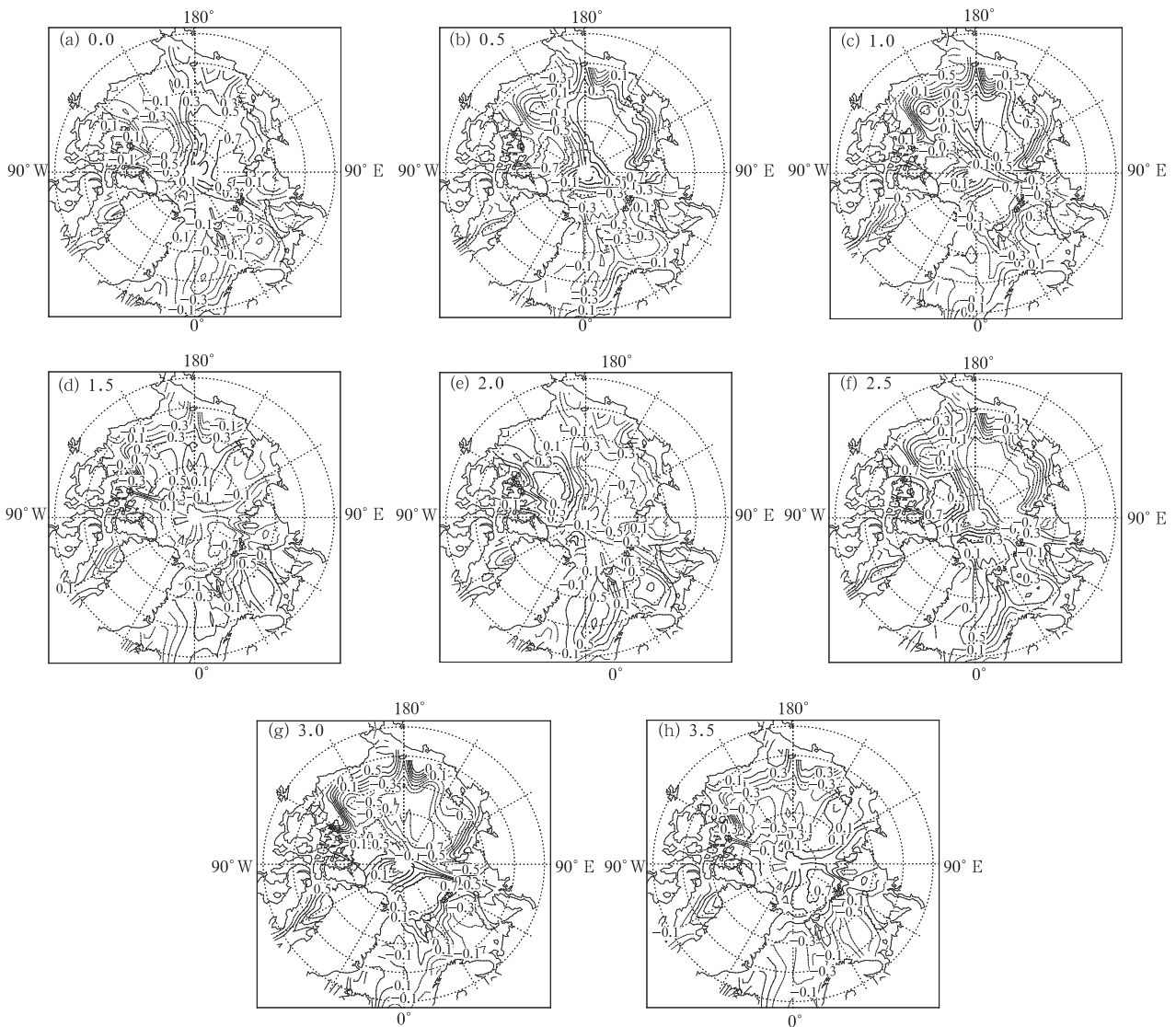


图 3 海表面温度(其他同图 1)

