

# Numerical Simulation of the Effects of Arctic Dipole Atmospheric Circulation on Arctic Sea Ice

Song Wang\*, Jie Su

Physical Oceanography Laboratory of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao Shandong  
Email: \*wqywgq123@126.com

Received: Jun. 27<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jul. 5<sup>th</sup>, 2019; published: Jul. 12<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Based on the trend analysis and correlation analysis of sea ice concentration provided by the National Snow and Ice Data Center and AD index extracted from the ERA-Interim sea-level pressure and monthly mean sea level pressure data, it is concluded that the average AD index from December to February is positively correlated with the range of Arctic sea ice in February, and the average AD index from May to August is negatively correlated with the range of Arctic sea ice in September. In order to confirm the influence of thermal and dynamic forcing on sea ice concentration under the influence of AD atmospheric circulation in winter and summer, series of simulation experiment were carried out using CICE sea ice model. The study shows that the model can reproduce the main characteristics of sea ice distribution under positive and negative AD phases, and the simulation ability of arctic sea ice meets the research needs. In winter, the Arctic sea ice concentration is not sensitive to the change of AD type wind field. Under the forcing of negative phase AD, the sea ice concentration in the marginal sea of the Atlantic sector decreases through thermal effector forcing beyond wind drive. In summer, under the influence of positive phase AD, sea ice concentration in the sea area outside east Greenland decreases, which is mainly caused by the dynamic action of wind field, thermodynamic effects also contributed to the smaller of sea ice concentration in the marginal and Barents Seas of the Atlantic sector.

## Keywords

Arctic Sea Ice, Arctic Dipole Atmospheric Circulation, CICE Mode

---

# 北极偶极子型大气环流对北极海冰影响的数值模拟研究

王松\*, 苏洁

\*通讯作者。

中国海洋大学, 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛  
Email: wqywgq123@126.com

收稿日期: 2019年6月27日; 录用日期: 2019年7月5日; 发布日期: 2019年7月12日

## 摘要

利用美国冰雪数据中心提供的海冰范围和由ERA-Interim提供的月均海平面气压提取的北极偶极子型大气环流(AD)指数分析得出, 12~2月的AD平均指数与2月北极海冰范围正相关, 5~8月的平均AD指数与9月北极海冰范围负相关。为了区分冬季/夏季AD型大气环流影响下热力、动力强迫对海冰密集度的影响, 本文利用CICE海冰模式进行了一系列数值模拟试验。研究表明, 模式能够再现正/负位相的AD型大气环流下海冰密集度分布的主要特点, 对北极海冰的模拟能力满足研究需求。冬季, 北极海冰密集度对AD型风场的变化不敏感, 负位相的AD型大气环流通过热力作用或风驱动以外的强迫作用造成大西洋扇区边缘海冰密集度减小; 夏季, 正位相的AD型大气环流影响下, 东格陵兰海之外的海区海冰密集度减小, 这种影响主要来自于风场强迫, 风场以外的强迫作用对大西洋扇区边缘海和巴伦支海海冰密集度偏小也有重要贡献。

## 关键词

北极海冰, 北极偶极子型大气环流, CICE模式

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自从20世纪70年代以来, 全球气温持续升高, 全球变暖已经成为不争的事实。在全球气候变暖的大背景下, 近几十年来北极气候系统发生了比其他地区更为显著的变化, 其中以海冰的变化尤为明显, 如海冰范围和厚度迅速减少[1][2][3]、冰龄的减小、多年冰减少[4][5]、一年冰比例增加[4][6]、融化期延长[7]、冰速增加[8][9][10]等。海冰通过调节大气和极地海洋之间的热量、动量和水分的交换, 以及在海洋中重新分配盐分, 在地球气候中发挥着至关重要的作用[11]。

在任何给定的月份, 无论是整个北极还是某个区域, 海冰范围的变化都受到大气环流模式异常的强烈影响, 尤其是那些持续一个月或更长时间的异常[12]。北半球大气环流变化模式主要有北极涛动(Arctic Oscillation, AO) [13], 北大西洋振荡(North Atlantic Oscillation, NAO) [14]和北极偶极异常(Arctic Dipole Anomaly, AD 或 DA) [15]。这些大气环流变化模式可以部分解释不同时间尺度、不同时期的海冰的变化。

AO一般定义为20°N以北海平面气压EOF分解的第一模态, 是北半球大气变率的主模态, 刻画了中低纬度大气与高纬大气之间质量平衡的遥相关变化[13]。当AO处于正/负位相时, 北极海平面气压降低/升高, 中纬度地区海平面气压升高/降低[13]。许多学者指出, 从季节尺度[16]到年代际尺度[17][18][19] AO对北极海冰都有影响。这些研究指出AO正位相导致气旋性的风异常, 这种风场异常使得波福特流涡减弱或向南退。在Ekman输运的作用下, 沿岸的海冰被带走, 形成更大面积的开阔水, 多年冰被一年冰代替。而融化新生成的薄的海冰需要较少的能量, 加剧了冰面反照率的正反馈作用, 从而使阿拉斯加、

西伯利亚沿岸海冰偏少。一些研究发现在上个世纪 90 年代中期后 AO 由正位相向中性或负位相变化时, 北极海冰仍在减少[4] [14] [20]。于是研究人员开始质疑 AO 与海冰的耦合关系, 认为 90 年代中期后开始, 北极海冰与 AO 正处于“退耦”阶段。另外, 2009/2010 年冬季出现极端负值的 AO, 同时伴随大量多年冰进入波弗特海和楚科奇海, 这些海域的海冰在随后的季节出现强烈的融化, 表明 AO 负位相也有利于海冰减少, 这与之前的认知相反[21]。Wu 等(2006)提出 70°N 以北海平面气压场的 EOF 第二模态 - 北极偶极子(AD)正逐步成为驱动海冰变化越来越重要的因子[15]。当 AD 处于正位相时, 格陵兰岛/加拿大群岛气压升高, 喀拉海一侧气压降低, 会引发由西向东的异常风, 加强穿极漂流, 更多海冰流出弗拉姆海峡, 导致波弗特海、楚科奇海一侧出现大面积开阔水; AD 负位相时, 格陵兰岛/加拿大群岛气压降低, 喀拉海一侧气压升高, 穿极漂流减弱, 更多海冰留在加拿大海盆内[15] [22]-[28]。Wu 等(2012)用复向量经验正交函数(CVEOF)研究了夏季(7~9 月)风场与 9 月海冰范围的关系, 指出 AD 型风场的动力作用对海冰范围的极小值和减小趋势有贡献, 偏小的 9 月海冰范围与夏季负位相的 AD 风场相联系[22]。Hegy 等(2017)指出, 11~2 月负 AD 指数与正的向下晴空长波辐射一致, 并减少了相同时段的巴伦支海 - 喀拉海的海冰增长, 且 12~2 月负 AD 指数与正异常的云辐射作用的向下长波辐射相伴随[29]。

综上所述, AD 通过热力和动力两方面对冬季和夏季海冰年际变化有重要作用, 北极海冰快速变化发生于北极大气环流显著改变的背景下, 在北极大气环流的显著模态中 AD 的变化很明显, AD 与北极海冰变化紧密联系, 前人的研究已经部分指出了 AD 对北极海冰变化的重要影响, 但是不同季节 AD 型大气环流对海冰密集度产生影响的过程中动力、热力强迫作用的具体影响还不是很明确。因此, 本论文将围绕 AD 型环流动力、热力作用对海冰密集度的影响展开研究。

