

# 一个冰气相互作用数值模拟结果的可能统计解释

刘喜迎<sup>1,2</sup> 刘海龙<sup>2</sup> 李 薇<sup>2</sup> 张学洪<sup>2</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

**摘 要** 基于一个全球海-冰-气耦合模式的数值模拟结果, 选取冬季格陵兰海表面温度 (SST)、海冰密集度、海表面感热通量等物理量以及 3 个相关区域海平面气压分别作经验正交函数展开, 取第一模时间系数作相关分析。结果表明, 上一年海冰密集度偏大 (小) 与来年的 SST 偏低 (高) 相联系, 但二者同期相关性最大。当海气热通量交换变化超前一年时, 其与 SST 相关性最大。模式最低层大气温度与海洋表面热通量之间的同时相关性最大, 冬季模式最低层气温偏高 (低) 与海洋表面失去的感热、潜热通量偏少 (多) 相联系。气温、比湿都和冰岛低压区及格陵兰海的海平面气压相关性最强, 冰岛低压气压偏低 (高) 与模式最低层气温和比湿偏高 (低) 相联系。所以, 在海-冰-气年际尺度的相互作用中, 主要关系是大气环流调整造成大气中云量和低层气温、湿度变化, 进而影响海气界面上的通量交换, 造成 SST 的变化。SST 变化决定着海冰范围及海冰密集度的变化, 但海冰变化时通过相变潜热的释放或吸收反过来对 SST 变化有较明显影响。

**关键词** 耦合模式 海-冰-气相互作用 格陵兰海

**文章编号** 1006-9585 (2007) 05-0638-09 **中图分类号** P461.6 **文献标识码** A

## Possible Interpretations of Statistics of Simulated Interannual Sea Ice-Atmosphere Interactions in Greenland Sea

LIU Xi-Ying<sup>1,2</sup>, LIU Hai-Long<sup>2</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, ZHANG Xue-Hong<sup>2</sup>, and YU Yong-Qiang<sup>2</sup>

1 *Institute of Meteorology, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 211101*

2 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** Statistical relationships between principal component time series of the leading empirical orthogonal functions of several physical quantities (sea surface temperature, sea ice concentration, surface sensible heat flux and so on in winter) in Greenland Sea are analyzed from the last 30 years' result of a 50 years' integration experiment with LASG/NCC (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences/China National Climate Center) global coupled model. It is shown that positive (negative) anomalies of sea ice concentration in the former year are connected with negative (positive) anomalies of sea surface temperature in the following year and they have the biggest correlation in the same year. Air temperature at the lowest model layer have the biggest correlation with sea surface heat flux in the same year and positive (negative) anomalies of air temperature are connected with negative (positive) surface sensible and latent heat flux anomalies sent to the air. Both air temperature and air humidity at the

**收稿日期** 2006-07-13 收到, 2007-06-08 收到修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目 2005CB32170X 和国家自然科学基金项目 40675065

**作者简介** 刘喜迎, 男, 1970 年出生, 博士, 副教授, 主要从事高纬气候数值模拟研究工作。E-mail: liuxy@lasg.iap.ac.cn

lowest model layer have the biggest correlation with sea level pressure in the area covering Icelandic low and Greenland Sea and negative (positive) anomalies of Icelandic low are connected with positive (negative) anomalies of air temperature and humidity. So, in the course of interannual sea-sea ice-atmosphere interaction, the dominant relation is that, adjustments of atmospheric general circulation cause the changes of cloud, air temperature and humidity, which influence the flux exchange through interface of sea and air and give contribution to the variation of sea surface temperature. Variation of sea surface temperature causes variation of ice extent and ice concentration, whereas variation of ice masses can also play discernable influences on sea surface temperature through absorption or release of latent heat. The influence of ice extent variation on sea surface net solar radiation is obvious whereas its further effect on surface air temperature (i. e., positive ice-albedo feedback effect) is not discernable. It should be pointed out that the sea ice model used here doesn't include dynamic processes. Hence the interaction of sea-sea ice and ice-air deployed in the model are nearly pure thermodynamic in high northern latitudes. If the effects of ice motion on sea-sea ice-air interaction are considered, new features might appear.