Fig. 3 Same as Fig. 1 except for sea surface temperature

(先从东半部分开始),3.0 年时转变为多异常,开始了新一轮循环。需要说明的是,在巴芬湾海区的海气相互作用中,海洋起主导作用,当海温正异常时,丢失的 SHEAT 偏多,反之相反。

### 3.4 年际尺度循环过程中气-海-冰相互作用特征

前面分析了表征大气、海洋、海冰及气-海相互作用的物理量的年际循环特征。这里着重考查这些物理量变化间的关系,从而分析年际尺度循环过程中气-海-冰相互作用特征。由于不同的区域可能有不同的特点,下面分不同的区域来分析。

#### 3.4.1 格陵兰海和巴伦支海

综合考查图 1—4 可知,当由海平面气压场表征的大气环流特征为 NAO 处于正位相(2.5 年)时,格陵兰海会出现南风异常,使表面大气温度升高,海洋失去感热通量减少,加上北大西洋暖流增强,海洋表面温度升高,海冰密集度减小;当 NAO 处于负位相(0.5 年)时,格陵兰海出现北风异常,使表面大气温度降低,海洋失去感热通量增多,加上北大西洋减弱,海洋表面温度降低,海冰密集度增加。巴伦支海变化特点与格陵兰海相似,但在时间上并不完全一致。