## 2. 模式简介与数据、方法

CICE 是美国洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)国家实验室发展的海冰模式, 具有复杂的参数化过程, 在气候系统模式中得到了广泛的应用, 本文一系列数值模拟试验基于 CICE5.1 展开[30]。CICE 有以下几个相互作用的组成部分: 热力学模型, 它计算了由于垂直传导、辐射和湍流通量以及降雪而导致的雪和冰的局部增长率; 海冰的动力学模型, 根据冰的机械强度模型预测了冰块的速度场; 一种描述区域密集度平流、冰体积和其他变量的水平输运模型; 以及基于能量平衡和应变率在各个冰类别之间传输冰的成脊作用参数化方案。CICE 海冰模式突出的优势有: 海冰动力学采用 EVP/EAP 海冰流变学; 海冰机械再分布函数更为复杂, 考虑了海冰成脊、筏运作用以及侧边界融化过程; 热力学采用可分辨冰温的垂直廓线以及显示盐泡参数化; 引入了根据冰厚判断冰面地形的融池参数化方案, 使得到的融池覆盖率与融池深度更加精确; 短波辐射采用 Delta-Eddington 参数化方案, 能够精确计算冰层和积雪发射、吸收和散射的短波辐射。

CICE 模式采用转极点 gx1 全球网格, 水平分辨率大约为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。垂向分 5 层海冰, 1 层积雪。每个格点的海冰根据冰厚不同可以分为五类海冰。气象强迫包括风场(经向风和纬向风)、比湿、气温、降水、总云量, 本文不同的模拟试验用到的大气强迫量都采用欧洲中期天气预报中心 ECMWF 下的 ERA-Interim 气象再分析数据集为基础根据需求处理得来[31]; 海洋强迫包括 CCSM 控制试验海洋模块输出的气候态月平均海表面倾斜、海表流速、混合层底热通量、PHC 的海表面温度和海表面盐度[32]等。冰面融池参数化方案选择 topo 方案。模式采用糊状层热力学和弹 - 各向异性 - 塑动力学等海冰物理过程。温盐恢复周期 30 天。年际变化试验、气候态大气强迫试验都为冷启动, 不需要初值场, 其余试验都有一个相同的初值场。该初值场由气候态大气强迫试验模拟运行 30 年得来, 包含的变量有: 海表经向流、海表纬向流、海表温度、五类海冰密集度、五类海冰体积、五类雪体积、五类冰冰龄、五类冰冰表面温度、五类海冰的融池覆盖率、五类冰的融池深度等。

本文使用 1979~2016 年的月平均海冰密集度(SIC)数据由美国冰雪数据中心(NSIDC)提供[33], 下载地址为 <https://nsidc.org/data/NSIDC-0051/versions/1>。该数据集由以下被动微波传感器获得的亮度温度数据反演得到: Nimbus-7 扫描多通道微波辐射计(SMMR)、国防气象卫星计划(DMSP)-F8、-F11 和-F13 专用传感器微波/成像仪(SSM/IS)和 DMSP-f17 专用传感器微波成像仪/测深仪(SSMIS)。本文使用的 1979~2016 年的月平均冰速资料也是由美国冰雪数据中心(NSIDC)提供[34], 可在 <ftp://sidads.colorado.edu/>下的 DATASETS 文件夹里直接下载。冰速的反演以被动微波冰速为基础, 融合了可见光和浮标冰速等多类数据。其中在卫星遥感无法有效观测的夏季, 冰速则由 NCEP/NCAR 10 m 风速数据估算所得。冰速反演间隔为 1 天, 空间分辨率为 25 km。

AD 指数的计算采用 ERA-Interim 月均海平面气压(SLP)先做距平再经 EOF 分解取第二模态得来, 资料长度为 1979~2016 年, 计算范围取 70°N 以北。文中涉及的统计分析方法还包括趋势分析、去趋势分析、相关性分析和合成分析等常规分析方法。本文提到的冬季指 12~2 月, 夏季指 5~8 月。

### 3. AD 与北极海冰密集度变化的关系

每个季节的 AD 除了强度有变化外, 模态的空间型也在随时间发生变化[35], 为了直观了解 AD 型大气环流不同季节下的变化, 我们分别对每个季节的海平面气压做 EOF 分解。从图 1 可以看出, 不同季节下的 AD 空间模态、时间系数、方差解释率是不一样的。冬季正负异常中心的分界线与本初子午线的夹角约 60° (逆时针), 夏季正负异常中心的分界线大致与本初子午线重合。冬季 AD 西半球的异常中心位于

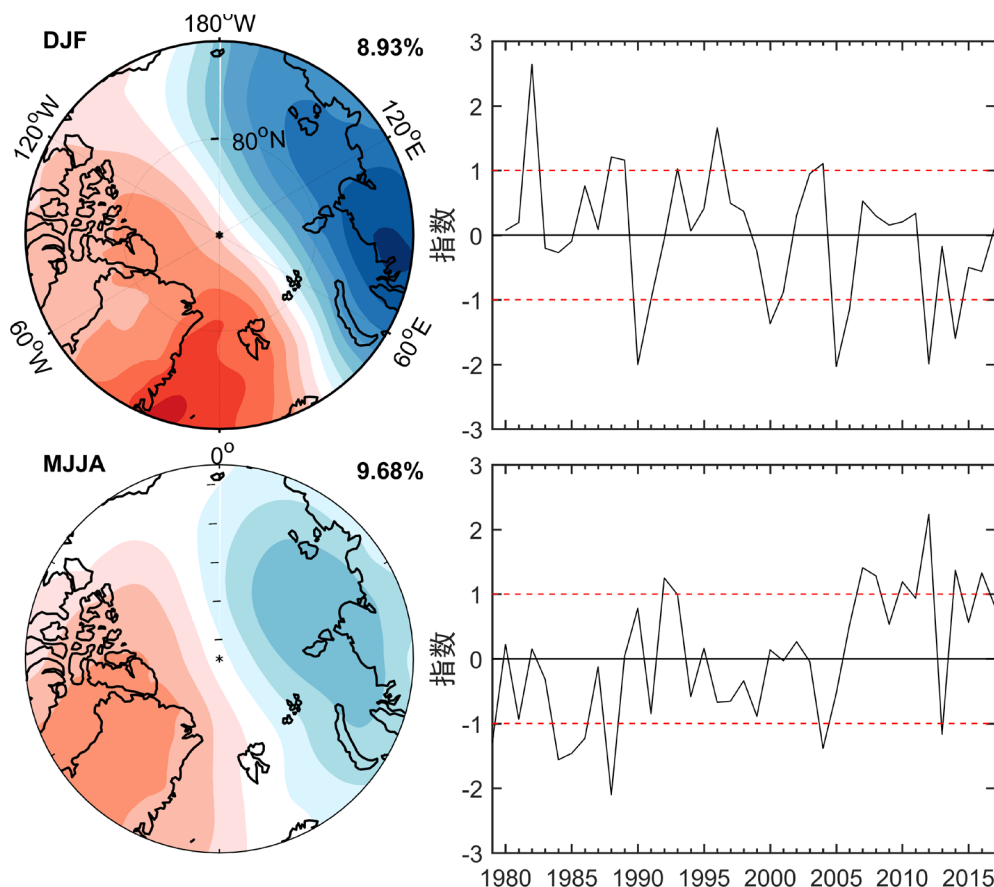
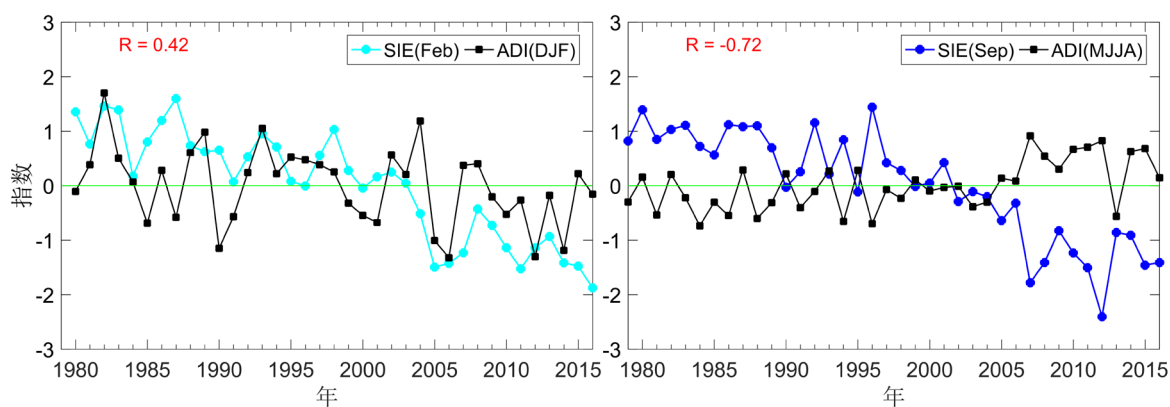


