

研究进展

北极海冰厚度的热力学和动力学影响因素研究评述

王昀¹ 李雪薇¹ 王今菲¹ 于乐江² 杨清华¹

(¹中山大学大气科学学院, 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;

²中国极地研究中心, 自然资源部极地科学重点实验室, 上海 200136)

摘要 全球变化背景下, 在过去的 40 年中, 北极海冰范围快速减少, 厚度显著变薄, 同时多年冰向一年冰转化, 这对区域乃至全球气候系统具有重要影响。海冰厚度作为气候变化的指示器, 在大气-海冰-海洋之间的物质和能量交换过程中起着重要作用。本文通过综述国内外北极海冰厚度影响因子的研究进展, 对影响北极海冰厚度的热力学和动力学过程进行了梳理和总结。在热力学方面, 海冰厚度会受到大气-海冰和海冰-海洋两个界面处的热通量影响, 其中, 大气-海冰热力学过程的影响因素包括冰面特征、气温、水汽、降雨/降雪和云量等, 主要通过海冰表面辐射收支和湍流热交换(感热和潜热)产生影响; 而海冰-海洋界面处的热通量作为海冰厚度的重要影响因素, 主要受太阳辐射对上层海洋的加热、风应力导致的垂向混合以及中低纬暖流输送的影响。在动力学方面, 海冰厚度变化主要通过风和海流的共同驱动引起海冰输运和海冰的形变。大尺度环流异常也会通过大气-海冰-海洋相互作用对北极冰厚的热力学和动力学过程产生显著影响。

关键词 北极海冰 海冰厚度 热力学 动力学

doi: 10.13679/j.jdyj.20210051

0 引言

北极是全球气候系统的重要组成部分, 而海冰作为大气和海洋之间的媒介, 对大气和海洋之间的热量、动量、水汽和其他物质交换具有重要影响^[1-3]。海冰厚度是北极海冰最重要的参数之一。它不仅决定着大气-海冰-海洋之间的物质和能量交换, 还影响海冰的冻结、消融、运动、形变等热力学和动力学过程, 进而影响全球的气候系统、生态系统, 引起一系列与人类生存相关的气候环境参量的变化^[4-6]。同时海冰厚度也是气候变化的指示器, 监测北极海冰厚度并研究其变化规律和影响因素对理解全球气候系统具有重要意义。

受观测能力所限, 国际上关于海冰厚度的观测数据相对较少, 现场观测数据如波弗特流涡勘探计划(BGEP)、海冰多参数浮标(IMB)、美国国家航空航天局的冰桥行动(OIB)计划等和卫星遥感的冰厚数据是主要的数据来源。20 世纪北极海冰厚度分布数据主要来自船舶、钻井平台和潜艇等^[7-8]。自 1979 年以来, 卫星开始对海冰密集度进行精确监测, 但对海冰厚度的估计仍存在较大分歧。Laxon 等^[9]在 ERS 测高数据的基础上, 提出了一种从雷达高度计数据中获取冰厚的方法, 并应用于 ERS-1 和 ERS-2 卫星雷达高度计数据。Giles 等^[10]利用 Envisat 雷达高度计数据得到了 2002—2008 年海冰厚度数据。Kwok 等^[11]利用 ICESat-1 激光高度计数据得到了 2003—2008 年北极海冰厚度信息。随着 ICESat-2 卫星的发射,

[收稿日期] 2021 年 1 月收到来稿, 2022 年 3 月收到修改稿

[基金项目] 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)自主立项项目(SML2020SP007)、国家自然科学基金(41922044, 42106233, 42106226)资助

[作者简介] 王昀, 女, 1999 年生。硕士研究生, 主要从事南北极海冰变化及预测研究。E-mail: wangy758@mail2.sysu.edu.cn

[通信作者] 李雪薇, E-mail: lixw39@mail.sysu.edu.cn

国际上研发了 ICESat-2 海冰厚度数据^[12]。除此之外, 目前应用广泛的冰厚数据有卫星高度计 CryoSat-2 数据、使用 L 波段亮温反演的 SMOS 数据。由于 CryoSat-2 数据对小于 1 m 的冰厚有很大的观测误差, SMOS 则对超过 0.5 m 的冰厚观测误差较大, Ricker 等^[13]综合了两者的优点, 将 CryoSat-2 和 SMOS 数据融合得到 CS2SMOS 数据, 相比于融合前的两个数据, 该数据在薄冰和厚冰区域具有较小的不确定性。