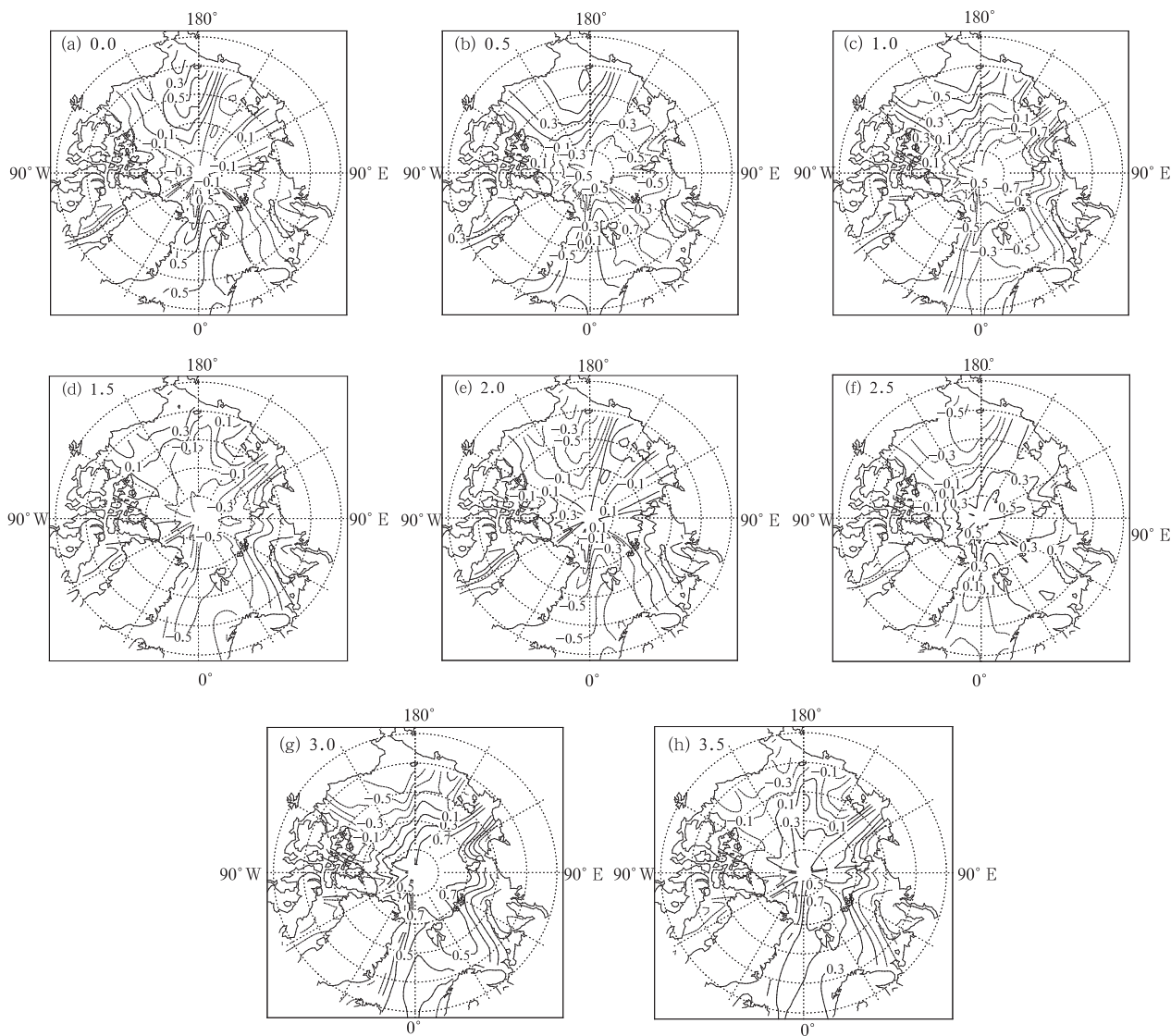


图4 海表面感热通量(其他同图1)

Fig. 4 Same as Fig. 1 except for sea surface sensible heat flux

### 3.4.2 北冰洋内部

由上文分析还可知,多年平均而言,北冰洋内部靠近极点区域为冷中心。当北冰洋内部为低压异常时(1.0、1.5年),因异常中心偏向太平洋一侧,使得北冰洋内部靠近太平洋部分为暖平流异常,靠近大西洋一侧为冷平流异常。伴随着暖、冷平流异常,这两侧分别出现暖异常和冷异常,海表面给大气的感热通量分别偏少和偏多,上述海区海表面温度分别偏高和偏低,海冰密集度分别偏小和偏大。当北冰洋内部为高压异常(3.0、3.5年)时特点正好与上述相反。可见,北冰洋内部海表面温度和海冰密集度变化是由大气环流变化控制的。

### 3.4.3 其他区域

由于白令海、鄂霍茨克海及拉布拉多海夏半年无冰,在做数字滤波时引入的噪声可能对结果性质影响较大,所以这里不作分析。考虑到巴芬湾海区面积较小,可能受模式边界处理影响较大,所以这里也不作进一步分析。

## 4 小结和讨论

本文利用一个全球气-海-冰耦合模式数值模拟结果数据集,试图对北半球高纬度地区年际尺度的气-海-冰相互作用特征进行分析。首先,对北半球高纬度地区海平面气压、表面大气温度、海表面温

度、海冰密集度及海表面感热通量施以滤波处理,然后对其标准化距平做联合复经验正交函数分解,取第 1 模进行重建。在此基础上分析了表征北半球高纬度地区大气、海洋、海冰及气-海相互作用的物理量在一个周期循环(约 4 a)中的变化特点。进而考查这些物理量变化间的关系,分析了格陵兰海和巴伦支海以及北冰洋内部区域年际尺度循环过程中气-海-冰相互作用特征。结果表明,在海洋、大气年际循环中,大尺度大气环流变率起主导作用,海洋表面温度变化主要是对大气环流变化的响应。大气环流变化作用主要通过表面大气温度和风异常对海(冰)气热通量交换的影响来体现。在冰海关系中,主要是海温变化决定海冰密集度变化,但海冰质量变化时要释放或吸收相变潜热,会对海温变化有一定抑制作用。在冰气关系中,冰气热通量变化方向主要由大气环流变化决定,海冰密集度变化对整个格点热通量变化的影响较小。由上述关系造成的结果是,海冰密集度变化主要是对大气环流变化的响应。这一结果与基于观测的相关方法分析结果<sup>[7-8]</sup>相一致。