Figure 1. Spatial and temporal coefficients of the second mode of EOF analysis of sea level pressure for winter/summer  
图 1. 冬/夏季海平面气压 EOF 分解第二模态的空间型及时间系数

格陵兰岛东侧, 这很可能与冰岛低压的影响有关, 东半球的异常中心较夏季时更靠近亚欧大陆可能与亚洲高压的影响有关; 夏季 AD 西半球的异常中心位于格陵兰岛, 可能受格陵兰高压的影响。从空间模态的振幅比较, 冬季 AD 较强; 从方差解释占比比较, 夏季 AD 较强。从时间系数可以看出, 1980~2016 年冬季 AD 指数伴随减小的趋势还存在明显的年际变化, 且 21 世纪以降多呈偏中性或负位相; 从 1979~2016 年夏季 AD 指数伴随增大的趋势还存在明显的年际变化和年代际变化, 2005 年后以高位的正位相为主, 且变化振幅增大。

AD 对海冰的影响从 AD 指数与海冰范围时间序列的相关性得到体现。图 2 为 1979~2016 年冬季和夏季 AD 指数与 2 月和 9 月海冰范围的年际变化。冬季 AD 指数与 2 月海冰范围的相关系数为 0.42, 减小的 AD 与海冰范围减小相联系, 与前人的研究结果是相似的[29]。此外, 两者有相似的变化趋势(减小), 海冰范围极小值基本与 AD 指数极小值相对应; 夏季 AD 指数与 9 月海冰范围的相关系数为-0.72, 增大的 AD 指数与 9 月海冰范围减小相联系, 与 Zhang (2015)的研究结论是相近的[28]。此外, 两者有类似的变化趋势, 上个世纪 90 年代后两者反相关的关系更明显, 且两者的年代际变化位相转置的时间节点相近(以 2005 年为重要节点)。



**Figure 2.** AD index in winter and summer from 1979 to 2016 and interannual variation of sea ice extent in February and September

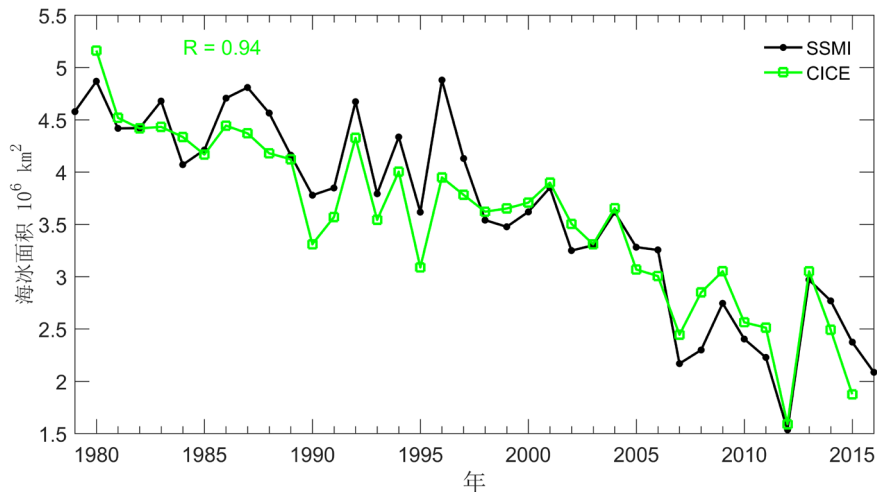
**图 2.** 1979~2016 年冬季和夏季 AD 指数与 2 月和 9 月海冰范围的年际变化

前人的研究指出, 冬季 AD 对北极海冰产生影响的区域主要是巴伦支海及附近海区, 11~次年 2 月负位相的 AD 影响下巴伦支海 - 喀拉海上空水汽集聚, 向下的长波辐射增多导致近地面气温上升和海冰增长减缓[29]; 夏季, 正位相的 AD 对应着北冰洋边缘海海冰偏小, 偏小的 9 月海冰范围与 7~9 月的负 AD 风场相联系, 风场的动力作用对海冰范围的极小值和减小趋势有贡献[22]。由此可见不同季节 AD 对海冰产生影响的机制不同, 冬季 AD 型大气环流更多的通过影响水汽输送改变局地热量平衡作用于海冰增长; 夏季 AD 型大气环流更多的通过强经向风的动力作用改变海冰密集度的分布。为进一步理解 AD 对北极海冰变化影响过程中动力、热力作用的差异, 使用数值模式模拟研究北极海冰变化是有效的手段。

#### 4. AD 与北极海冰变化的数值模拟试验

CICE 模式考虑的海冰参数化过程较为细致复杂, 很多气候系统模式逐渐更多的使用 CICE 作为系统的海冰分量, 本文利用 CICE 展开一系列试验进一步探究 AD 对北极海冰的影响。在利用模式模拟 AD 型大气环流对北极海冰变化的影响前有必要对模式的性能有一定的了解。年际变化的大气强迫下北极海冰的表现可以代表模式的整体水平, 也就是用观测(接近观测)的大气强迫下模拟出的海冰与观测的海冰相比较来评估模式。图 3 为 9 月模式与观测海冰面积的比较。从图中可以看出, CICE 模式结果与观测很接近,