**Key words** coupled model, sea-sea ice-air interaction, Greenland Sea

## 1 引言

当前海-冰-气相互作用研究涉及范围很广，有些是建立在局地或区域尺度上，有些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>。观测资料分析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海-冰-气作用物理过程，利用它开展海-冰-气相互作用研究具有独特的优势。

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。在较短的时间尺度上（如几周）大气通过表面风异常和温度异常驱动海冰的异常变化<sup>[7]</sup>。在年际时间尺度上，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>[8~10]</sup>，但也不排除在有些地方大气环流对冰盖变化有响应<sup>[11]</sup>。在更长的时间尺度上（年代和年代际），较早的研究推测海冰可能在气候变化中起主导作用<sup>[12]</sup>，但后来有研究结果<sup>[13]</sup>表明，在年代时间尺度上主要是大气强迫海冰，在年代际时间尺度上看不出哪一种强迫作用居主导地位。Mysak 等<sup>[14]</sup>曾提出了一个描述年代尺度海-冰-气相互作用的反馈循环。

格陵兰海海冰区是北半球冬季年际变率最大的海冰区之一，得到了广泛关注。一个基于数值模拟的个例分析结果表明<sup>[10]</sup>，在年际时间尺度上海-冰-气相互作用关系主要是大气起强迫作用，还

表面温度（SST）和海冰变化是对大气变化的响应。在同一海冰区，基于再分析资料 Wu 等<sup>[15]</sup>侧重于大气边界层分析了冬季海冰异常对大气的影 响，并指出了海冰反馈的可能机制。

本文将利用一个考虑了海冰中水道作用的全球海洋-大气耦合模式的模拟结果，分析冬季格陵兰海海冰区年际尺度长期海-冰-气作用关系。模式和分析方法将在文章第二部分给出。文章第三部分给出分析结果，最后一部分为小结和讨论。

## 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>[16]</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三代版本<sup>[17]</sup>。它采用球坐标系下的斜压原始方程组，忽略了科里奥利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>[18]</sup>，垂直方向上采用  $\eta$  坐标<sup>[19,20]</sup>，模式中海洋不等距

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由参考文献 [21, 22] 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。刘钦政等<sup>[23]</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>[24,25]</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>[26]</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地区的耦合,并完成了 50 年的长期积分。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 年结果。

2.2 分析方法

由模拟结果分析北半球高纬海冰特征<sup>[27]</sup>可知,冬季格陵兰海海冰区年际变率最大。为了从总体上把握海-冰-气相互作用中不同过程作用程度上的差别,以格陵兰海海区为例采用以下方法进行分析。

选取冬季(定义为 1、2 和 3 月)平均格陵兰海(65~80°N, 20°W~5°E) SST、海冰密集度、海表面感热通量、海表面潜热通量、海表面净长波辐射通量、海表面净短波辐射通量、模式最低层大气温度、模式最低层大气比湿以及 3 个相关区域(55~90°N, 45°W~5°E)、(55~65°N, 45°W~0°)和(65~80°N, 20°W~5°E)海平面气压分别作经验正交函数(EOF)展开,取第一模时

间系数作相关分析。在此基础上说明格陵兰海海冰区年际尺度海-冰-气作用关系。

3 格陵兰海海冰区年际尺度海-冰-气作用关系分析

表 1 为各物理量作 EOF 展开后第一模所能解释的总方差以及相应空间分布各网格点数值的符号。需要注意的是海表面热通量取值以向下为正。可以看出,EOF 展开第一模至少能解释总方差的 55%以上,而且相应的空间分布具有基本一致的变化趋势。各物理量 EOF 展开第一模时间系数均具有显著的年际变化(作为示例,这里只给出冬季海表面大气温度结果,如图 1 所示)。

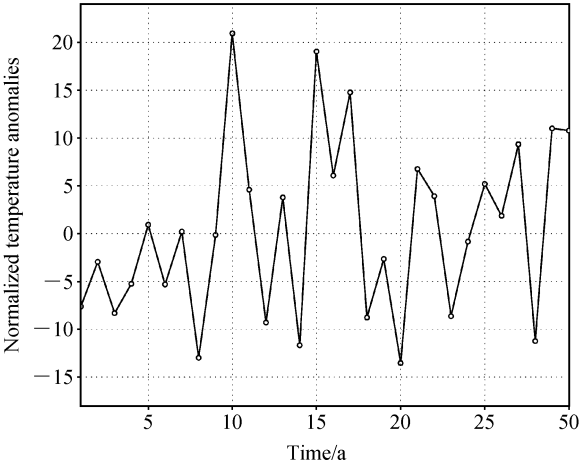


图 1 冬季海表面大气温度 EOF 展开第一模对应的时间系数  
Fig.1 Time series of the leading mode of EOF for winter surface air temperature

