

周璐, 徐世明, 曾刚. 2017. 20 世纪 90 年代以来北极海冰减少的热动力分析——基于 PIOMAS 模式结果 [J]. 大气科学, 41 (1): 57–70. Zhou Lu, Xu Shiming, Zeng Gang. 2017. Dynamic and thermodynamic analysis of Arctic sea ice decrease since the 1990s based on PIOMAS simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 57–70, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.15267.

20 世纪 90 年代以来北极海冰减少的热动力分析 ——基于 PIOMAS 模式结果

周璐¹ 徐世明¹ 曾刚²

¹ 清华大学地球系统科学研究中心, 北京 100084

² 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

摘 要 本文利用美国华盛顿大学的 PIOMAS 海冰模式输出结果, 分析了 20 世纪 90 年代以来北极海冰减少的动力和热力过程的特征, 并探讨了海冰减少与北极大气环流模态之间的关系。结果表明: (1) 通过弗拉姆海峡输出的多年冰的厚度自 1995 年以来有显著减少; (2) 海冰的热力过程在 20 世纪 90 年代以后特别是 21 世纪以来是海冰减少的主导因素; (3) 大气模态中的北极涛动 (AO) 和北极偶极子 (AD) 均对北极海冰的动力输出有影响, 各自与海冰输出量的相关关系显著, 并且 AO 和 AD 的多元线性回归能很好的拟合出海冰输出量的减少。

关键词 北极海冰减少 热力和动力分析 PIOMAS (Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System) 模式 可能机理

文章编号 1006-9895(2017)01-0057-14

中图分类号 P731

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.15267

Dynamic and Thermodynamic Analysis of Arctic Sea Ice Decrease since the 1990s Based on PIOMAS Simulations

ZHOU Lu¹, XU Shiming¹, and ZENG Gang²

¹ Center for Earth System Science (CESS), Tsinghua University, Beijing 100084

² Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology/Key Laboratory Meteorological Disaster (NUIST), Ministry of Education, Nanjing 210044

Abstract Based on simulations from PIOMAS (Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System) model developed by University of Washington and their comparison with observational data, this study analyzes the characteristic dynamic and thermodynamic processes of the decrease in Arctic sea ice. The sea ice volume output flux is used to study dynamic process while thermodynamic process is obtained from dynamics indirectly in the recent 30 years, especially since the 1990s. The correlations between the Arctic sea ice decrease and atmospheric circulation modes like Arctic Oscillation (AO) and Arctic Dipole (AD) are also discussed. Results show that the thickness of perennial sea ice over Fram Strait experienced a significant reduction since 1995. Thermodynamic process played a prominent role in the Arctic sea ice decrease since the 1990s, especially in the 2000s. Furthermore, AO and AD do have influences on the flux

收稿日期 2015-09-08; 网络预出版日期 2016-05-28

作者简介 周璐, 女, 1993 年出生, 主要从事极地海冰方面的研究。E-mail: zhou-l15@mails.tsinghua.edu.cn

基金项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB430202, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306020, 国家自然科学基金项目 41575076、41430528

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2013CB430202), Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Grant GYHY201306020), National Natural Science Foundation of China (Grants 41575076 and 41430528)

of Arctic sea ice volume and their correlations with the flux are all significant at the 99% confidence level. Multiple linear regression using AO and AD can fit the reduction of sea ice volume output flux perfectly.

Keywords Reduction of Arctic sea ice, Dynamics and thermodynamic analysis, PIOMAS (Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System) model, Possible mechanism

1 引言

20 世纪 90 年代以来, 北极海冰急速减少 (Stroeve et al., 2008) 且伴随着海冰剧烈变薄 (Rothrock et al., 1999; Kwok et al., 2009)。政府间气候变化专门委员会第五次评估报告 (IPCC, 2013) 指出, 近 30 年来, 全球平均气温升高, 但北半球高纬地区特别是北极附近, 全球增暖放大 (Arctic Amplification, AA) 效应十分显著。海冰范围的历史最低值出现在 2012 年的 9 月 16 日, 约 $3.41 \times 10^7 \text{ km}^2$, 这比长时间平均 (1979~2000 年) 还要低 48.5%, 并且打破了 2007 年 9 月 18 日所记录的最低值 $4.17 \times 10^7 \text{ km}^2$ (Liu et al., 2013)。同时, 北极海冰正在快速融化, 多年冰数量减少且大量多年冰转化为一年冰 (Rigor and Wallace, 2004; Barber et al., 2009), 厚度减小 (Rothrock et al., 2008; Kwok, 2009; Kwok and Rothrock, 2009; Kwok and Untersteiner, 2011)、多年冰的比例不断减少 (Comiso, 2012; Polyakov et al., 2012)、融化期延长 (Stammer et al., 2012)、运动速度增加 (Hakkinen et al., 2008; Rampa et al., 2009; Spreen et al., 2011)、平均冰龄减小 (Pfirman et al., 2004) 等等。Maslanik et al. (2007) 利用卫星反演的海冰年龄和厚度估计的结合, 得到了 1982~2007 年的海冰厚度近似值。这些数据显示, 除了多年冰整体在减少之外, 剩下的多年冰盖中的最老最厚的冰有着明显地减少。Vinnikov et al. (1999) 利用 5 种不同的来源、范围和时间段的海冰观测资料发现, 自 20 世纪 80 年代开始, 海冰范围迅速减少, 一直持续到 90 年代中后期, 并且资料年代越后, 海冰的减小趋势越明显, 进入 21 世纪以来, 北极海冰进一步减少, 并且屡创新低 (Comiso et al., 2008)。

北极海冰的减少会对全球变化产生一系列影响, 主要由北极海冰减少带来的北极增暖 (Screen and Simmonds, 2010) 会减小北极与中纬度地区之间的温度梯度, 使中高纬度之间的西风环流减弱, 即急流的经向振幅增强, 会使中高纬度地区出现更多的阻塞形势, 有可能使极端冷事件发生的频率增

加 (Tang et al., 2013), 另一方面, 北极开阔水域的增多会使大气中水汽含量的增多, 而近些年来东亚和北美地区冬季的极端严寒天气可能与上述机制有关 (Liu et al., 2012)。

由于北极海冰密集度的卫星反演资料的起始时间是 1979 年, 来自卫星、海军潜艇、声呐、船舶设备和野外对海冰测量的观测数据都有时间和空间上的局限性, 并且海冰厚度的观测缺乏持续性和准确性, 大多数有关海冰减少研究的文章主要探讨了其与大气环流主模态的关系及其气候研究效应 (魏立新和张海影, 2005; 樊婷婷等, 2012; 武丰民等, 2014), 很少从海冰减少的实质进行研究, 为了能在完整的时间序列上分析海冰的变化并且详细探讨 20 世纪 90 年代以来海冰减少的原因, 本文采用了对北极海冰模拟较好 (Laxon et al., 2013) 的海冰模式输出结果, 对比观测资料, 分析 20 世纪 90 年代以来北极海冰变化的动力与热力特征, 并探讨这些变化与北极大气模态之间的关系。在研究海冰的热动力特征方面, 本文将海冰的运动作为海冰动力进行分析, 即计算海冰输出北极的年通量; 而海冰的融化和增长作为热力进行分析, 热力作用由动力作用间接得出。

2 资料和模式验证

2.1 资料

本文主要采用了华盛顿大学 Zhang and Rothrock (2003) 研发的 PIOMAS 海冰模式, 该模式是全球并行海洋和海冰模式 (Parallel Ocean and sea Ice Model, POIM) 的组成部分, 而 POIM 耦合了并行海洋计划 (Parallel Ocean Program, POP) 和厚度和焓分布 (thickness and enthalpy distribution, TED) 海冰模式, 它被定义在广义正交曲面坐标系 (GOCC) 中。驱动 PIOMAS 海冰模式所用的大气资料来自 NCEP/NCAR 再分析资料, 且卫星观测的海冰密集度也被同化进模式里, 模式遵循粘塑性流变和海冰厚度分布 (Zhang and Rothrock, 2003)。本文采用了该模式输出的海冰密集度、海冰厚度、海冰流速的月平均资料, 时间范围为 1979~2013 年, 将原来

的模式中曲面坐标的格点 (360×120) 数据二次插值到经、纬度 ($1^\circ \times 1^\circ$) 网格上。同时, 本文还采用了美国国家冰雪数据中心 (NSIDC) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 的微波被动遥感海冰密集度的卫星数据 (<http://nsidc.org/data-set/NSIDC-0192> [2016-06-12])。文中使用的海平面气压 (Sea Level Pressure, SLP) 的月平均资料也来自 NCEP/NCAR 的再分析资料, 时间范围取 1979~2013 年 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html> 2016-06-12])。

2.2 模式验证

根据 Zhang and Rothrock (2003) 对模式中的系统误差的分析表明, 海冰速度与观测的 IABP (International Arctic Buoy Program) (Rigor and Heiberg, 1995) 相比, 有 8% 的误差, 北极海冰厚度有 9% 的偏差, 模拟的海冰范围与观测海冰范围相比有 14% 的误差。Schweiger et al. (2011) 还将 PIOMAS 模式的海冰厚度数据与定点浮标的观测数据和 ICESat 数据相比, 发现 PIOMAS 模式高估了薄冰的厚度, 低估了厚冰的厚度, 但是 PIOMAS 模式的厚度空间分布和 ICESat 数据是很吻合的。