两者相关系数为 0.94, 模式模拟出了海冰面积长期变化趋势, 对一些特殊年份也模拟较好(如: 海冰范围最小的 2012 年)。



**Figure 3.** From 1979 to 2016, the observed and model sea ice area in September (Not calculate the area north of 84.5°N)  
**图 3.** 1979~2016 年观测与模式 9 月海冰面积的比较(84.5°N 以北不计算)

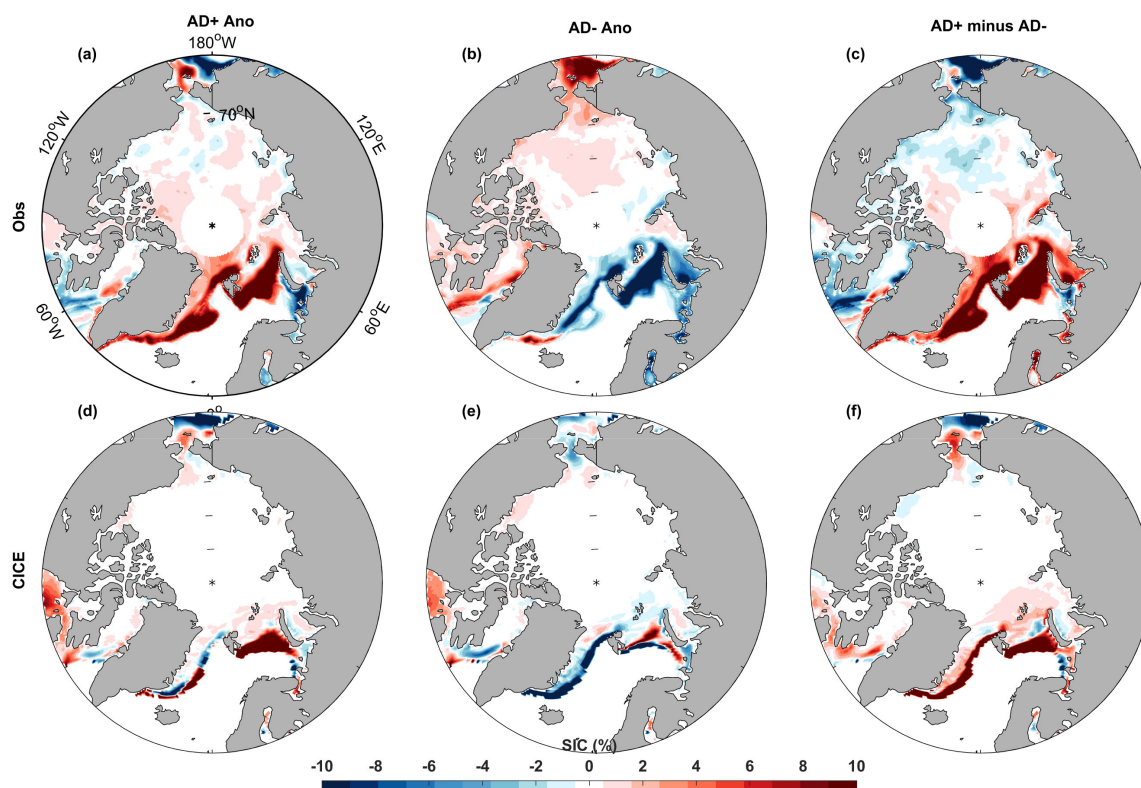
考虑到海冰变化中热力和动力的耦合作用, 简单起见, 本文设计了纯 AD 型风场强迫试验(T5~T8)、气候态风场试验(T9~T12), 通过这两组试验与气候态标准试验(T0)、AD 型大气强迫试验(T1~T4)相比较, 进一步讨论与 AD 相关的动力和热力强迫对北极海冰变化的影响。模拟试验相关配置见表 1。T0~T12 都为气候态大气强迫试验, 海洋强迫都是相同的, 用一年的特定大气场进行循环强迫, 得到该一年大气对应下海冰的稳定变化, 这样就可以提取出海冰与相应大气状况的稳定联系。

**Table 1.** Configuration information of climatic state test  
**表 1.** 气候态试验的配置信息

	编号	大气强迫配置	备注
气候态大气强迫标准试验	T0	1980~2009 年气候态的大气变量	冷启动, 运行 30 年
	T1	冬季 AD 正位相显著年平均的大气强迫	
AD 型大气强迫试验(T1~T4)	T2	冬季 AD 负位相显著年平均的大气强迫	运行 20 年, 初始场取自 T0 试验最后一年的海冰, 相当于在 T0 结果上进行的试验
	T3	夏季 AD 正位相显著年平均的大气强迫	
	T4	夏季 AD 负位相显著年平均的大气强迫	
	T5	冬季 AD 正位相显著年平均的风场, 其余大气变量与 T0 相同	
纯 AD 型风场试验(T5~T8)	T6	冬季 AD 负位相显著年平均的风场, 其余大气变量与 T0 相同	运行 20 年, 初始场取自 T0 试验最后一年的海冰, 把 T0 强迫中的风场替换为 AD 型的风场
	T7	夏季 AD 正位相显著年平均的风场, 其余大气变量与 T0 相同	
	T8	夏季 AD 负位相显著年平均的风场, 其余大气变量与 T0 相同	
	T9	风场采用气候态, 其余大气变量与 T1 相同	
气候态风场试验(T9~T12)	T10	风场采用气候态, 其余大气变量与 T2 相同	运行 20 年, 初始场取自 T0 试验最后一年的海冰, 把 AD 型大气强迫试验中的风场换为气候态的(T0 的风场)
	T11	风场采用气候态, 其余大气变量与 T3 相同	
	T12	风场采用气候态, 其余大气变量与 T4 相同	

#### 4.1. 正负 AD 型大气强迫与标准试验的比较

图 4 给出了冬季 AD 型大气强迫下(试验 T1 和 T2)北极海冰密集度分布(与合成观测的 SIC 相比), 从图中可以看出, 负位相 AD 强迫下大西洋扇区海冰密集度以偏小为主, 正位相 AD 强迫下大西洋扇区海冰密集度以偏大为主。该结果与观测结果基本一致(图 4(a)、图 4(b)), 冬季 AD 型大气环流与海冰密集度的这种联系是稳定的、真实的。模式能模拟出冬季 AD 型大气环流下北极海冰的基本分布, 可以用模式进一步研究冬季 AD 型大气环流下北极海冰的密集度变化。



**Figure 4.** The simulated (d, e, f) SIC of AD type atmospheric forcing tests and the synthesis of observation SIC (a, b, c) in winter (a and d are positive phase abnormal fields; b and e are negative phase anomaly fields; c and f are the difference fields of positive phase and negative anomaly)

**图 4.** 冬季 AD 型大气强迫下模式模拟的(d、e、f) SIC 与合成观测的(a、b、c) SIC (a、d 为正位相异常场; b、e 为负位相异常场; c、f 为正位相与负位相的差值场)

图 5 给出的是夏季 AD 型大气环流强迫下(试验 T3 和 T4)模式模拟的夏季海冰密集度分布(与合成观测的 SIC 相比), 从图中可以看出, 正位相 AD 强迫下模拟出了北冰洋内区及东格陵兰海密集度减小, 与观测结果存在较大差距, 可能暗示了夏季之前的海冰状况对夏季海冰变化有重要影响, 其中可能包含了热力作用的影响。负位相 AD 强迫下模拟出了除东格陵兰海外北极大部分区域海冰密集度偏大, 海冰分布外缘比海冰分布内区偏大更多, 与观测结果较为相似。夏季正位相 AD 结果减去负位相 AD 结果看出海冰密集度除巴芬湾和东格陵兰海偏大外整体都偏小, 凸显了正位相 AD 对海冰密集度的影响, 与观测结果是一致的。用模式进一步研究夏季 AD 型大气环流下北极海冰的密集度变化也是可取的。