表 1 一些物理量 EOF 展开后第一模解释的总方差及相应空间分布特点

Table 1 Depicted total variances and spatial patterns of the leading mode of EOF expansions for some physical variables

| 变量                       | 解释的总方差/% | 各网格点数值的符号            |
|--------------------------|----------|----------------------|
| SST                      | 55.3     | 基本正值(负值区所占范围很小,位于边缘) |
| 海冰密集度                    | 59.9     | 基本负值(正值区所占范围很小,位于边缘) |
| 海表面潜热通量                  | 75.6     | 负值                   |
| 海表面感热通量                  | 76.2     | 负值                   |
| 海表面净长波辐射通量               | 72.4     | 正值                   |
| 海表面净短波辐射通量               | 55.0     | 正值                   |
| 海表面净热通量                  | 78.5     | 正值                   |
| 模式最低层大气温度                | 77.7     | 负值                   |
| 模式最低层大气比湿                | 79.3     | 正值                   |
| 海平面气压(55~90°N, 45°W~5°E) | 59.9     | 基本负值(正值区所占范围很小,位于边缘) |
| 海平面气压(55~65°N, 45°W~0°)  | 73.4     | 负值                   |
| 海平面气压(65~80°N, 20°W~5°E) | 91.6     | 负值                   |

表 2 SST 与海冰密集度相关系数

Table 2 Correlation coefficients between sea surface temperature and sea ice concentration

| 海洋表面温度超前时间/a | 相关系数   |
|--------------|--------|
| −1           | −0.169 |
| 0            | 0.726  |
| +1           | 0.222  |

注：“−”表示超前，“+”表示落后，后面的数字表示年数，0 表示同时相关（下同）

求取各物理量 EOF 展开第一模时间系数之间的相关系数。由表 2 可知，冬季平均 SST 与海冰密集度同时相关性最强。参照表 1 可知，当 SST 偏高（低）时，海冰密集度偏小（大）。此外，由表 1 和 2 还可知，上一年海冰密集度偏大（小）与接下来一年的 SST 偏低（高）相联系。表 3 是 SST 与海洋表面热通量之间的相关系数。其中最显著的特征是当 SST 滞后 1 年时与海表面热通量相关性最强。而且，净热通量作用方向与各分量的作用方向一致。

参照表 1，表 3 的关系可归纳如下：

(1) 冬季 SST 偏高，则上一年、同年冬季海洋表面感热通量失去偏少（多），潜热通量失去偏少（多）；海洋表面得到净短波辐射通量偏多（少），失去净长波辐射通量偏少（多）。

(2) 冬季 SST 偏高，则下一年冬季海洋表面感热通量失去偏多（少），潜热通量失去偏多（少）；海洋表面失去净长波辐射通量偏多（少）。

这表明，在格陵兰海冬季海（冰）气相互作用中，大气和海洋所扮演的角色都很活跃。SST 与净短波辐射通量相关系数最小（海表面净短波辐射通量 EOF 展开第一模所能解释的总方差也最小），这也与前面的个例分析结果一致；当海气热

通量交换变化超前 1 年时，其与 SST 相关性最大。这表明海（冰）气关系中更多地是大气变化在先，海洋变化在后，即大气起驱动作用。当 SST 变化超前 1 年时，其与海洋表面感热通量、潜热通量和净长波辐射通量的相关系数也较大，甚至比同时相关系数大，而关系正相反。结合上述归纳（1），说明海洋对大气的反馈作用也是很明显的，只是与大气强迫作用相比而言要小一些。所以在一般的分析中容易看到的关系是大气强迫，海洋（海冰）响应。