另外, 我们还对模式的数据进行了验证, 用 CryoSat-2 (ESA's Earth Explorer CryoSat mission) 卫星、ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) 卫星和 AIR-EM (Airborne Electromagnetic Induction) 机载观测的海冰厚度资料对该模式的厚度数据准确性进行验证。如图 1a, 给出了 PIOMAS 模式模拟的 1979~2013 年 9 月北极海冰体积量, 其中虚线为体积量的 5 年高斯滑动平均, 红色的圆圈是 AIR-EM 机载观测到的海冰厚度的数据推算出的海冰体积量, 绿色的圆圈是通过 ICESat 卫星观测推算出的海冰体积量。图 1b 是 2011~2015 年 $70^\circ\text{N} \sim 85^\circ\text{N}$ 平均的 PIOMAS 模式模拟值 (1~12 月) 和 CryoSat-2 卫星观测推算值 (1~5 月、10~12 月) 的每月的海冰体积比较结果, 其中, 蓝色的圆圈是 CryoSat-2 的结果, 黑色方框是 PIOMAS 的模拟值, 从图中可以看出, Cryosat-2 卫星的结果与 PIOMAS 模式是基本吻合的。因此, 尽管 PIOMAS 模式在一定的时段内低估了海冰的留存量, 但是 PIOMAS 模式对海冰的模拟结果还是具有可信度的。

3 北极海冰减少的热动力分析

北极海冰减少的动力原因主要是因为海冰从

北冰洋的输出 (但是动力输出中因为融化而导致的海冰减少在这里被认为是海冰减少的热力原因), 输出的固体海冰约 90% 通过弗拉姆海峡。弗拉姆海峡位于格陵兰岛和斯瓦尔巴德岛之间, 大致的纬度在 $77^\circ\text{N} \sim 81^\circ\text{N}$ 之间, 宽度约为 450 km, 是大西洋和北冰洋联系的重要通道, 而北极海冰每年通过弗拉姆海峡向大西洋的输出量约为 0.1 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) (Hibler, 1979), 其总量约为海冰范围的 10%。海冰热力变化的主要原因是太阳短波辐射和冰反照率机制的正反馈的变化, 相对于开阔水域, 海冰的反照率可达 80%, 即海冰能将大部分的太阳辐射反射回大气, 但是随着 20 世纪 90 年代以来北极海冰的明显减少, 整个北极的反照率也在随之下降, 有更多的太阳辐射进入海洋, 形成冰反照率的正反馈机制 (田忠翔, 2012)。

由于海冰的动力机制主要通过海冰的运动来实现, 海冰的运动又决定了海冰的输入输出, 因此为了更加直观地看出海冰动力和热力变化, 本文把海冰输出体积的年通量作为海冰变化的动力原因来讨论, 在北冰洋中的海冰的增长与融化作为海冰的热力原因。动力影响中, 本文将海冰从北极的输出作为动力原因, 即计算 PIOMAS 模式中的网格数据, 采用公式 $F = \int \text{Sic}(x)V(x)H(x)dxdt$ 计算海冰体积的输出通量。其中, F 表示体积流出量, Sic 表示海冰密集度, V 表示海冰流速 (向北为正), H 表示海冰厚度, x 表示相邻网格点之间的距离, t 为时间积分, 时间取为当年 10 月到次年 9 月 (Kwok and Rothrock, 1999)。

由于热力影响的效果不能直观的被探测到, 所以我们采用每年 9 月海冰体积的变化量与动力影响的差值间接算出热力影响, 即公式:

$$V_{\text{Vol}i} - F_i + (G - M)_i = V_{\text{Vol}i+1}, \quad (1)$$

其中, $V_{\text{Vol}i}$ 代表当年 9 月份的海冰体积量, F_i 代表当年 10 月份到次年 9 月份的海冰输出体积通量, $(G - M)_i$ 代表当年 10 月到次年 9 月海冰在北冰洋内的增长与融化 (即热力影响), $V_{\text{Vol}i+1}$ 代表次年 9 月份的海冰留存量, 由此可以定量算出海冰的热力影响。在这里, 我们把热力过程定义为海冰的增长和融化是为了简化的分析海冰的变化, 当然这其中也包括了由于风和海流的作用而引起的垂直混合导致的海冰融化, 不可否认, 混合作用是很重要的过程, 但是目前普遍的研究表明, 垂直的混合作用与表面能量平衡和动力向低纬度的输送而言是二

阶的,也就是其不是最重要的因素(Padman and Dillon, 1987; Timmermans et al., 2008; Fer, 2009; Lenn et al., 2009)。Rippeth et al. (2015)的研究表明,北极内部的垂直混合是相当弱的,热通量为 $0.05 \sim 0.3 \text{ W m}^{-2}$,并且其大部分是来自于双扩散作用,但是除了 2012 年发生在北极的超级气旋除外,风在其中也许起到了一个主要的作用。Polyakov et al. (2010)也表明,相比于中纬度地区,北冰洋的内波是很弱的,微观的观测表明,在北冰洋内部的存在非常小并且少的扩散,其大小约为 $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$,因此导致的扰动热通量也很小,但是热通量的大小取决于海底地形。通过现代和历史数据的对比,Guthrie et al. (2013)指出尽管海冰在剧烈的减少,但是混合作用在近 30 年没有明显的变化,混合热通量与双扩散有关。由于表面层结稳定,所以一般而言在北冰洋垂直混合是受到抑制的。

北冰洋和外界大洋相连的主要出口一共有 4 个,即白令海峡、弗拉姆海峡、斯瓦尔巴德岛以东和巴伦支东部,但是该模式在白令海峡只有一个网格点且通过白令海峡输出的海冰体积量相比于弗拉姆海峡的量可以忽略不计,所以,为了更加准确的估计海冰的输出,我们将海冰的输出通道具体细分为 3 个区域,最主要的 I 区是弗拉姆海峡,即 (79°N , $20^\circ\text{W} \sim 15^\circ\text{E}$), II 区是斯瓦尔巴德岛以东,即 (80°N , $28^\circ\text{E} \sim 55^\circ\text{E}$), III 区是巴伦支海东部,即 ($75^\circ\text{N} \sim 80^\circ\text{N}$, 55°E)。将这三个地区输出的海冰体积年通量之和作为北冰洋海冰的动力变化,可以得到 1980~2013 年的北冰洋海冰输出年通量。为了对这三个区域有更加清晰的理解,图 2 给出了 NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 资料显示的海冰密集度的多年 (1978~2014 年) 平均空间分布图。

图 3a 给出了 PIOMAS 模式的 1979~2013 年 9 月北极海冰体积量的 5 年滑动平均和线性趋势。从图中可以看出,1980~1990 年 9 月海冰的变化趋势很小,但是从 20 世纪 90 年代开始,9 月的海冰留存量出现急剧的下降,并且其下降的线性趋势通过 99% 的信度检验,减少速度大约为每年 307 km^3 。图 3b 给出了 PIOMAS 模式中北极海冰体积输出的年通量,从图中我们可以看出海冰体积输出的年通量随着时间呈现出很明显的递减趋势,并且经过检验,这种趋势是显著的,特别是 1980~1985 年、1993~1998 年、2002~2013 年,海冰体积输出通

量都存在显著的减少。

由 1979~2013 年 9 月份的海冰留存量和当年 10 月到次年 9 月海冰体积输出通量的差值,可以算出 1980~2013 年每年的北极海冰融化和增长,即热力的作用(图 4,图中 y 轴代表海冰增长减去海冰融化, $y > 0$, 代表海冰的增长大于海冰的融化),其斜率是 $-24.75 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$,并且线性减少的趋势是不显著的,从滑动平均上看,20 世纪 90 年代之前,热力变化的趋势不明显,但是从 90 年代之后特别是 21 世纪以来,热力变化的部分开始减少。

根据以上 PIOMAS 模式对北极海冰动力过程和热力过程时间序列的模拟,下面我们主要针对动力过程分析北极海冰变化的原因。北极海冰从冰龄上,可以分为季节冰和多年冰。季节冰在每年的融化季(每年 7~9 月)会被融化,所以季节冰主要以一年冰为主,而多年冰至少能维持一个融化季,因此,当某一年冰在 9 月份之后依然存在,它就转为多年冰。而多年冰厚度的增加会对动力和热力过程的外强迫的响应更加稳定。因此,多年冰的数量也是衡量海冰缩小或者增加的标准(Perovich and Richter-Meng, 2009)。多年冰范围的最高值会出现在 9 月,即融化季的最后,并且多年冰的输出主要是通过弗拉姆海峡,而 PIOMAS 模式并未提供关于多年冰冰龄的资料,因此,为了更好的衡量多年冰的状态,下面将对弗拉姆海峡的体积输出通量进行分析。

图 5a 给出了通过弗拉姆海峡的海冰体积输出量。从图中可以明显地看出,1995 年之后弗拉姆海峡的海冰体积输出量有急剧的减少。为了分析其变化的原因,图 5b 给出了通过弗拉姆海峡的面积输出通量的图,图中可以很明显地看出,1995 年之后,面积输出通量有显著的上升,这跟图 5a 的海冰体积输出量的减少正好相反,这说明在 PIOMAS 模式结果中至少从 1995 年开始,海冰厚度有急剧的减少,这恰好证明了 Maslanik et al. (2007, 2011) 的观点,即从 20 世纪 80 年代中期开始到 2011 年,由多年冰组成的海冰范围的比例从 75% 下降到 45%,然而,多年冰盖中最老的冰的比例由 50% 下降到 10%,现在冰盖 58% 的冰多是由 2~3 年的新冰组成的,并且指出最老和最厚的冰的大幅度减少和海冰的输出等因素增加了开阔水域,从而促进了海冰反照率的正反馈机制,造成了海冰大范围的减少。