#### 4.2. AD 型大气环流中热力、风场动力强迫对海冰的影响

图 6 给出的是冬季 AD 型风场试验、气候态风场试验、AD 型大气强迫试验对应海冰密集度的分布。

从图中可以看出, 在正负位相的 AD 型风场强迫下, 海冰密集度的变化是相似的(图 6(a)、图 6(e)), 都显示在海冰分布外缘的巴芬湾、东格陵兰海、巴伦支海、白令海的地区海冰密集度偏小, 这说明冬季海冰密集度对 AD 型风场不敏感。将 AD 型大气强迫中的风场替换为气候态的风场后, 海冰密集度分布与不替换 AD 型风场是很相近的, 无论正位相(图 6(f)、图 6(g))还是负位相(图 6(b)、图 6(c))都如此, 再次说

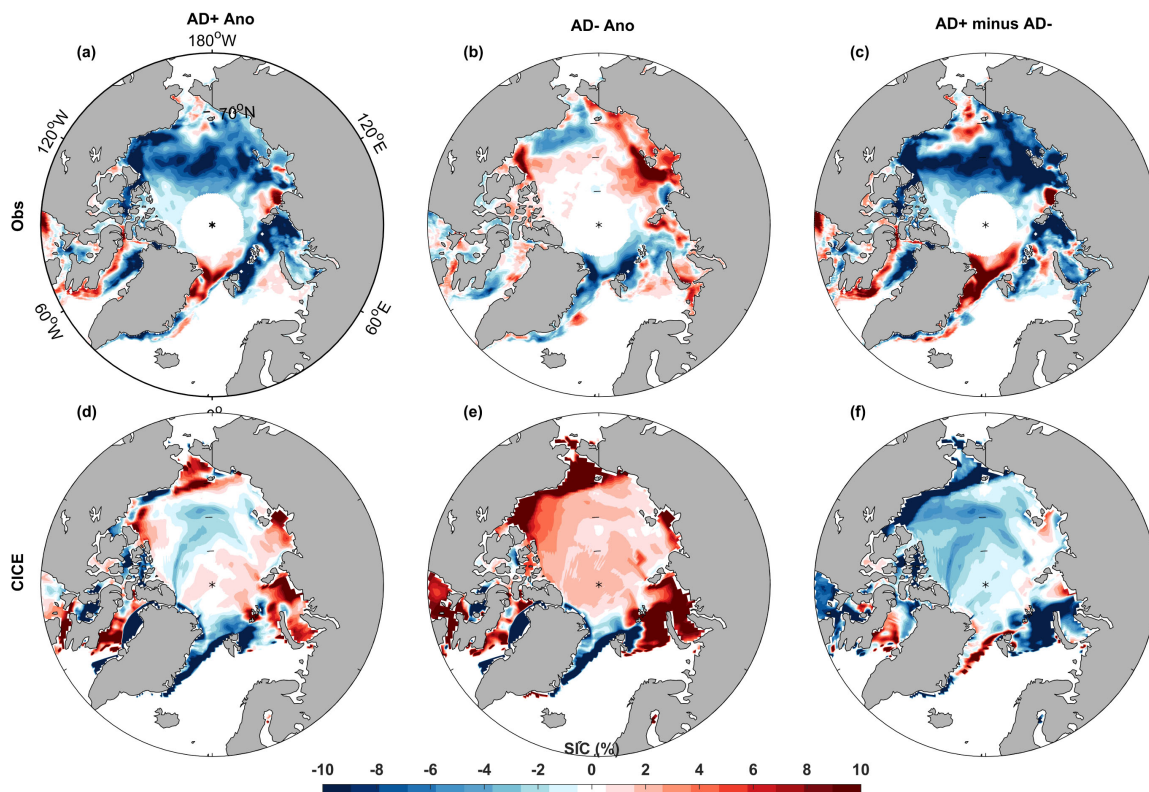
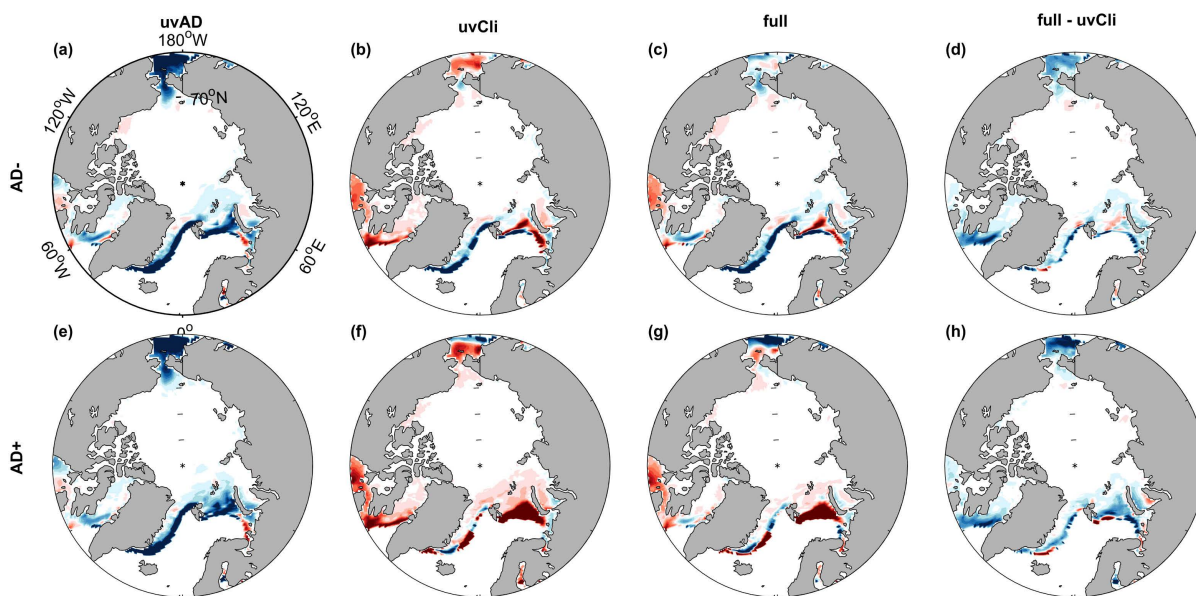
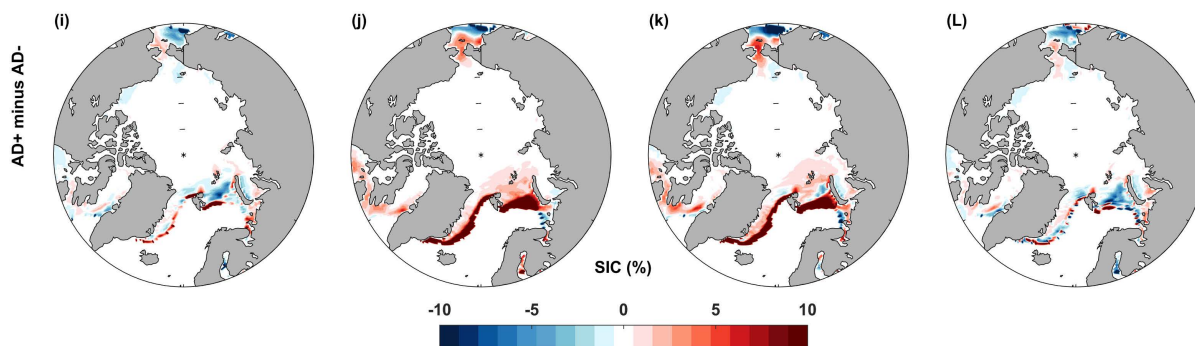