大气环流变化对海冰影响主要有两种途径,一种是直接驱动海冰移动,另一种是通过温度平流影响海冰生消。有研究表明,北冰洋海冰通过弗拉姆海峡(Fram Strait)的流出通量对格陵兰海的海冰变化有重要影响<sup>[24]</sup>。冬季通过弗拉姆海峡的海冰流出通量受北极大气双极模态异常的调制<sup>[25]</sup>。本文所用模式中没有包含动力学海冰,北半球高纬地区的海-冰和冰-气相互作用只是纯热力上的。如果考虑动力作用引起海冰辐合、辐散对海-冰-气相互作用的影响,或许还会有新的特点。

## 参考文献

- [1] 高登义,武炳义. 北半球海-冰-气系统的 10 年振荡及其振源初探. 大气科学, 1998, 22(2): 137-143
- [2] 蒋全荣,王春红,徐桂玉. 北极 1 区海冰面积变化及其与大气遥相关型的联系. 气象学报, 1996, 54(2): 240-246
- [3] Agnew T. Simultaneous winter sea-ice and atmospheric circulation anomaly patterns. Atmos Ocean, 1993, 31: 259-280
- [4] 黄士松,杨修群. 北极海冰对大气环流与气候影响的观测分析和数值试验研究. 海洋学报, 1992, 14(6): 32-46
- [5] Ni Yunqi, Zhang Qi, Li Yuedong. A numerical study for mechanism of the effect of north summer Arctic ice cover on the global short-range climate. Acta Meteor Sinica, 1992, 6(1): 15-24
- [6] Honda M, Yamazaki K, Nakamura H, et al. Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea ice extent in the sea of Okhotsk. J Clim, 1999, 12: 3347-3358
- [7] Slonosky V C, Mysak L A, Derome J. Linking Arctic sea ice and atmospheric circulation anomalies on interannual and decadal time scales. Atmosphere-Ocean, 1997, 35: 333-366
- [8] 武炳义,黄荣辉,高登义. 与北大西洋接壤的北极海冰和年际气候变化. 科学通报, 2000, 45(18): 1993-1997
- [9] 刘喜迎,张学洪,宇如聪等. 一个海-冰-气耦合模式中格陵兰海海冰年际变异及其成因的个例分析. 大气科学, 2005, 29(5): 795-804
- [10] Deser C, Walsh J E, Timlin M S. Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends. J Clim, 2000, 13: 617-633
- [11] 叶正青,董敏,陈嘉宾. 国家气候中心模式在实际海温条件下模拟的气候//丁一汇. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京:气象出版社, 2000: 70-78
- [12] Jin Xiangze, Zhang Xuehong, Zhou Tianjun. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model. Adv Atmos Sci, 1999, 16: 197-215
- [13] Zhang Xuehong, Chen Keming, Jin Xiangze, et al. Simulation of the thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model. Theoretical Appli Clima, 1996, 55: 65-87
- [14] Messinger F, Janjic Z I. Problems and numerical methods of the incorporation of mountains in atmospheric models. Lectures in Appl Mathe, 1985, 22: 81-120
- [15] 宇如聪. 陡峭地形有限区域数值预报模式设计. 大气科学, 1989, 13(2): 139-149
- [16] Semtner Jr A J. A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate. J Geophys Res, 1976, 6: 379-389
- [17] Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice. J Geophys Res, 1979, 84: 311-337
- [18] 刘钦政,黄嘉佑,白珊等. 全球冰-海洋耦合模式的海冰模拟. 地学前沿, 2000, 27(S2): 219-228
- [19] Grotzner A, Sausen R, Claussen M. The impact of sub-grid scale sea-ice inhomogeneities on the performance of the atmospheric general circulation model ECHAM. Clim Dyn, 1996, 12: 477-496
- [20] 刘喜迎,张学洪,俞永强等. 海冰非均匀条件下大气环流模式和海洋环流模式耦合的实现. 高原气象, 2004, 23(3): 344-347
- [21] Yu Yongqiang, Zhang Xuehong. Schemes for coupling AGCM and OGCM//Zhang Xuehong, Shi Guangyu, Liu Hui, et al. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing: Science Press, 2000: 100-112
- [22] Barnet T P. Interaction of the monsoon and pacific trade wind