表 4 是模式最低层大气温度与海洋表面热通量之间的相关结果。可以看出，同时相关性最大，而且明显比超前或滞后时的大很多。这是很自然的，因为大气内部过程是快过程。

参照表 1，表 4 的关系可归纳为：冬季模式最低层气温偏高，则冬季海洋表面感热通量失去偏少（多），得到的净短波辐射通量偏多（少），失去的净长波辐射通量偏少（多）。

与前面的结果相对照表明，热通量的变化主要是由大气过程引起的。当冬季大气低层增温（降温）时，海气温差减小（增大），使得海洋表面失去的感热通量偏少（多）；同时，大气中的云量增加（减少），向下的长波辐射增加（减少），海表面失去的净长波辐射通量偏少（多）。而海洋表面得到的净短波辐射通量偏多（少）可能主要与海冰密集度偏小（大）有关，反映了海冰对大气的反馈作用。但相比较而言，这种反馈作用不强（相关系数小，海表面净短波辐射通量 EOF 展开第一模所能解释的总方差也最小）。

模式最低层大气比湿与海洋表面潜热通量之间的关系也是同时相关性最大（见表 5），而且明

表 3 SST 与海洋表面热通量之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between sea surface temperature and sea surface heat fluxes

| 超前时间/a | 相关系数   |        |         |         |                           |
|--------|--------|--------|---------|---------|---------------------------|
|        | 感热通量   | 潜热通量   | 净短波辐射通量 | 净长波辐射通量 | 感热通量+潜热通量+净短波辐射通量+净长波辐射通量 |
| −2     | 0.019  | 0.064  | 0.051   | 0.135   | −0.059                    |
| −1     | 0.356  | 0.371  | −0.026  | −0.281  | −0.338                    |
| 0      | −0.327 | −0.276 | 0.244   | 0.272   | 0.327                     |
| +1     | −0.459 | −0.505 | 0.298   | 0.389   | 0.470                     |
| +2     | −0.246 | −0.210 | −0.071  | −0.111  | 0.226                     |

表 4 模式最低层大气温度与海洋表面热通量之间的相关  
Table 4 Correlation coefficients between air temperature at the lowest model level and sea surface heat fluxes

| 超前时间/a | 相关系数   |         |         |
|--------|--------|---------|---------|
|        | 感热通量   | 净短波辐射通量 | 净长波辐射通量 |
| −1     | −0.161 | −0.050  | 0.059   |
| 0      | 0.949  | −0.514  | −0.888  |
| +1     | 0.013  | −0.082  | 0.104   |

表 5 模式最低层大气比湿与海洋表面潜热通量之间的相关  
Table 5 Correlation coefficients between air specific humidity at the lowest model level and sea surface latent heat fluxes

| 超前时间/a | 相关系数   |
|--------|--------|
| −1     | 0.168  |
| 0      | −0.924 |
| +1     | −0.185 |

表 6 不同区域海平面气压与模式最低层大气温度、比湿之间的相关

Table 6 Correlation coefficients between sea level pressure indifferent regions and air temperature and specific humidity at the lowest model level

| 海洋区域                | 与气温的相关系数 | 与比湿的相关系数 |
|---------------------|----------|----------|
| (55~90°N, 45°W~5°E) | −0.130   | 0.364    |
| (55~65°N, 45°W~0°)  | −0.130   | 0.293    |
| (65~80°N, 20°W~5°E) | −0.114   | 0.354    |

显比一方超前或滞后时大得多。同模式最低层大气温度与海洋表面潜热通量之间的关系相同，这也是必然的，因为大气内部过程是快过程。

参照表 1，表 5 的关系可归纳为：冬季模式最低层大气比湿偏高（低）则冬季海洋表面失去的潜热通量偏少（多）。

这表明，潜热通量的变化主要是由大气过程引起的。当冬季大气低层增湿（变干）时，海气比湿差减小（增大），海洋表面失去的潜热通量偏少（多）。

前面的分析表明，在格陵兰海冬季年际尺度海气相互作用中，更多地是大气起驱动作用，即首先大气环流发生调整，造成大气中云量和低层气温、湿度变化，进而影响海气界面上的通量交换，驱动海洋表面温度向大气变化响应。当然，对于高纬地区的海气通量交换而言，低层风速大小变化的影响是很大的。由于确定风速大小的变化很困难，这里对此不作讨论。