Figure 5. Same as Figure 4 but for summer tests

图 5. 夏季 AD 型大气强迫下模式模拟的(d、e、f)夏季 SIC 与合成观测(a、b、c)的 SIC (与图 4 类似)







**Figure 6.** SIC distribution in AD type wind field test, climatic wind field test and AD type atmospheric forcing test in winter (uvAD means that only the wind field is AD type, that is, AD type wind field test; uvCli means that only the wind field is climatic, that is, the experiment of climatic wind field; full indicates that all the atmospheric forcing variables are AD type, namely AD type atmospheric forcing experiment)

**图 6.** 冬季 AD 型风场试验、气候态风场试验、AD 型大气强迫试验中 SIC 的分布 (uvAD 表示只有风场是 AD 型的, 即 AD 型风场试验; uvCli 表示只有风场是气候态的, 即气候态风场试验; full 表示所有大气强迫变量都是 AD 型的, 即 AD 型大气强迫试验)

明风场的变化对海冰密集度分布的影响很小。换言之, 冬季, AD 型大气环流对海冰密集度产生影响的变量中风场的贡献不突出。此外, 图 6(d)与图 6(a), 图 6(h)与图 6(e)的差异表明热力作用和动力作用是耦合在一起的, 风场的改变同时改变了热力平衡。

从局部海区海冰密集度的变化可以看出风场的影响。负位相时, 图 6(a)~图 6(c)相比较可以看出, AD 型大气强迫下白令海附近、巴芬湾南部密集度的偏小主要由风场的影响所造成; 正位相时, 图 6(e)~图 6(g)相比较也可以得出与负位相情形下相同的结论; 从正位相减去负位相的结果中可以看出(图 6(i)~图 6(k)), AD 型大气强迫下新地岛西北角密集度偏小的原因在于风场的影响。此外, 图 6(l)与图 6(i)非常接近, 表明正位相与负位相相减后, 减去了动力作用与热力作用的耦合部分, 也就是单独的正位相或负位相影响下热力和动力是耦合在一起的, 正负位相相减可以消除耦合部分的效应。

综合以上讨论, 冬季, 负位相的 AD 型环流影响下除了白令海南部海冰密集度增加外其余海区海冰密集度减小(主要包括巴芬湾南部、东格陵兰海、巴伦支海、白令海峡等), 这种影响主要由风场动力之外的大气强迫作用即热力作用造成, 风场动力作用的影响很小局限于部分巴伦支海和白令海南部。

图 7 给出的是夏季 AD 型风场试验、气候态风场试验、AD 型大气强迫试验对应海冰密集度的分布。从 AD 型的风场试验看出, 正负位相情形下海冰密集度分布存在明显差异(图 7(a)与图 7(e)), 且把 AD 型大气强迫场中的风场替换为气候态的风场后正负位相下海冰密集度的表现也存在明显差异(图 7(d)与图 7(h)), 换言之, 夏季的海冰密集度对 AD 型风场的变化是敏感的。图 7(i)~图 7(l)都显示相近的海冰密集度分布, 从三个图可以确定, 夏季正位相的 AD 型风场动力作用影响下东格陵兰海海冰密集度增大, 其余海区海冰密集度偏小, 图 8 的结果也能证明正位相的 AD 型风场动力作用的影响。图 7(i)~图 7(k)的比较还能得出, 太平洋扇区边缘海和巴伦支海海冰密集度的偏小同时受到热力和风场动力的影响, 正位相的 AD 时东格陵兰海海冰密集度偏大是风场的动力作用影响(热力作用导致海冰密集度偏小), 北冰洋内区海冰密集度的减小几乎就是风场的作用。

把 AD 型大气强迫场中的风场替换为气候态的风场后, 海冰密集度分布总体上与不替换 AD 型风场是很相似的, 正负位相下的表现都是如此(图 7(b)、图 7(c)和图 7(f)、图 7(g)), 这表明, 夏季热力作用对海冰密集度的影响也是明显的, 正位相情形下热力作用使波弗特海南部和巴伦支海两区域海冰密集度偏小(图 7(j))。AD 型风场试验与 AD 型大气强迫试验的比较也能说明热力作用对海冰密集度的影响(图 7(a)与图 7(c)、图 7(e)与图 7(g)的风场是相同的)。