基于目前的观测数据, 冰厚在近几十年来呈减小趋势。2019 年发布的《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》(SROCC)指出, 过去 40 年来北极气温的升高是全球平均水平的 2~3 倍, 而海冰和积雪的减少又加剧了全球变暖^[14-15]。在此背景下, 北极海冰范围快速减小, 厚度显著变薄, 多年冰向一年冰转化, 冰龄越来越小^[16-27]。2000—2012 年, 北极海冰平均厚度每十年变薄 0.58 ± 0.07 m, 北极中央区海冰厚度变薄了约 65%, 从 3.59 m 减少到 1.25 m^[28]。2002—2011 年, 多年冰减少了约 30%, 减少区域主要在边缘海及其向北延伸的区域^[1]。同时, 冬季海冰厚度自 2003 至 2008 年的变化率为 $-0.10 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 1); 相比之下, CryoSat-2 数据显示 2011—2018 年间的冰厚反而呈现弱上升趋势^[29]。

针对影响北极海冰厚度的可能原因, 前人已有不少研究对此做出解释。为探究近几十年来北极海冰厚度变化及其可能的影响因素, 本文从热力学和动力学的角度, 对北极海冰厚度的影响因素进行了总结和分析。

1 热力学因素

热力学过程是影响北极海冰厚度的重要因素, 它导致海冰的融化和冻结, 是海冰季节性变化的主要驱动力。一般认为, 被冰层吸收的热量会导致冰层表面和内部的融化, 而穿透到海洋的热量则会导致冰层底部和侧向的融化^[30-32]。因此表面融化更大程度上取决于大气-海冰界面处的热通量, 而底部融化则与上层海洋的热含量、海洋的混合以及热量从冰表面向冰底的热传导有关^[33-34]。在总融化中, 底部融化约占三分之二左右, 表面融化占近三分之一, 侧面融化占比很小, 其影响

主要局限于边缘冰区; 不过, 随着夏季边缘冰区面积的增加, 侧向融化正在变得越来越重要^[35-36]。

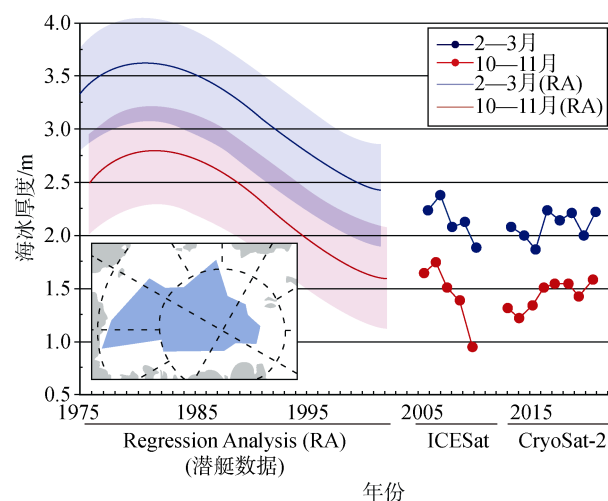


图 1 1975—2018 年北极平均海冰厚度变化图(数据来源包括潜艇数据、ICESat 和 CryoSat-2, 仅适用于数据覆盖区域)。蓝线表示 2—3 月, 红线表示 10—11 月, 蓝色和红色阴影显示回归分析中的误差估计范围。插图显示了美国海军潜艇数据的覆盖区域, 呈不规则多边形, 覆盖了北冰洋的 38%^[29]

Fig.1. Arctic average sea ice thickness interannual variability from 1975 to 2018 (data sources include submarine data, ICESat and CryoSat-2, which are only applicable to the data release area). The blue line indicates February to March, the red line indicates October to November, and the blue and red shadows show the expected residuals in the regression analysis. Inset shows the data release area of the U.S. Navy cruises submarine data, which is irregular polygon, covering 38% of the Arctic Ocean^[29]

1.1 大气-海冰热力学过程

大气可以通过海冰表面辐射收支和湍流热交换(感热通量和潜热通量)影响海冰生消, 进而引起海冰厚度的变化。此外, 冰面特征、气温、水汽、降雨/降雪和云量等都可以通过大气-海冰热力学过程影响海冰厚度。

太阳短波辐射是北极最重要的能量来源, 对积雪/海冰表面净能量通量的贡献度最高, 与净能量通量的变化最为一致^[31]。太阳辐射通量的变化是北极海冰日变化和季节变化的重要原因^[37]。太阳辐射到达积雪/海冰表面之后, 会发生吸收、反射和传输, 太阳辐射的这种再分配对海冰能量收支乃至质量平衡都有着重要影响^[38-42]。反照率在

反射太阳辐射的过程中发挥了重要作用,这种作用主要是通过冰雪-反照率正反馈机制产生,即反照率高的区域,吸收的太阳辐射较少、有利于海冰增长,增厚的海冰又会使得反照率进一步提高。研究表明,北极地区的反照率与海冰覆盖率、海冰厚度^[43-45]、多年冰占比^[46-47]呈正相关关系^[31,47-49]。