- system at interannual time scale. Part I : the equatorial zone. *Mon Weather Rev.*, 1983, 111 : 756-773
- [23] Horel J D. Complex principle component analysis: Theory and examples. *J Clim Appl Meteor.*, 1984, 23: 1660-1673
- [24] Vinje T. Fram strait ice fluxes and atmospheric circulation, 1950-2000. *J Climate*, 2001, 14: 3508-3517
- [25] Wu B Y, Wang J, Walsh J E. Dipole anomaly in the winter arctic atmosphere and its association with sea ice motion. *J Climate*, 2006, 19: 210-225

## NUMERICALLY SIMULATED ATMOSPHERE-OCEAN-SEA ICE INTERACTION IN INTERANNUAL SCALE CYCLES IN HIGH NORTHERN LATITUDES

Liu Xiying<sup>1,2</sup> Liu Hailong<sup>2</sup> Li Wei<sup>2</sup> Zhang Xuehong<sup>2</sup> Yu Rucong<sup>3</sup> Yu Yongqiang<sup>2</sup>

1 *Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*

2 *LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *China Meteorological Administration, Beijing 100081*

### Abstract

The interannual atmosphere-ocean-sea ice interaction in high northern latitudes is studied with a global atmosphere-ocean-sea ice coupled model system, in which the model components of atmosphere and land surface are from National Climate Center of China and that of ocean and sea ice from LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. A daily flux anomaly correction scheme was employed to couple the atmosphere model and the ocean model with the effect of inhomogeneity of sea ice in high latitudes considered. The coupled model system has been run for 50 years and results of the last 30 years were analyzed. After the sea surface temperature (SST), sea ice concentration(SIC), sea level pressure(SLP), sea surface sensible heat flux(SHF) and surface air temperature(SAT) were filtered with a digital filter firstly, their normalized anomalies were used in the decomposition of combined complex empirical orthogonal function and then the anomalies were reconstructed with the leading modes. At last, air-ocean-sea ice interactions in high northern latitudes during a periodical cycle (approximately 4 years) were analyzed. It's shown that when the North Atlantic Oscillation (NAO) is in its positive phase, the southerly wind anomaly appears in Greenland Sea, the SAT increases, the sea losses less sensible heat, the SST increases and the SIC decreases accordingly; when the NAO is in its negative phase, the northerly wind anomaly appears in Greenland Sea, the SAT decreases, the sea losses more sensible heat, the SST decreases and the SIC increases accordingly. There are similar evolutionary features in Barents Sea, but the phase of evolution in Barents Sea is different from that in Greenland Sea. For an average of multi-years, there is a cold centre in the inner part of Arctic Ocean close to the North Pole, which is closer to the Pacific Ocean side when there is a low pressure anomaly in the inner part, the anomalous warm advection of sea water appears in the region closer to the Pacific Ocean side and the anomalous cold advection in the region closer to the Atlantic Ocean side. Accompanying these anomalous warm and cold advectons in these two regions, the warm and cold SST anomalies appear respectively. Accordingly, the SHF from the sea surface to the atmosphere decreases and increases, the SIC decreases and increases in these two regions, respectively. When there is a high pressure anomaly in the inner part of Arctic Ocean, the opposite is true. From the above analysis results, it can be deduced that variability of large scale atmospheric circulation plays a dominant role in interactions of coupled atmosphere-ocean-sea ice, and the variations of SST and SIC mainly responds to changes of atmospheric circulation.

**Key words:** Coupled model, Air-ocean-sea ice interaction, Combined complex empirical orthogonal function decomposition.