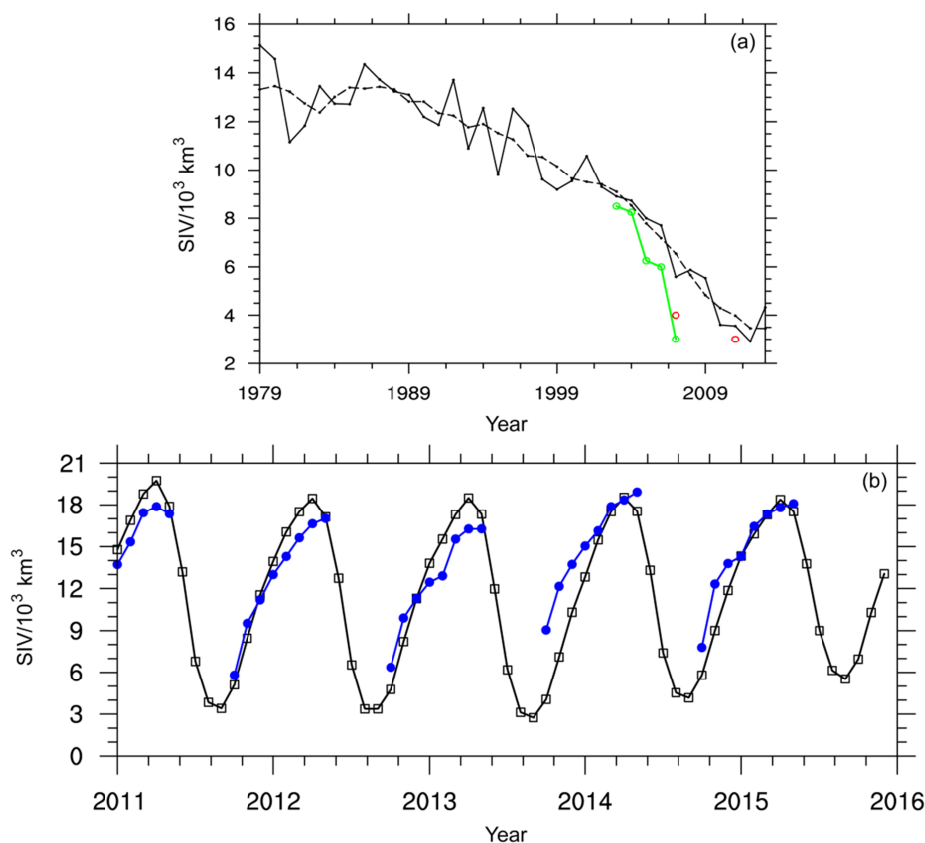


图1 (a) 1979~2013 年 9 月海冰体积量 (单位: 10^3 km^3) 随时间的变化, 实线表示 PIOMAS 模式模拟值, 虚线表示 5 年高斯滑动平均值, 带绿色圆圈的线表示 ICESat 卫星观测值, 红色的圆圈表示 AIR-EM 机载观测值。(b) 2011~2015 年 PIOMAS 模式模拟 (黑线) 的和 CryoSat-2 卫星观测 (蓝线) 的海冰体积量 (单位: 10^3 km^3) 随时间的变化

Fig. 1 (a) Time series of sea ice volume (SIV, units: 10^3 km^3) for September 1979–2013. The solid line denotes PIOMAS (Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System) simulation, the dashed line denotes 5-year Gaussian running mean, the solid line with green circles denotes satellite retrievals from ICESat-2 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite), the red circles denote observations from AIR-EM (Airborne Electromagnetic Induction). (b) Time series of SIV (units: 10^3 km^3) from PIOMAS simulation (black line) and CryoSat-2 (ESA's Earth Explorer CryoSat mission) data (blue line)

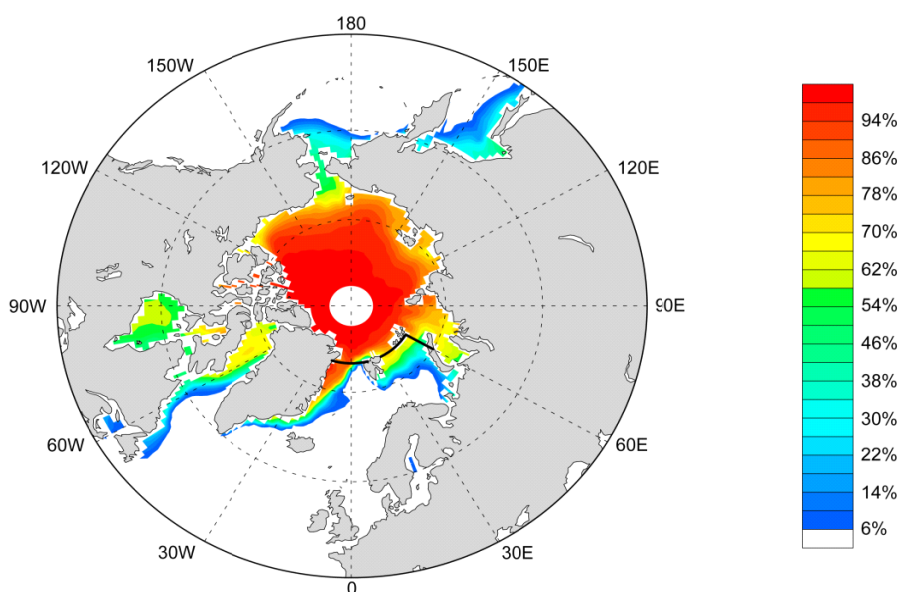


图2 NSIDC 资料显示的北极海冰密集度的多年 (1979~2014 年) 平均分布, 黑色实线为 3 个海冰输出通道

Fig. 2 Distribution of multi-year average Arctic sea ice concentration from NSIDC (National Snow and Ice Data Center) data during 1979–2014, black line denotes three sea ice output channels

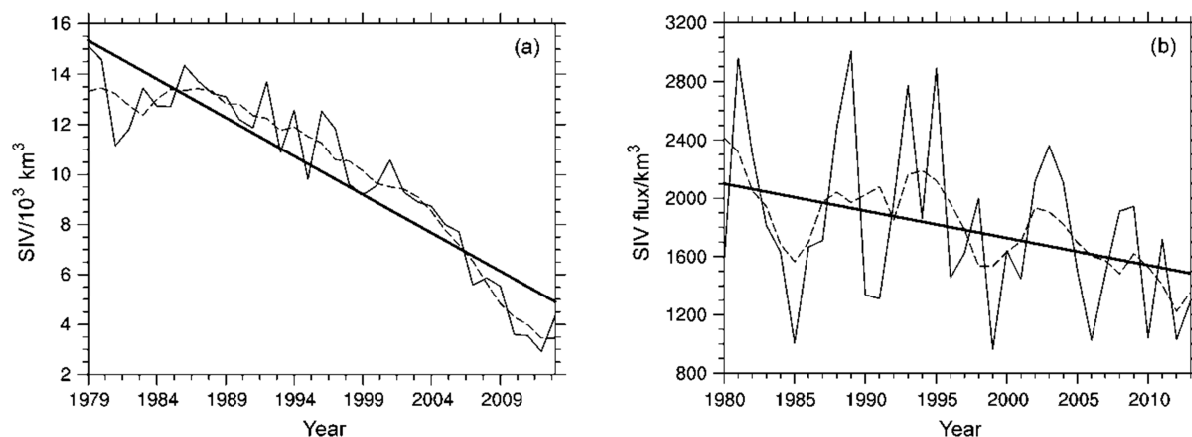


图3 PIOMAS 模式模拟的1979~2013年9月份北极海冰(a)体积量(单位: 10^3 km^3)、(b)体积输出年通量(单位: km^3)的时间序列。虚线代表5年高斯滑动平均,粗实线代表线性趋势(a图中粗实线斜率为 $-307 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$, b图中粗实线斜率为 $-18.65 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)

Fig. 3 Time series of (a) Arctic SIV (units: 10^3 km^3) and (b) annual output of Arctic SIV flux (units: km^3) simulated by PIOMAS for September 1979–2013. The dashed line denotes 5-year Gaussian running mean, the heavy line denotes the linear trend (slope in Fig. a: $-307 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$; slope in Fig. b: $-18.65 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)

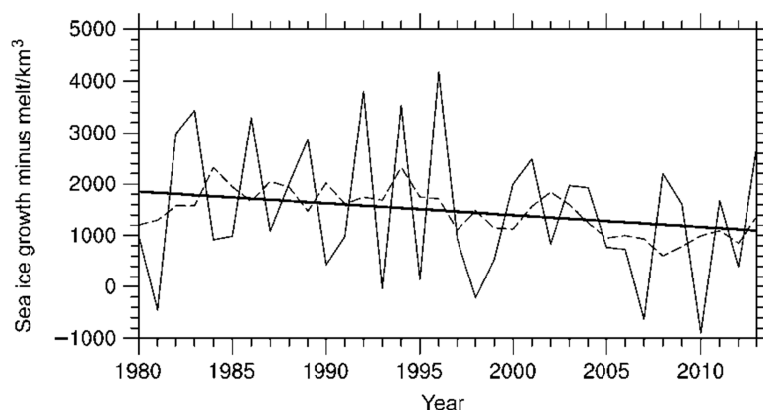


图4 PIOMAS 模式模拟的北极海冰的热力学变化时间序列(实线,单位: km^3)。虚线为5年高斯滑动平均,粗实线为线性趋势(斜率: $-22.86 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)