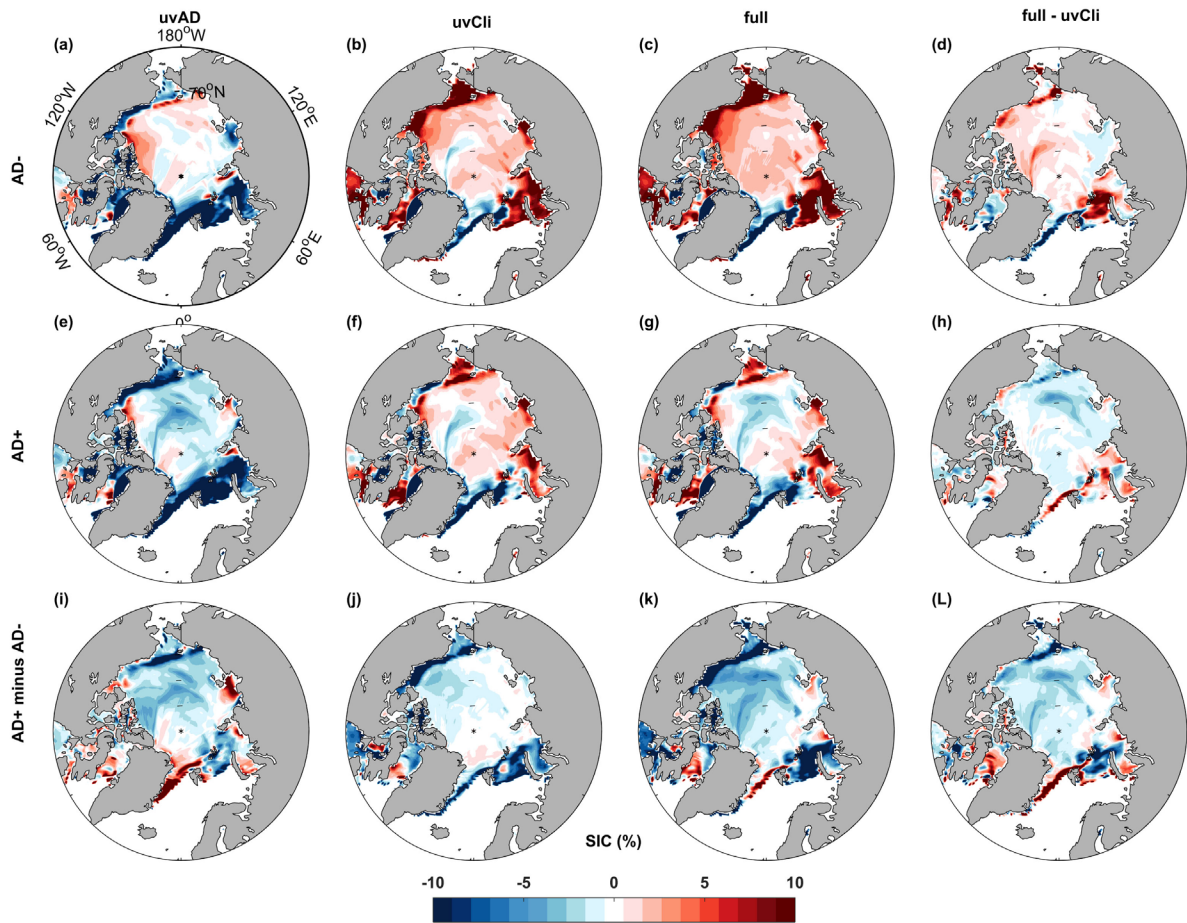


Figure 7. Same as Figure 6 but with focus on summer tests

图 7. 夏季 AD 型风场试验、气候态风场试验、AD 型大气强迫试验中 SIC 的分布(与图 6 类似)

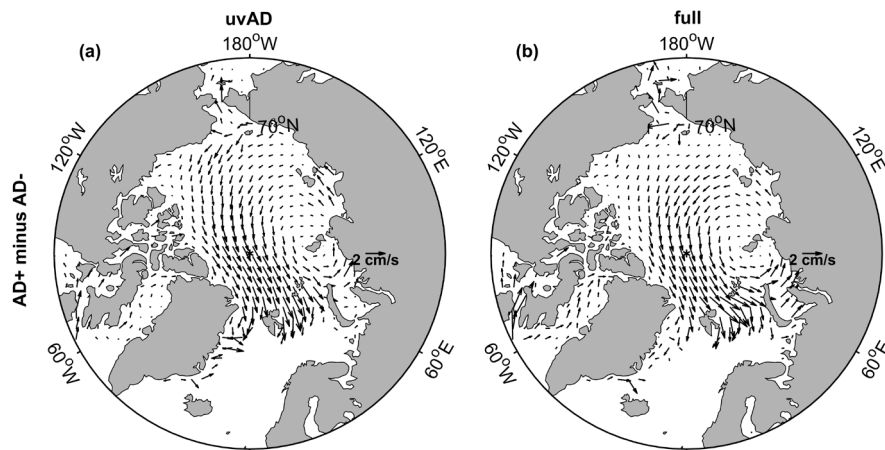


Figure 8. Ice velocity distribution of summer AD type wind field tests (a) and AD type atmospheric forcing tests (b) (both a and b are results of the positive phase of AD minus the negative phase of AD)

图 8. 夏季 AD 型风场试验(a)与 AD 型大气强迫试验(b)冰速的分布(a、b 都是 AD 正位相减 AD 负位相的结果)

综上所述,夏季,AD 正位相的风影响下使除巴芬湾和东格陵兰海之外的海区海冰密集度减小,正位相的 AD 型环流对整个北极海冰密集度产生影响的主要贡献更多来自风场的作用,东格陵兰海、北冰洋

内区海冰密集度的减小几乎就是风场的作用。正位相的 AD 型环流影响下热力作用对波弗特海南部和巴伦支海两区域海冰密集度的减小有主要作用。

## 5. 结论

AD 型大气环流对冬夏两季的海冰密集度有重要影响, 冬季, AD 指数减小与 2 月海冰范围极小值相对应, 两者相关系数为 0.42, AD 指数极小值基本对应海冰范围极小值; 夏季, AD 指数极大值与海冰范围极小值相对应, 两者相关系数为-0.72, AD 指数极大值对应海冰范围极小值。

CICE 模拟试验表明, 冬季, 海冰密集度对 AD 型风场(经向风)的变化不敏感, 负位相的 AD 型大气环流影响下除了白令海南部海冰密集度增加外, 白令海峡附近、大西洋扇区边缘海海冰密集度减小, 这种影响主要由风场以外的大气强迫作用(热力作用)造成。夏季, 正位相的 AD 型大气环流影响下使除巴芬湾和东格陵兰海之外的海区海冰密集度减小, 这种影响主要来自风场的动力强迫作用。正位相的 AD 型大气环流下热力作用对海冰密集度偏小也有重要影响, 这种关系在波弗特海南部和巴伦支海两区域表现明显。

本文利用 CICE 海冰模式模拟了 AD 型大气环流下海冰密集度分布的变化, 且模拟了 AD 型大气环流下动力、热力作用对冬/夏季海冰密集度变化的差异性影响, 模拟结果表明夏季 AD 正位相时热力作用对海冰密集度的影响较小, 考虑到热力作用的表现受海冰表面性质(如反照率)的约束, 且由于模拟的海冰反照率与现实存在差距, 因此风强迫作用比热力作用更明显是有待进一步确认的。此外, 冬夏季 AD 型大气环流对海冰密集度造成影响背后的物理过程需要进一步深入研究。

## 项目基金

本研究非常感谢国家重点研发计划项目(2018YFA0605901)、全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2015CB953901)、国家重点研发计划课题(2016YFC1402705)资助。

## 参考文献

- [1] Kwok, R. (2009) Outflow of Arctic Ocean Sea Ice into the Greenland and Barents Seas: 1979-2007. *Journal of Climate*, **22**, 2438-2457. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2819.1>
- [2] Laxon, S.W., Giles, K.A., Ridout, A.L., *et al.* (2013) CryoSat-2 Estimates of Arctic Sea Ice Thickness and Volume. *Geophysical Research Letters*, **40**, 732-737. <https://doi.org/10.1002/grl.50193>
- [3] Renner, A.H.H., Gerland, S., Haas, C., *et al.* (2014) Evidence of Arctic Sea Ice Thinning from Direct Observations. *Geophysical Research Letters*, **41**, 5029-5036. <https://doi.org/10.1002/2014GL060369>
- [4] Maslanik, J., Drobot, S., Fowler, C., *et al.* (2007) On the Arctic Climate Paradox and the Continuing Role of Atmospheric Circulation in Affecting Sea Ice Conditions. *Geophysical Research Letters*, **34**, L03711. <https://doi.org/10.1029/2006GL028269>
- [5] Stroeve, J.C., Serreze, M.C., Holland, M.M., *et al.* (2012) The Arctic's Rapidly Shrinking Sea Ice Cover: A Research Synthesis. *Climatic Change*, **110**, 1005-1027. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>
- [6] Fowler, C., Emery, W.J. and Maslanik, J. (2004) Satellite-Derived Evolution of Arctic Sea Ice Age: October 1978 to March 2003. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **1**, 71-74. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.824741>
- [7] Stammerjohn, S., Massom, R., Rind, D., *et al.* (2012) Regions of Rapid Sea Ice Change: An Inter-Hemispheric Seasonal Comparison. *Geophysical Research Letters*, **39**, L06501. <https://doi.org/10.1029/2012GL050874>
- [8] Hakkinen, S., Proshutinsky, A. and Ashik, I. (2008) Sea Ice Drift in the Arctic since the 1950s. *Geophysical Research Letters*, **35**, L19704. <https://doi.org/10.1029/2008GL034791>
- [9] Rampal, P., Weiss, J. and Marsan, D. (2009) Positive Trend in the Mean Speed and Deformation Rate of Arctic Sea Ice, 1979-2007. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **114**, C05013. <https://doi.org/10.1029/2008JC005066>
- [10] Spreen, G., Kwok, R. and Menemenlis, D. (2011) Trends in Arctic Sea Ice Drift and Role of Wind Forcing: 1992-2009. *Geophysical Research Letters*, **38**, L19501. <https://doi.org/10.1029/2011GL048970>