为了确定大气环流变化与大气中低层气温、湿度变化的关系，取不同区域的海平面气压与模式最低层气温、比湿作相关，结果如表 6 所示。

这里（55~90°N, 45°W~5°E）主要包括格陵兰海和冰岛低压区（1 区），（55~65°N, 45°W~0°）主要包括冰岛低压区（2 区），（65~80°N, 20°W~5°E）主要包括格陵兰海（3 区）。由表 6 结果可知，气温、比湿都和最大范围区（1 区）的相关性最强，但需要注意到 1 区海平面气压作 EOF 展开时第一模所能解释的总方差（见表 1）小于 2 区和 3 区的。所以，综合而言，冰岛低压区海平面气压与格陵兰海表面大气温度相关性最

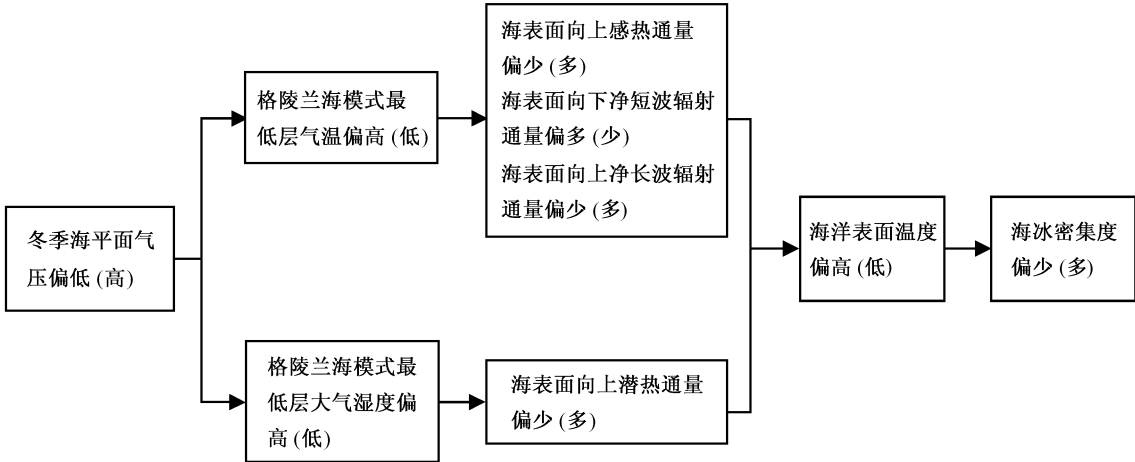


图 2 模式物理量间关系归纳结果示意图  
Fig. 2 Schema of deduced relationships between physical fields in model results

强。相比较而言，大气比湿与海平面气压的相关性更大一些，似乎表明模式最低层大气比湿受大气环流变化的影响更大一些，这可能和气温、比湿配置不同有关。

结合表 1，表 6 关系可归结为：冬季冰岛低压气压偏低（高），则模式最低层气温偏高（低），大气比湿偏高（低）。

综合前面的分析，可归结关系如图 2。由图可知，当冬季海平面气压偏低（高），冰岛低压加深（减弱）时，格陵兰海区的暖、湿平流增强（减弱）使该地区大气低层增温增湿（减温减湿），海表面丢失的感热通量和潜热通量减少（增多），海洋表面温度升高（降低），通过冰-海作用关系，海冰密集度减少（增多）。其中，当海洋表面温度变化滞后 1 年时，与感热通量、潜热通量变化相关最强。在海-冰-气这种年际尺度的相互作用过程中，大气驱动作用为主，海洋表面温度（海冰密集度）变化主要是对大气驱动作用的响应。但在这种关系之下，海洋（海冰）的反馈作用也很明

显（正如归纳的表 3 关系（2）所示）。正是由于海洋（海冰）的这种反馈作用，使得大气环流的变化受到调制。而格陵兰海海（冰）气系统的变化方向似乎主要是由大气环流控制的。由前面的分析还可知，海冰变化对海表面净短波辐射通量影响较明显（即所谓的高纬海冰反照率正反馈作用），但与大气强迫作用相比较而言，这种反馈作用并不强。