Fig. 4 Time series of Arctic sea ice thermodynamic change (solid line, units: km^3) simulated by PIOMAS. The dashed line denotes 5-year Gaussian running mean, and the heavy line denotes the linear trend (slope: $-22.86 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)

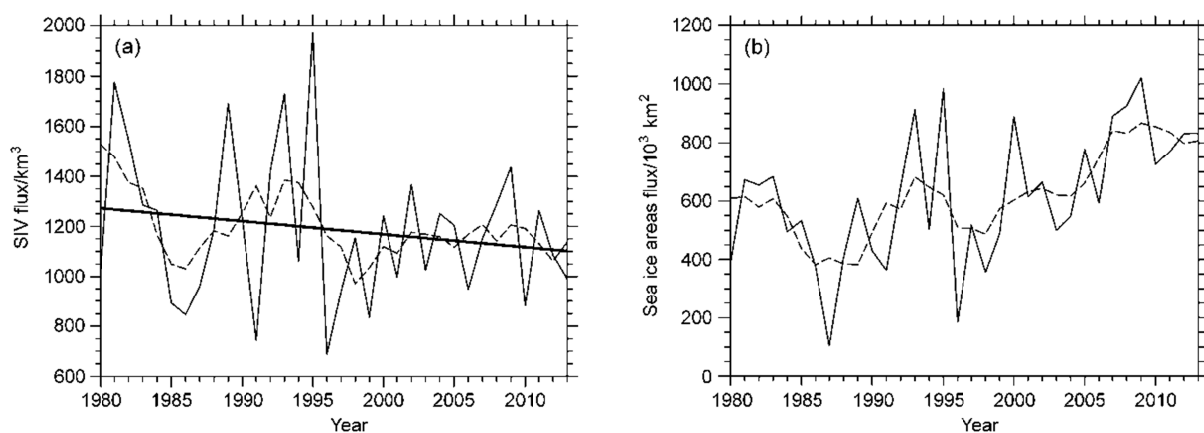


图5 PIOMAS 模式模拟通过弗拉姆海峡的北极海冰(a)体积年输出通量时间序列(单位: km^3)、(b)面积年输出通量时间序列(单位: 10^3 km^2)。虚线代表5年高斯滑动平均,图a中粗实线代表线性趋势(斜率: $-5.18 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)

Fig. 5 Time series of annual output of (a) Arctic SIV flux (units: km^3), (b) Arctic sea ice area flux (units: 10^3 km^2) through Fram Strait simulated by PIOMAS. The dashed line denotes 5-year Gaussian running mean, and the heavy line in Fig. a denotes the linear trend (slope: $-5.18 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)

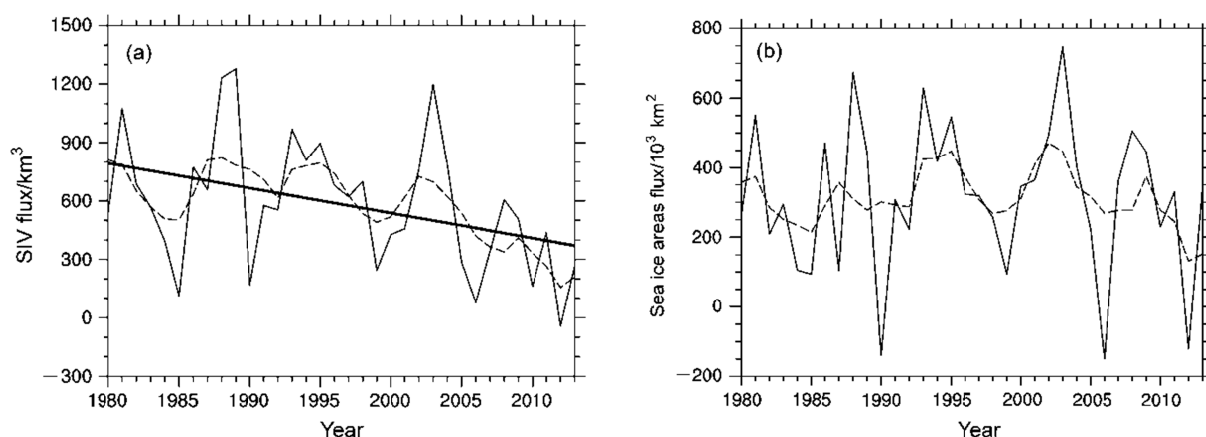


图 6 PIOMAS 模式模拟通过 II 区的北极海冰 (a) 体积输出年通量 (单位: km^3)、(b) 面积输出年通量 (单位: 10^3 km^2)。虚线为 5 年高斯滑动平均, 图 a 中粗实线为线性趋势 (斜率: $-12.80 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)

Fig. 6 Time series of annual output of (a) Arctic SIV flux (units: km^3), (b) Arctic sea ice area flux (units: 10^3 km^2) through district II (East of Svalbard Island) simulated by PIOMAS. The dashed line denotes 5-year Gaussian running mean, and the heavy line in Fig. a denotes the linear trend (slope: $-12.80 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)

尽管通过弗拉姆海峡的体积输出通量从 1995 年之后有所减少, 但是其减少的趋势并不显著, 而总的海冰体积的输出量自 1995 年之后十分显著, 所以有可能是斯瓦尔巴德岛以东 (即 II 区) 或者 III 区的海冰输出减少导致的。对 II 区的体积输出量进行分析, 可以看出, 自 1995 年以来, II 区的体积输出量有明显地减少 (图 6a), 其减小的趋势通过 95% 的信度检验。其面积输出 (图 6b) 在 21 世纪之后减少, 其 9 月份的冰速在 21 世纪之后有显著的变缓 (图略), 加上 II 区输出的海冰以薄冰为主, 冰厚度的变化不明显, 因此 II 区的海冰输出的变化是受多重因素影响的: 海冰冰缘的后退或者冰速的减缓都有可能导其体积输出减少, 各因素之间有复杂的相关关系, 在这里不能简单地通过 PIOMAS 模式的数据进行一一的论述, 所以这也是未来研究海冰的发展方向之一。III 区对海冰减少的动力影响可以忽略。

但是由于 PIOMAS 模式并未提供有关海冰的底部、顶部和侧边界融化的信息以及其开始增长的时间, 所以本文无法对海冰的热力影响的变化进行具体的分析, 这有待以后对 PIOMAS 模式开展进一步的讨论与研究。

4 北极海冰减少的变化

许多研究指出, 在 20 世纪 90 年代之后, 北极海冰有了显著的减少 (Comiso, 2002; Rothrock et al., 2008; Lindsay et al., 2009; Kwok, 2009; Kwok and

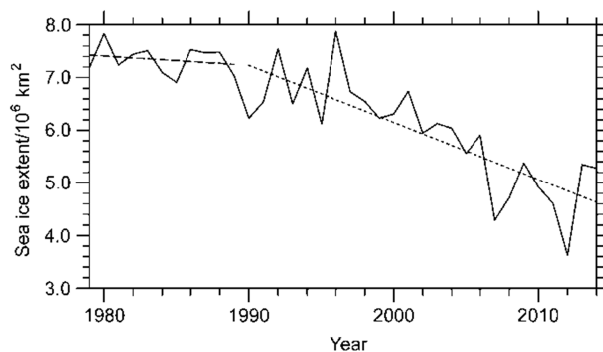


图 7 NSIDC 观测的 9 月海冰范围的时间序列 (实线, 单位: 10^6 km^2)。长虚线代表 1979~1989 年的线性趋势 (斜率: $-17.55 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$), 短虚线为 1990~2013 年的线性趋势 (斜率: $-108.30 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)

Fig. 7 Time series of September sea ice extent (solid line, units: 10^6 km^2) from NSIDC observations. The dashed line denotes linear trend for 1979~1989 (slope: $-17.55 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$), and the dotted line denotes linear trend for 1990~2013 (slope: $-108.30 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$)

Rothrock, 2009; Kwok et al., 2009; Kwok and Untersteiner, 2011), PIOMAS 模式的结果也看出 9 月北极海冰体积量也呈显著减少趋势 (图 3a), 有必要进一步分析海冰减少的动力过程和热力过程的相对贡献量。因为卫星观测数据是从 1979 年开始, 因此 PIOMAS 模式的数据也是从 1979 年开始, 所以本文选取卫星观测资料中的前 11 年作为北极海冰的常态年, 为了验证这一选择, 本文把 NSIDC 观测的 1979~1989 年 9 月海冰范围变化趋势和 1990 年之后的变化趋势进行了比较, 如图 7, 发现 1979~1989 年海冰范围的斜率为 $-17.55 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$, 线性趋势在 0.05 的显著性水平下是不显著的, 而 1990

年之后海冰范围的减少(斜率为 $-108.30 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$)是显著的。

因此本文将 PIOMAS 模式模拟的 20 世纪 90 年代以来北极海冰与 1979~1989 年时段海冰变化进行比较, 并分析其热力过程和动力过程的相对变化。即应用上述公式的变形, 可得到:

$$V_{\text{Vol}i} - V_{\text{Vol}i+1} = F_i - (G - M)_i.$$

根据第二部分讨论的内容, 我们将定义的三个区域的海冰输出综合起来考量, 即可以得到整个北极的海冰的输出, 即海冰的动力学的变化, 从而间接可以得到海冰的相对的热力的变化。但是三个区域的海冰的输出有明显的区域差别, I 区的海冰的输