- [11] Stroeve, J. and Notz, D. (2018) Changing State of Arctic Sea Ice across All Seasons. *Environmental Research Letters*, **13**, Article ID: 103001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
- [12] Serreze, M.C. and Meier, W.N. (2019) The Arctic's Sea Ice Cover: Trends, Variability, Predictability, and Comparisons to the Antarctic. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1436**, 36-53. <https://doi.org/10.1111/nyas.13856>
- [13] Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M. (1998) The Arctic Oscillation Signature in the Wintertime Geopotential Height and Temperature Fields. *Geophysical Research Letters*, **25**, 1297-1300. <https://doi.org/10.1029/98GL00950>
- [14] Deser, C., Walsh, J.E. and Timlin, M.S. (2000) Arctic Sea Ice Variability in the Context of Recent Atmospheric Circulation Trends. *Journal of Climate*, **13**, 617-633. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0617:ASIVIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0617:ASIVIT>2.0.CO;2)
- [15] Wu, B., Wang, J. and Walsh, J.E. (2006) Dipole Anomaly in the Winter Arctic Atmosphere and Its Association with Sea Ice Motion. *Journal of Climate*, **19**, 210-225. <https://doi.org/10.1175/JCLI3619.1>
- [16] Serreze, M.C., Maslanik, J.A., Scambos, T.A., *et al.* (2003) A Record Minimum Arctic Sea Ice Extent and Area in 2002. *Geophysical Research Letters*, **30**, 1110. <https://doi.org/10.1029/2002GL016406>
- [17] Rigor, I.G., Wallace, J.M. and Colony, R.L. (2002) Response of Sea Ice to the Arctic Oscillation. *Journal of Climate*, **15**, 2648-2663. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2)
- [18] Rigor, I.G. and Wallace, J.M. (2004) Variations in the Age of Arctic Sea-Ice and Summer Sea-Ice Extent. *Geophysical Research Letters*, **31**, L09401. <https://doi.org/10.1029/2004GL019492>
- [19] Zhang, J., Steele, M., Rothrock, D.A., *et al.* (2004) Increasing Exchanges at Greenland-Scotland Ridge and Their Links with the North Atlantic Oscillation and Arctic Sea Ice. *Geophysical Research Letters*, **31**, L09307. <https://doi.org/10.1029/2003GL019304>
- [20] Overland, J.E. and Wang, M. (2005) The Third Arctic Climate Pattern: 1930s and Early 2000s. *Geophysical Research Letters*, **32**, L23808. <https://doi.org/10.1029/2005GL024254>
- [21] Stroeve, J.C., Maslanik, J., Serreze, M.C., *et al.* (2011) Sea Ice Response to an Extreme Negative Phase of the Arctic Oscillation during Winter 2009/2010. *Geophysical Research Letters*, **38**, L02502. <https://doi.org/10.1029/2010GL045662>
- [22] Wu, B., Overland, J.E. and D'Arrigo, R. (2012) Anomalous Arctic Surface Wind Patterns and Their Impacts on September Sea Ice Minia and Trend. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **64**, Article ID: 18590. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.18590>
- [23] Watanabe, E., Wang, J., Sumi, A., *et al.* (2006) Arctic Dipole Anomaly and Its Contribution to Sea Ice Export from the Arctic Ocean in the 20th Century. *Geophysical Research Letters*, **33**, L23703. <https://doi.org/10.1029/2006GL028112>
- [24] Wang, J., Zhang, J., Watanabe, E., *et al.* (2009) Is the Dipole Anomaly a Major Driver to Record Lows in Arctic Summer Sea Ice Extent? *Geophysical Research Letters*, **36**, L05706. <https://doi.org/10.1029/2008GL036706>
- [25] Maslanik, J., Stroeve, J., Fowler, C., *et al.* (2011) Distribution and Trends in Arctic Sea Ice Age through Spring 2011. *Geophysical Research Letters*, **38**, L13502. <https://doi.org/10.1029/2011GL047735>
- [26] Overland, J.E., Francis, J.A., Hanna, E., *et al.* (2012) The Recent Shift in Early Summer Arctic Atmospheric Circulation. *Geophysical Research Letters*, **39**, L19804. <https://doi.org/10.1029/2012GL053268>
- [27] Ikeda, M. (2012) Sea-Ice Cover Anomalies in the Arctic Basin Associated with Atmospheric Variability from Multi-decadal Trends to Intermittent Quasi-Biennial Oscillations. *Polar Research*, **31**, Article ID: 18690. <https://doi.org/10.3402/polar.v31i0.18690>
- [28] Zhang, R. (2015) Mechanisms for Low-Frequency Variability of Summer Arctic Sea Ice Extent. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**, 4570-4575. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422296112>
- [29] Hegyi, B.M. and Taylor, P.C. (2017) The Regional Influence of the Arctic Oscillation and Arctic Dipole on the Wintertime Arctic Surface Radiation Budget and Sea Ice Growth. *Geophysical Research Letters*, **44**, 4341-4350. <https://doi.org/10.1002/2017GL073281>
- [30] Hunke, E., Lipscomb, W., Turner, A., *et al.* (2015) CICE: The Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 5.1 (Report LA-CC-06-012). Los Alamos National Laboratory, Los Alamos.
- [31] Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., *et al.* (2011) The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137**, 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- [32] Steele, M., Morley, R. and Ermold, W. (2001) PHC: A Global Ocean Hydrography with a High-Quality Arctic Ocean. *Journal of Climate*, **14**, 2079-2087. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<2079:PAGOHW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<2079:PAGOHW>2.0.CO;2)
- [33] Cavalieri, D.J., Parkinson, C.L., Gloersen, P., *et al.* (1996) Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder. <https://doi.org/10.5067/8GQ8LZQVLOVL>

- 
- [34] Tschudi, M., Meier, W.N., Stewart, J.S., *et al.* (2016) Polar Pathfinder Daily 25 km EASE-Grid Sea Ice Motion Vectors, Version 3. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder.
- [35] Wang, J., Eicken, H., Yu, Y., *et al.* (2014) Abrupt Climate Changes and Emerging Ice-Ocean Processes in the Pacific Arctic Region and the Bering Sea. *The Pacific Arctic Region*. Springer, Dordrecht, 65-99.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-017-8863-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8863-2_4)

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;  
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ccrl@hanspub.org](mailto:ccrl@hanspub.org)