在以上分析中，均是在局地求取相关系数，探寻局地区域相互联系及可能的因果关系。格陵兰海区海（冰）气相互作用与北半球高纬整个地区大气环流有什么样的关系？是否在局地相关性最强？为此，求取冬季格陵兰海区感热通量和海冰密集度距平 EOF 展开第一模时间系数（在前面求取表 1 结果时已求出）和表面大气温度（用模式最低层气温表征）的相关系数。结果表明（见图 3），感热通量与表面大气温度的最大相关中心位于格陵兰海、挪威海区域，相关系数绝对值大于 0.8，负相关区域之外为正相关区。注意到感热

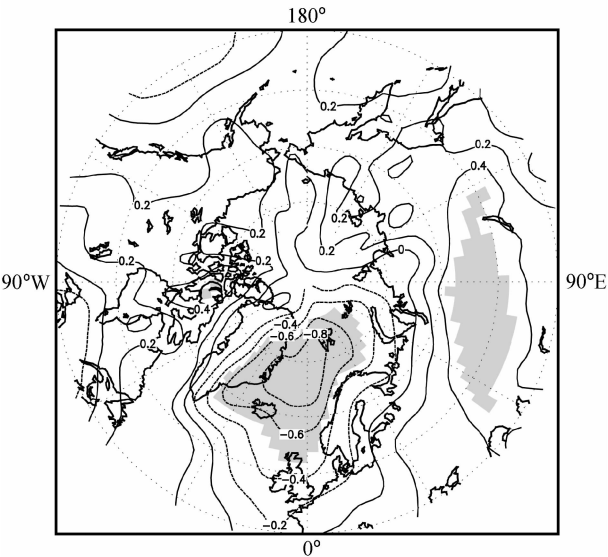


图 3 冬季格陵兰海（65~80°N，20°W~5°E）感热通量距平 EOF 展开第一模时间系数（解释总方差 76.2%）与 45°N 以北地区表面大气温度的相关（阴影区相关在 99%置信度以上）  
Fig. 3 Distribution of correlation coefficients between time series of the leading mode of EOF (which depicts 76.2% of the total variance) for winter sensible heat flux anomaly in Greenland Sea (65—80°N, 20°W—5°E) and surface air temperature north of 45°N. The area with correlation above 99% confidence level has been shaded

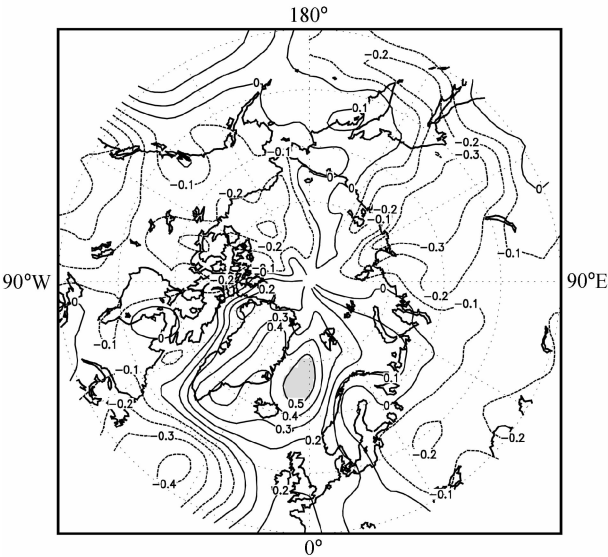


图 4 冬季格陵兰海（65~80°N，20°W~5°E）海冰密集度距平 EOF 展开第一模时间系数（解释总方差 59.9%）与 45°N 以北地区表面大气温度的相关（阴影区相关在 99%置信度以上）  
Fig. 4 Distribution of correlation coefficients between time series of the leading mode of EOF (which depicts 59.9% of the total variance) for winter sea ice concentration anomaly in Greenland Sea (65—80°N, 20°W—5°E) and surface air temperature north of 45°N. The area with correlation above 99% confidence level has been shaded