出占总的输出的约 70%, 并且其以输出多年冰为主; II 区的海冰输出有明显的下降趋势, 特别是 2003 年之后; III 区的海冰的运动总体的变化不大, 但是有的年份呈现出海冰输入的情况(图略)。这样, 对于整体北极海冰 1990 年以来的热动力变化(图 8), 从 9 月海冰体积相对于 1979~1989 年的图(图 8a)上看, 20 世纪 90 年代以来, 9 月海冰留存量一直处于减少的状态; 从 9 月海冰体积的年际变化量(次年 9 月海冰体积减去当年 9 月海冰体积)上来看(图 8b), 1990~2000 年, 海冰体积相对变化量不大, 即一直在 1979~1989 年线上波动, 但是 21 世纪以来, 变化量明显有增加的趋势, 即海冰的

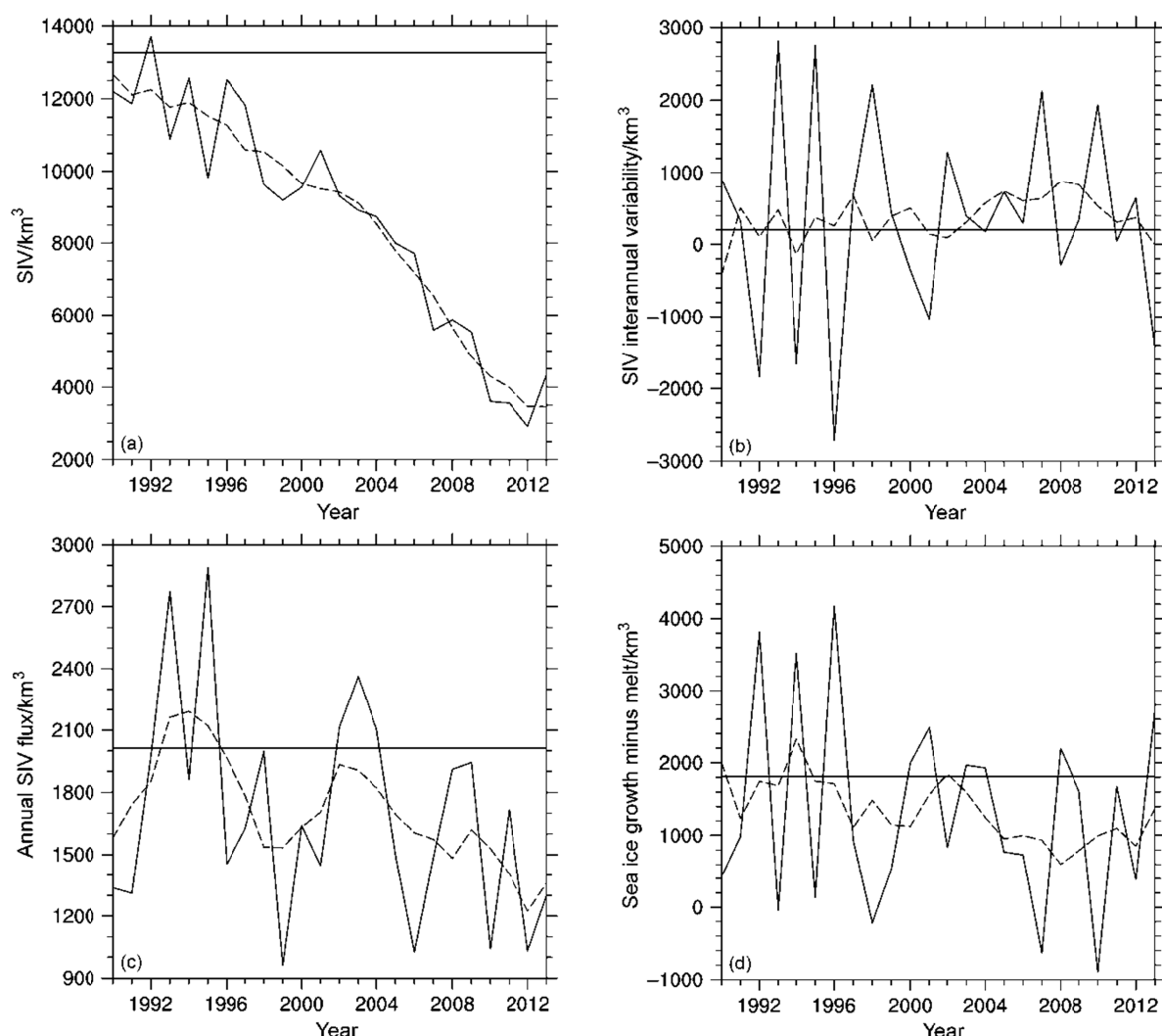


图 8 PIOMAS 模式模拟的 1990 年之后的 (a) 9 月北极海冰的体积(单位: km^3)、(b) 9 月北极海冰体积的年际变化量(单位: km^3)、(c) 北极海冰体积输出年通量(单位: km^3)、(d) 北极海冰的热力学过程(单位: km^3)相对于 1979~1989 年的时间序列。水平实线为 1979~1989 年的平均值, 虚线为 5 年高斯滑动平均

Fig. 8 Time series of (a) September Arctic SIV (units: km^3), (b) September Arctic SIV interannual variability (units: km^3), (c) output of annual Arctic SIV flux (units: km^3), (d) Arctic sea ice thermodynamic process (units: km^3) simulated by PIOMAS after 1990 compared to those during 1979–1989. Horizontal line denotes 1979–1989 mean, and the dashed line represents 5-year Gaussian running mean

减少呈现出类似于直线式下降的形势, 这与 21 世纪之前的波动式下降有所不同。图 8c 给出的是海冰体积输出的变化(其中, 正值代表海冰体积通量从北极的输出), 从图中可以很明显地看出, 21 世纪之前, 体积输出量先上升, 后下降, 但是到 21 世纪之后, 基本一直维持在下降的状态, 且 21 世纪之后的体积输出通量基本处在 1979~1989 年平均值之下。特别注意的是, 1993~1997 年海冰输出的下降对应于 I 区海冰(图 5a)在 1995 年之后均值和方差明显地减少, 而 2003 年之后总体海冰输出的下降对应于 II 区 2003 年之后的海冰(图 6a)显著下降。图 8d 给出的是海冰的热力变化(其中, y 轴表示海冰结冰体积减去融化体积, 在一般状态下, 其值为正, 即海冰处于不断结冰过程中), 可以看出, 1996 年以来, 北极海冰结冰和融化之间的差值普遍比 1979~1989 年要低, 即说明海冰的总体结冰量在 1996 年之后普遍减少, 而在 1999~2002, 其值有明显的上升趋势, 之后一直稳定处于平均值之下, 即热力过程使海冰结冰, 但是净的增长冰的含量却在下降, 特别是在 2007 年和 2010 年出现了海冰融化超过增长的状态, 这也可能是导致 2007 年海冰异常偏少的原因之一。这里并没有针对 I、II 和 III 区海冰的热动力进行分析是因为其在融化季处于海冰的边缘, 海冰回退的速度非常快, 其位置上海冰的变化很大程度上受辐射的影响, 这其中的热力和动力的作用非常复杂, 不能进行完全的区分, 所以未来对于海冰边缘的回退机制需要更加进一步的考量。

表 1 给出了 PIOMAS 模拟的 9 月海冰热力和动力相对于 1979~1989 年的变化, 其中, 1990~2013 年 9 月海冰的体积量减少了 33.0%, 2000~2013 年的减少最高达到 48.2 %, 说明 21 世纪之后海冰的体积量减少是显著。并且, 相对于 1979~1989 年, 20 世纪 90 年代之后, 海冰的动力和热力分别减少了 17.5%和 28.0%, 21 世纪之后的海冰动力和热力

的减少分别为 22.0%和 33.2%, 这说明, 20 世纪 90 年代以来海冰体积量的减少主要原因是其热力部分的减少, 即海冰的增长减少或者海冰的融化增多, 或者两者都在发生。且在 0.05 的显著性水平下, 20 世纪 90 年代以来除了海冰体积量的方差是显著的之外, 动力和热力的方差均不显著, 但是三者的均值相对于 1979~1989 年都是显著的。即海冰的总量有明显地减少, 但是整体的振幅没有太大变化。

综上所述, 20 世纪 90 年代以来海冰减少的主要原因以热力为主, 而且, 由图 8c 可以看出, 20 世纪 90 年代后, 相对 1979~1989 年的平均值, 由动力过程造成的海冰输出是减少的, 而海冰体积量是显著减少趋势, 动力过程造成的海冰减少趋势不是显著减少而是增加的, 所以由热力过程造成的海冰减少是显著的, 它通过减少海冰增长或者增加海冰融化使得海冰的范围有大幅度的减少。

5 北极海冰减少与大气模态变化的关系

大气模态的变化对海冰的变化也有显著的影响(Mcphee et al., 1998; Dickson et al., 2000; Ikeda et al., 2001; Jung and Hilmer, 2001; Overland et al., 2012), 下文将着重分析北极涛动(AO, Arctic Oscillation)和北极偶极子型(AD, Arctic Dipole)对海冰变化的影响。AO 是对海冰变化产生影响的大气中的大尺度环流, 又称北半球环状模态, 它最早是由 Thompson and Wallace (1998)提出的, 它描述了北半球气候变率的主要模态。AO 的正位相表示北极中心存在低压, 而中纬度地区存在高压, 极地与中纬度地区之间的气压差增加, 抑制冷空气向南输送, 更多的海冰滞留在北极, 即北极的海冰增多。而当 AO 处于负位相时, 北极地区的海冰减少。AO 正负位相的不同主要在于波弗特涡旋的半径和穿极流(TDS, Transpolar Drift Stream)的位置

表 1 1979~1989 年平均的 9 月海冰体积量、体积输出量、热力变化量以及这些变量 1990~2013 年 9 月相对于 1979~1989 年 9 月变化值(单位: km³)及相应的变化比例。各时间段的各变量值均来自于 PIOMAS 模式模拟值

Table 1 September Arctic SIV, output annual volume flux, and thermodynamic variation during 1979~1989, and their differences between 1990~2013 and 1979~1989. All variables are from PIOMAS simulation

	海冰体积量或变化量/km ³	海冰体积输出量或变化量/km ³	海冰热力变化量/km ³
1979~1989 年	13289.80	1975.87	1772.72
1990~2013 年相对 1979~1989 年的变化量(比例)	-4385.63 (-33.0%)	-345.78 (-17.5%)	-496.36 (-28.0%)
1990~1999 年相对 1979~1989 年的变化量(比例)	-1475.17 (-11.1%)	-197.59 (-10.0%)	-395.32 (-22.3%)
2000~2013 年相对 1979~1989 年的变化量(比例)	-6405.68 (-48.2%)	-434.69 (-22.0%)	-588.54 (-33.2%)

(Rigor and Wallace, 2004)。波弗特涡旋的作用是把海冰留在北极, 因为波弗特涡旋是顺时针的, 在北极东北部海流向加拿大海盆吹, 但因海岸的阻挡, 在北极西部海冰堆积, 海冰厚度较厚。而穿极流的作用主要是将海冰通过弗拉姆海峡输出北极。如图 9, 在 AO 负位相期间 (图 9a), 由于极涡减弱, 波弗特高压加强, 则波弗特涡旋的半径增加, 穿极流更加弯曲, 输送的海冰输出相对较少; 在 AO 正位相期间 (图 9b), 极涡加强, 波弗特高压减弱, 波弗特涡旋的半径减少, 穿极流更直, 所以有更多的海冰从北极输出 (Perovich and Richter-Meng, 2009)。

而与海冰输出变化相联系的中尺度大气环流模式是 AD (Arctic Dipole), 它是由 Wu et al. (2006) 提出的, 它被定义为 70°N 以北冬季 (11 月至次年 3 月) SLP 距平场的 EOF 第二特征向量场, 其中 EOF 的第一特征向量场类似于 AO 的环流模式。由于 AD 有异常强的经向性, 所以它可以被认为是驱动海冰输出最显著的大气强迫 (Ikeda, 2012)。与 AD 相比, AO 只有一个中心在北极的环形结构, 而 AD 在极地有两个位相相反的中心: 一个中心从加拿大北极群岛穿过格陵兰岛延伸到东南方的北欧地区, 另一中心位于喀拉海和拉普帖夫海。这种偶极子的结构导致压力梯度的 0 值线从白令海峡起, 穿过北极一直到格陵兰海和巴伦支海。AD 正位相期间 (SLP 在加拿大群岛是正异常在巴伦支海是负异常, 即加拿大群岛的气压相对较高, 而巴伦支海的气压相对较低), 波弗特涡旋减弱, 并且异常的风从北极西部吹向北极东部, 即吹向格陵兰海, 加速了穿极流使更多的海冰从弗拉姆海峡输向格陵兰海和巴伦支海 (Wu et al., 2006; Watanabe et al., 2006; Overland and Wang, 2010); AD 负位相期间则相反, 波弗特涡旋加强, 异常风使更多的海冰滞留在北极西部 (Ikeda, 2009)。即海冰的输出会在 AD 正位相时增加, AD 负位相时减少。

本文利用 NCEP/NCAR 的海平面气压场 (SLP) 的再分析资料, 通过经验正交函数 (EOF) 的方法并且去除了年循环和趋势之后, 根据 Thompson and Wallace (1998) 和 Wu et al. (2006) 的定义, 本文计算了 1948~2014 年的冬季 (11 月至次年 3 月) 20°N 以北的 SLP 距平场的 EOF, 并将 EOF 的第一模态的时间序列作为 AO 指数, 将冬季 (11 月至次年 3 月) 70°N 以北的 SLP 距平场的 EOF 的第二模

态的时间序列作为 AD 指数, 并且将计算的结果与 Ikeda (2009) 的结果进行对比, AO 和 AD 的空间型和指数都有很好的对应。从中我们提取 1980~2013 年的 AO 和 AD 指数, 分析其与海冰输出之间的相关关系, 根据上文他们之间的相互作用主要在 I 区和 II 区, 所以我们主要探讨 I 区和 II 区海冰输出总量与 AO 和 AD 指数的相关, 通过分析可以发现, AO 指数和海冰体积分量的输出是正相关, 相关系数是 0.499, 解释方差为 24.86%, 相关系数通过 99% 的信度水平检验, 而与 AD 呈负相关, 相关系数是 -0.451, 解释方差为 20.35%, 相关系数通过 99% 的信度水平检验 (图 10a、10b)。分别求他们之间的回归方程: $Y=1688.118+265X_1$, $Y=1812.75-237X_2$, 其中, Y 为海冰体积输出量, X_1 为 AO 指数, X_2 为 AD 指数, 如图 10c、10d, 两者和海冰输出量的回归方程也显著的。计算两者与海冰体积输出量的多元线性回归时 (图 11), 计算的回归方程为: $Y=1727.945+294.0447X_1-268.7307X_2$, 解释方差为 50.58%, 复相关系数为 0.711, 且回归方程和复相关系数均经过了 99% 的信度水平检验, 从中可以发现: (1) AO 和 AD 均和海冰的动力输出有相关, 并且其相关性显著, 这也验证了 Tsukernik et al. (2010) 的观点; (2) 两者的结合相比单独一个模态能解释更多的海冰动力输出变化, 这为动力过程提供了一个很好的机理; (3) 两者的多元回归能很好地模拟出海冰体积输出量的变化。然而, 尽管 PIOMAS 模式数据中 I 区的海冰输出量与 AO 的相关关系是显著的, 但是与 AD 的相关关系是不显著的, 并且北极整体的海冰的输出以及大气模态之间的显著的相关性尚待进一步的研究以及验证。

然而, 对于具体的大气模态对北极海冰的影响, 目前则有相当多的研究。Overland and Wang (2010) 发现 SLP 在 20°N 以北的 EOF 第三模态与 70°N 以北的 EOF 的第二模态之间存在相似性, 并且指出 AD 的经向性转变并不是 2007 年夏季北极海冰低值的唯一重要原因, 而是相当于一个先决条件, 同样 AO 也不是唯一促进 2007 年夏季低值的唯一先决条件。Wu and Johnson (2007) 则指出 70°N 以北, SLP 的 EOF 的第三模态 (巴伦支海和波弗特海 SLP 异常的反向变化) 相比较于 AO 和 AD, 对海冰从弗拉姆海峡的输出起到了重要的作用, 尽管其方差的贡献只有 9.1%。Wu et al. (2012) 还对北极地区的表面风场进行复矢量经验正交分解

(complex vector empirical orthogonal function, CVEOF), 将风场分为两个主要的模态, 第一模态包括 AD 和北拉普帖夫海模态 (NLS), 第二模态包括北喀拉海模态 (NKS) 和北极中心模态 (CA),

并且指出 9 月份的最低值与 AD 的负位相和 CA 的正位相有关。所以目前大气环流的变化与北极海冰变化的关系尚未有完全的定论, 这还有待以后进行进一步的研究。

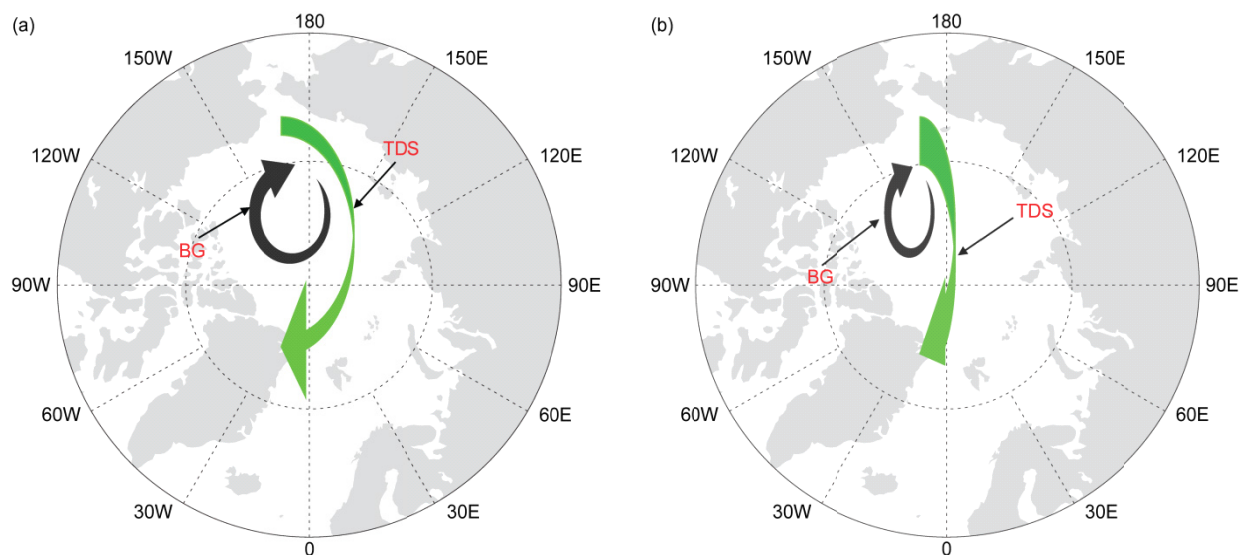


图 9 在 AO (a) 负和 (b) 正位相期间, 波弗特涡旋 (BG) 和穿极流 (TDS) 的相对位置

Fig. 9 Relative positions of Beaufort Gyre (BG) and Transpolar Drift Stream (TDS) during (a) negative phase and (b) positive phase of AO (Arctic Oscillation)