通量符号以向下为正,参考表 1 可知,格陵兰海向上的感热通量多(少)异常与格陵兰海和挪威海区域表面温度偏低(高)相联系,与新西伯利亚地区表面大气温度偏高(低)相联系。此结果再次表明,在格陵兰海主要是大气强迫起主导作用。挪威海区域表面大气温度与格陵兰海感热通量具有显著相关关系且与格陵兰海海区的符号相同说明格陵兰海和挪威海区域的大气环流变化趋势一致。实际上,在大气环流变化过程中这两个区域是一个整体,均与冰岛低压的变化相联系。至于格陵兰海感热通量与新西伯利亚地区表面大气温度的关系,是因为在冬季  $45^{\circ}\text{N}$  以北表面大气温度距平 EOF 展开第一和第三模结果(共解释总方差的 45%)中,格陵兰海地区与新西伯利亚地区呈相反变化趋势(图略)。这可能仍和北大西洋涛动有关。本文还计算了感热通量 EOF 展开第一模时间系数与 850 和 500 hPa 气温的关系(图略),定性关系仍与此相似。冬季格陵兰海海冰密集度距平 EOF 展开第一模时间系数与  $45^{\circ}\text{N}$  以北地区表面大气温度关系如图 4 所示,最大相关中心仍位于格陵兰海。结合表 1 可知,冬季格陵兰海海冰密集度负(正)异常与该地区表面大气温度偏高(低)相联系。这一关系仍表明,海冰密集度变化主要是对大气环流变化的响应。在 99% 置信度水平上其他地区的相关均不显著。

## 4 小结与讨论

本文选取模拟结果中冬季年际变率最大的海冰区——格陵兰海海冰区为研究对象,利用简单的相关分析方法分析了该地区海洋、海冰和大气之间的关系以及该地区海洋、海冰与北半球高纬大气之间的关系。

分析结果表明,当冬季海平面气压偏低(高),冰岛低压加深(减弱)时,格陵兰海海区的暖、湿平流增强(减弱)使该地区大气低层增温增湿(减温减湿),海表面丢失的感热通量和潜热通量减少(增多),海洋表面温度升高(降低),通过冰-海作用关系,海冰密集度减少(增多)。其中,当海洋表面温度变化滞后 1 年时,与感热通量、潜热通量变化相关最强。在海-冰-气这种年际尺度的相互作用过程中,大气驱动作用为主,

海洋表面温度(海冰密集度)变化主要是对大气驱动作用的响应。但在上述的这种关系之下,海洋(海冰)的反馈作用也很明显。正是由于海洋(海冰)的这种反馈作用,使得大气环流的变化受到调制。而格陵兰海海(冰)气系统的变化方向似乎主要是由大气环流控制的。由分析还可知,海冰变化对海表面净短波辐射通量影响较明显。但因冬季太阳辐射少,海冰变化进一步对气温的影响(即所谓的高纬海冰反照率正反馈作用)并不明显,与大气施于海洋的强迫作用相比较而言,这种反馈作用并不强。此结果与基于同一模拟资料数据集的 4 年海冰剧烈变化过程个例的分析结论<sup>[10]</sup>以及基于再分析数据集 ERA40 的结果<sup>[28]</sup>相似。

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。曾有研究结果表明大气环流及其变化是造成北极楚克奇海域强逆温及其变化的主要原因<sup>[29]</sup>。还有研究表明,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>[30]</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>[31]</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 (References)