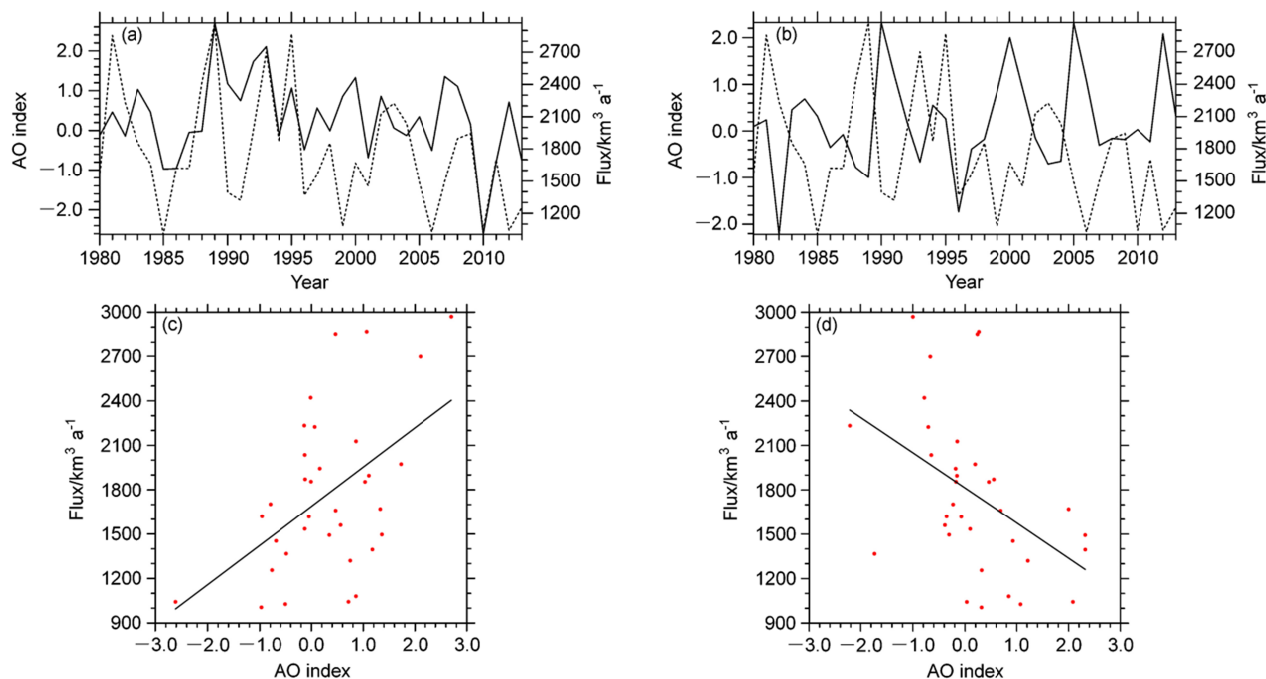


图 10 (a) AO 指数 (实线) 与海冰体积输出通量 (虚线, 单位: $\text{km}^3 \text{a}^{-1}$) 的时间序列; (b) AD 指数 (实线) 与海冰体积输出通量 (虚线, 单位: $\text{km}^3 \text{a}^{-1}$) 的时间序列; (c) AO 指数与海冰体积输出通量的一元线性回归; (d) AD 指数与海冰体积输出通量的一元线性回归

Fig. 10 (a) Time series of AO index (solid line) and Arctic output sea ice flux (dashed line, units: $\text{km}^3 \text{a}^{-1}$). (b) Time series of AD (Arctic Dipole) index (solid line) and Arctic output sea ice flux (dashed line, units: $\text{km}^3 \text{a}^{-1}$). (c) Simple linear regression between AO index and output sea ice flux. (d) Simple linear regression between AD index and output sea ice flux

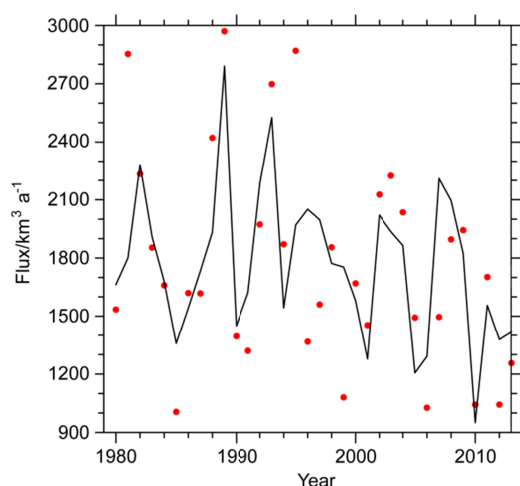


图 11 AO 指数、AD 指数与海冰体积输出通量 (单位: $\text{km}^3 \text{a}^{-1}$) 的多元线性回归, 实线为拟合回归曲线

Fig. 11 Multiple linear regression between AO index, AD index and output sea ice flux (units: $\text{km}^3 \text{a}^{-1}$), black line denotes regression curve

6 结论与讨论

本文通过 PIOMAS 模式结果对 20 世纪 70 年代末以来北极海冰变化进行分析, 可以看出北极海冰在 20 世纪 90 年代之后特别是 21 世纪初有显著的减少, 为了研究海冰减少的具体原因, 本文把海冰的减少分为动力原因和热力原因两个部分, 将海冰从北极的输出作为动力原因, 热力原因由动力原因间接得出。主要结论如下:

(1) 北极海冰的输出从 70 年代末呈现出减少的趋势, 特别是通过弗拉姆海峡输出的多年冰在近 30 年来, 特别是自 1995 年以来冰的厚度有了明显的下降并且多年冰种类有所减少, 即多年冰的年龄层次有了明显地减少。

(2) 海冰的热力作用, 在 20 世纪 90 年代以后特别是 21 世纪以来是北极海冰减少的主导因素, 即海冰的增长和融化对近 30 年来北极海冰的减少起主要作用。

(3) 分析大气环流模态对北极海冰动力减少的影响时, 发现 AO 和 AD 的指数与海冰动力过程输出量有很好的相关关系, 且用 AO 指数和 AD 指数的多元线性回归相能很好地模拟出北极海冰动力的输出量。

在全球变暖的背景下, 近年来对北极海冰减少和影响机制的分析已经取得了一定的成果和进步, 但是还有更多的问题亟待解决。本文只是从 PIOMAS 模式数据的角度阐述了 20 世纪 90 年代以

来北极海冰减少的动力和热力的相对贡献, 由于 PIOMAS 模式还不完善, 例如, 模式中没有加入融池方案, 这也在一定程度上造成了 PIOMAS 模式对北极海冰厚度和海冰速度的低估, 所以需要加强对模式的改进。同时, 由于目前还缺乏更多、更完善、更可靠的海冰观测资料, 所以对海冰热力和动力的相对贡献只有借助模式的数据, 而模式数据与观测数据有一定的偏差。因此, 未来对北极海冰的研究不仅仅要靠修改参数化方案来改进海冰模式, 还要依赖海冰的观测数据, 并利用其对海冰模式进行修正。

致谢 感谢美国华盛顿大学 Zhang Jinlun 博士提供 PIOMAS 模式模拟结果。

参考文献 (References)

- Barber D G, Galley R, Asplin M G, et al. 2009. Perennial pack ice in the southern Beaufort Sea was not as it appeared in the summer of 2009 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (24): L24501, doi:10.1029/2009GL041434.
- Comiso J C. 2002. A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (20): 171–174, doi:10.1029/2002GL015650.
- Comiso J C. 2012. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover [J]. *J. Climate*, 25 (4): 1176–1193, doi:10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
- Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (1): L01703, doi:10.1029/2007GL031972.
- Dickson R R, Osborn T J, Hurrell J W, et al. 2000. The Arctic Ocean response to the North Atlantic oscillation [J]. *J. Climate*, 13 (15): 2671–2696, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2671:TAORTT>2.0.CO;2.
- 樊婷婷, 黄菲, 苏洁. 2012. 北半球中高纬度大气环流主模态的季节演变及其与北极海冰变化的联系 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 42 (7–8): 19–25.
- Fan Tingting, Huang Fei, Su Jie. 2012. The seasonal march of dominate mode of the mid–high latitude atmosphere circulation in Northern Hemisphere and the associated Arctic sea ice [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*, 42 (7–8): 19–25.
- Fer I. 2009. Weak vertical diffusion allows maintenance of cold halocline in the central Arctic [J]. *Atmospheric & Oceanic Science Letters*, 2 (3): 148–152, doi:10.1080/16742834.2009.11446789.
- Guthrie J D, Morison J H, Ilker F. 2013. Revisiting internal waves and mixing in the Arctic Ocean [J]. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 118 (8): 3966–3977, doi:10.1002/jgrc.20294.
- Hakkinen S, Proshutinsky A, Ashik I. 2008. Sea ice drift in the Arctic since the 1950s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (19): L19704, doi:10.1029/2008GL034791.
- Hibler W D I. 1979. A dynamic thermodynamic sea ice model [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 9 (4): 815–846, doi:10.1175/1520-0485(1979)009<0815:ADTSIM>2.0.CO;2.
- Ikeda M. 2009. Mechanisms of the recent sea ice decay in the Arctic Ocean related to the Pacific-to-Atlantic pathway [M]// Nihoul J C J, Kostianoy A

- G. Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions. Netherlands: Springer, 161–169, doi:10.1007/978-1-4020-9460-6_12.
- Ikeda M. 2012. Sea-ice cover anomalies in the Arctic basin associated with atmospheric variability from multi-decadal trends to intermittent quasi-biennial oscillations [J]. *Polar Research*, 31 (2): 18690, doi:10.3402/polar.v31i0.18690.
- Ikeda M, Wang J, Zhao J P. 2001. Hypersensitive decadal oscillations in the Arctic/subarctic climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (7): 1275–1278, doi:10.1029/2000GL011773.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, et al. Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535pp.
- Jung T, Hilmer M. 2001. The link between the North Atlantic oscillation and Arctic sea ice export through Fram Strait [J]. *J. Climate*, 14 (19): 3932–3943, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<3932:TLBTNA>2.0.CO;2.
- Kwok R. 2009. Outflow of Arctic Ocean sea ice into the Greenland and Barents seas: 1979–2007 [J]. *J. Climate*, 22 (9): 2438–2457, doi:10.1175/2008JCLI2819.1.
- Kwok R, Rothrock D A. 1999. Variability of Fram strait ice flux and North Atlantic oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 104 (C3): 5177–5189, doi:10.1029/1998JC900103.
- Kwok R, Rothrock D A. 2009. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (15): L15501, doi:10.1029/2009GL039035.
- Kwok R, Untersteiner N. 2011. The thinning of Arctic sea ice [J]. *Physics Today*, 64 (4): 36, doi:10.1063/1.3580491.
- Kwok R, Cunningham G F, Wensnahan M, et al. 2009. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 114 (C7): C07005, doi:10.1029/2009JC005312.
- Laxon S W, Giles K A, Ridout A L, et al. 2013. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (4): 732–737, doi:10.1002/grl.50193.
- Lenn Y D, Wiles P J, Torres-Valdes S, et al. 2009. Vertical mixing at intermediate depths in the Arctic boundary current [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (5): L05601, doi:10.1029/2008GL036792.
- Lindsay R W, Zhang J, Schweiger A, et al. 2009. Arctic sea ice retreat in 2007 follows thinning trend [J]. *J. Climate*, 22 (1): 165–176, doi:10.1175/2008JCLI2521.1.
- Liu J P, Curry J A, Wang H J, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 109 (11): 4074–4079, doi:10.1073/pnas.1114910109.
- Liu J P, Song M R, Horton R M, et al. 2013. Reducing spread in climate model projections of a September ice-free Arctic [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 110 (31): 12571–12576, doi:10.1073/pnas.1219716110.
- Maslanik J A, Fowler C, Stroeve J, et al. 2007. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (24): L24501, doi:10.1029/2007GL032043.
- Maslanik J, Stroeve J, Fowler C, et al. 2011. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (13): L13502, doi:10.1029/2011GL047735.
- McPhee M G, Stanton T P, Morison J H, et al. 1998. Freshening of the upper ocean in the Arctic: Is perennial sea ice disappearing? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 25 (10): 1729–1732, doi:10.1029/98GL00933.
- Overland J E, Wang M Y. 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice [J]. *Tellus A*, 62 (1): 1–9, doi:10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x.
- Overland J E, Francis J A, Hanna E, et al. 2012. The recent shift in early summer Arctic atmospheric circulation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (19): L19804, doi:10.1029/2012GL053268.
- Padman L, Dillon T M. 1987. Vertical heat fluxes through the Beaufort Sea thermohaline staircase [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 92 (C10): 10799–10806, doi:10.1029/JC092iC10p10799.
- Perovich D K, Richter-Menge J A. 2009. Loss of sea ice in the Arctic [J]. *Annual Review of Marine Science*, 1 (1): 417–441, doi:10.1146/annurev.marine.010908.163805.
- Pfirman S, Haxby W F, Colony R, et al. 2004. Variability in Arctic sea ice drift [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (16): L16402, doi:10.1029/2004GL020063.
- Polyakov I V, Walsh J E, Kwok R. 2012. Recent changes of Arctic multiyear sea ice coverage and the likely causes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (2): 145–151, doi:10.1175/BAMS-D-11-00070.1.
- Polyakov I V, Timokhov L A, Alexeev V A, et al. 2010. Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 40 (12): 2743–2756, doi:10.1175/2010JPO4339.1.
- Rampal P, Weiss J, Marsan D. 2009. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979–2007 [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (C5): C05013, doi:10.1029/2008JC005066.
- Rigor I G, Heiberg A. 1995. International Arctic buoy program data report, 1 January 1994–31 December 1994 [R]. Defense Technical Information Center.
- Rigor I G, Wallance J M. 2004. Variations in the age of Arctic sea-ice and summer sea-ice extent [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (9): L09401, doi:10.1029/2004GL019492.
- Rippeth T P, Lincoln B J, Lenn Y D, et al. 2015. Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography [J]. *Nature Geoscience*, 8 (3): 191–194, doi:10.1038/ngeo2350.
- Rothrock D A, Yu Y, Maykut G A. 1999. Thinning of the Arctic sea-ice cover [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (23): 3469–3472, doi:10.1029/1999GL010863.
- Rothrock D A, Percival D B, Wensnahan M. 2008. The decline in Arctic sea-ice thickness: Separating the spatial, annual, and interannual variability in a quarter century of submarine data [J]. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 113 (C5): C05003, doi:10.1029/2007JC004252.
- Schweiger A, Lindsay R, Zhang J L, et al. 2011. Uncertainty in modeled Arctic sea ice volume [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (C8): C00D06, doi:10.1029/2011JC007084.
- Screen J A, Simmonds I. 2010. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification [J]. *Nature*, 464 (7293): 1334–1337.
- Spren G, Kwok R, Menemenlis D. 2011. Trends in Arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992–2009 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (19):

- L19501, doi:10.1029/2011GL048970.
- Stammerjohn S, Massom R, Rind D, et al. 2012. Regions of rapid sea ice change: An inter-hemispheric seasonal comparison [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (6): L06501, doi:10.1029/2012GL050874.
- Stroeve J, Serreze M, Drobot S, et al. 2008. Arctic Sea ice extent plummets in 2007 [J]. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 89 (2): 13–14, doi:10.1029/2008EO020001.
- Tang Q H, Zhang X J, Yang X H, et al. 2013. Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss [J]. *Environmental Research Letters*, 8 (1): 014036, doi:10.1088/1748-9326/8/1/014036.
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 25 (9): 1297–1300, doi:10.1029/98GL00950.
- 田忠翔. 2012. 北极海冰运动变化特征分析 [D]. 国家海洋环境预报研究中心硕士学位论文. Tian Zhongxiang. 2012. Analysis on the variation of the characteristics of Arctic sea ice motion [D]. M. S. thesis (in Chinese), National Marine Environment Forecasting Center.
- Timmermans M L, Toole J, Krishfield R, et al. 2008. Ice-tethered profiler observations of the double-diffusive staircase in the Canada Basin thermocline [J]. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 113 (C1): C00A02, doi:10.1029/2008JC004829.
- Tsukernik M, Deser C, Alexander M, et al. 2010. Atmospheric forcing of Fram Strait sea ice export: A closer look [J]. *Climate Dyn.*, 35 (7–8): 1349–1360, doi:10.1007/s00382-009-0647-z.
- Vinnikov K Y, Robock A, Stouffer R J, et al. 1999. Global warming and Northern Hemisphere sea ice extent [J]. *Science*, 286 (5446): 1934–1937, doi:10.1126/science.286.5446.1934.
- 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 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (23): L23703, doi:10.1029/2006GL028112.
- 魏立新, 张海影. 2005. 北极海冰减少的气候效应研究 [J]. *海洋预报*, 22 (S1): 56–61. Wei Lixin, Zhang Haiying. 2005. The climate effect due to the decrease of Arctic sea ice [J]. *Marine Forecasts*, 22 (S1): 56–61.
- Wu B Y, Johnson M A. 2007. A seesaw structure in SLP anomalies between the Beaufort Sea and the Barents Sea [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (5): L05811, doi:10.1029/2006GL028333.
- Wu B Y, Wang J, Walsh J E. 2006. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion [J]. *J. Climate*, 19 (2): 210–225, doi:10.1175/JCLI3619.1.
- Wu B Y, Overland J E, D'Arrigo R. 2012. Anomalous Arctic surface wind patterns and their impacts on September sea ice minima and trend [J]. *Tellus*, 64 (11): 18590, doi:10.3402/tellusa.v64i0.18590.
- 武丰民, 何金海, 祁莉. 2014. 北极海冰消融及其对欧亚冬季低温影响的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 29 (8): 913–921. Wu Fengmin, He Jinhai, Qi Li. 2014. Arctic Sea ice declining and its impact on the cold Eurasian winters: A review [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 29 (8): 913–921.
- Zhang J L, Rothrock D A. 2003. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131 (5): 845–861, doi:10.1175/1520-0493(2003)131<0845:MGSIIWA>2.0.CO;2.