- [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**: 137~143  
Gao Dengyi, Wu Bingyi. Preliminary study on decadal oscillation and its oscillation source of the sea-ice-air system in the Northern Hemisphere. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22**: 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**: 240~246  
Jiang Quanrong, Wang Chunhong, Xu Guiyu. Variation of sea ice area in zone 1 of the Arctic and its connections with atmospheric teleconnection patterns. *acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54**: 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**: 30~46  
Huang Shisong, Yang Xiuqun. Observation data analysis and numerical simulation of sea ice effects in the Arctic on atmospheric circulation and climate. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1992, **14**: 30~46
- [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 Meteorologica Sinica*, 1992, **6**: 5~24
- [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. Climate*, 1999, **12**: 3347~3358
- [7] Fang Z, Wallace J M. Arctic sea ice variability on a timescale of weeks and its relation to atmospheric forcing. *J. Climate*, 1994, **7**: 1897~1914
- [8] Slonosky V C, Mysak L A, Derome J. Linking Arctic sea ice and atmospheric circulation anomalies on interannual and decadal time scales. *Atmos. -Ocean*, 1997, **35**: 333~366
- [9] 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**: 1993~1997  
Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. North polar sea ice joint North Atlantic Ocean and interannual climate change. *Chinese Science Bulletins* (in Chinese), 2000, **45**: 1993~1997
- [10] 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**: 795~804  
Liu Xiying, Zhang Xuehong, Yu Rucong, et al. A case study of interannual anomaly of sea ice variation in Greenland Sea in an ocean-sea ice-atmosphere coupled model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 795~804
- [11] Deser C, Walsh J E, Timlin M S. Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends. *J. Climate*, 2000, **13**: 617~633
- [12] Walsh J E. The role of sea ice in climatic variability: Theories and evidence. *Atmos. -Ocean*, 1983, **21**: 229~242
- [13] Yi D, Mysak L A, Venegas S A. Decadal-to-interdecadal fluctuation of Arctic sea-ice cover and the atmosphere circulation during 1954~1994. *Atmos. -Ocean*, 1999, **37**: 389~415
- [14] Mysak L A, Venegas S A. Decadal climate fluctuations in the Arctic: A new feedback loop for atmosphere-ice-ocean interactions. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 3607~3610
- [15] Wu B Y, Wang J, Walsh J E. Possible feedback of winter sea ice in the Greenland and Barents Seas on the local atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132**: 1868~1876
- [16] 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. 见: 丁一汇, 等编. 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  
Ye Zhengqing, Dong Min, Chen Jiabin. Climate simulated under observed sea surface temperature with an AGCM from National Climate Center. In: *Study and Design of Operational Dynamic Model for Short Range Climate Prediction* (in Chinese), Di Yihui, et al. Eds. Beijing: China Meteorological Press, 2000. 70~78
- [17] 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
- [18] Zhang Xuehong, Chen Keming, Jin Xiangze, et al. Simulation of the thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model. *Theore. Appl. Climatol.*, 1996, **55**: 65~87
- [19] Messinger F, Janjic Z I. Problems and numerical methods of the incorporation of mountains in atmospheric models. *Lectures in Applied Mathematics*, 1985, **22**: 81~120
- [20] 宇如聪. 陡峭地形条件下有限区域数值预报模式的设计. 大气科学, 1989, **13**: 139~149  
Yu Rucong. Design of the limited area numerical weather prediction model with steep mountains. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1989, **13**: 139~149
- [21] 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
- [22] Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 311~337
- [23] 刘钦政, 黄嘉佑, 白珊, 等. 全球冰-海洋耦合模式的海冰模拟. 地学前缘, 2000, **7**: 219~228  
Liu Qinzhen, Huang Jiayou, Bai Shan, et al. Simulated sea ice in a global ice-sea coupled model. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2000, **7**: 219~228
- [24] 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. *Climate Dyn.*, 1996, **12**: 477~496
- [25] 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**: 344~347  
Liu Xiying, Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, et al. Coupling of atmospheric general circulation model with oceanic general circulation model under sub-grid scale sea ice inhomogeneities. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23**: 344~347
- [26] Yu Yongqiang, Zhang Xuehong. Schemes for coupling AGCM and OGCM. In: *IAP Global Ocean-Atmosphere-*

*Land System Model*. Zhang Xuehong, Shi Guangyu, Liu Hui, et al. Eds. Beijing: Science Press, 2000. 100~112

[27] 刘喜迎, 张学洪, 俞永强. 北半球高纬海冰主要气候特征的全局海-冰-气耦合模式数值模拟. *地学前缘*, 2003, **10**: 419~426

Liu Xiyi, Zhang Xuehong, Yu Yongqiang. Simulated major climatic features of sea ice in high northern latitudes in a globally sea-sea ice-air coupled model. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, **10**: 419~426

[28] 刘喜迎. ERA40 中北半球高纬地区冬季气候变化和冰-气相互作用特征分析. *极地研究*, 2005, **17**: 203~214

Liu Xiyi. Winter climate change and characteristic of sea ice-atmosphere interaction in northern high latitudes from the ERA40. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 2005, **17**: 203~214

[29] 周立波, 刘宇, 邹捍. 北极地区楚克奇海域一次强逆温过程的分析. *气候与环境研究*, 2003, **8**: 188~195

Zhou Libo, Liu Yu, Zou Han. An analysis of a strong temperature inversion process over the Chukchi Sea region in Arctic. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8**: 188~195

[30] Vinje T. Fram strait ice fluxes and atmospheric circulation: 1950-2000. *J. Climate*, 2001, **14**: 3508~3517

[31] 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