此外,冰面特征,如融池、冰间水道和降雨/降雪等都会对海冰反照率造成影响^[50],并进一步影响冰厚。融池会导致表面反照率降低。在融化季节,当表层融水不能通过海冰内部渗透时,海冰表面会形成融池,融池的存在显著降低了海冰的反照率,使得海冰吸收的辐射通量增加,提高了海冰的总融化速率,导致海冰变薄^[51-56]。研究表明,在融化季节,融池可覆盖 50%以上的海冰表面^[52],该比例在平坦的一年冰甚至可以达到 90%。因为一年冰相对平坦,有利于形成浅的大面积融池^[51-53]。与融池类似,冰间水道同样会导致反照率降低,进而增加海冰吸收的短波辐射,并促进海冰的侧向融化^[57-60]。北极地区的降水主要包括降雨和降雪,是大气影响海冰厚度的另一个重要因素。降雪量的变化会进一步导致积雪厚度变化,并产生两面性的影响^[50,61]。一方面,由于雪的不透明度大于海冰,积雪能增加表面反照率,减少能量吸收和海冰融化;在春季和夏季,表面积雪也可以保护海冰不受阳光照射^[50,61-63],且由于一些雪转化为冰,更多的雪也增加了冰的形成率^[61]。另一方面,由于雪的热导率比海冰低、具有隔热作用,这会减少热量的传导,在寒冷的季节抑制海冰生长^[61-63]。此外雪融化后会形成融池,从而在积雪消失后加速海冰融化^[50]。根据 CMIP5 气候模式预测,随着北极增暖、秋季和初冬海冰面积减少,积雪厚度将加速减小,而这一变化将有助于减缓海冰变薄^[64]。1989—2009 年的数据显示,由于北极海冰覆盖减少、下垫面蒸发增强、云层覆盖增加,北极地区降水量呈增加趋势,多个气候模式预测 21 世纪北极地区降水量也将持续增加^[65-68]。且这种增加主要由降雨量增加造成,降雪量在夏季和秋季都出现了较为明显的减少^[61,64,66]。而冬季较为寒冷,增加的降水量主要以降雪的形式出现,故冬季降雪量不会减少^[66]。夏季降雨量的增加、降雪量的减少对海冰年际变率产生影响,可能是近几十年来海冰变薄的原因之一^[61,65]。增

多的降雨将对融池和海表面盐度产生影响^[67];更重要的是,它会通过降低雪和海冰的表面反照率,减少冰雪覆盖面积,进一步减小海冰厚度^[62,65-66]。

在吸收太阳辐射的同时,北极地表和大气也向外发射长波辐射;向上的表面长波辐射,向下的大气逆辐射和下垫面反射的长波辐射,共同构成净长波辐射^[69]。积雪/海冰表面净长波辐射会对海冰厚度的季节内变化产生影响。在冬季,净长波辐射通量会成为北极表面热收支的主要项。在北极地区,海表面温度以及积雪/海冰厚度等都会对向上长波辐射造成影响,大气逆辐射则会受到云(云高、云厚)和大气水汽含量的影响。研究表明,云量、水汽和云中液态水的增加会导致向下长波辐射增加^[60,70-73],进而对北极海冰产生影响。天气尺度上,在一些典型的向下长波辐射增强的事件中,冬季大尺度环流异常会向北极地区输送更多的水汽通量,促进生成更多的云,进而增强向下长波辐射^[74]。且极地水汽通量常伴随着极地感热通量^[75]和风驱动的海冰运动(例如,来自较低纬度的暖空气平流),这进一步加强了向下的长波辐射。气候模式模拟表明,在强向下长波事件的早期,风致海冰漂移会导致海冰厚度减小,但在后期,累积的向下长波辐射效应占据主导地位,导致海冰变薄,并进一步造成海冰密集度减少^[76]。

除上述辐射通量外,感热和潜热通量也是海冰表面能量收支的重要组成部分。前者一般指由于温度变化而引起的大气与下垫面之间发生的湍流热交换,后者主要指温度不变条件下大气与下垫面由于水的相变引起的热交换。随着全球变暖,北极的气候和环境正在经历深刻变化,海表面气温变化最为明显,对北极冰厚造成了重要影响^[77-78]。一方面,随着海表面气温变化,北极海冰厚度呈现有规律的季节变化。在冻结季节,随着表面气温降低,北极海冰厚度在 9 月至次年 3 月不断增长,并在 3 月左右达到最大值;在融化季节,随着表面气温升高,北极海冰厚度在 3—9 月不断减小,并在 9 月左右达到最小值。另一方面,北极海表面气温可直接影响海冰的融化天数和累积冻结天数(FDD),进而影响北极海冰的年际变化^[24,79]。夏季海表面气温升高会导致融化天数增加,进一

步导致北极海冰融化增加、当年冰转化为多年冰的比例减少,使海冰总量较往年同期减少^[24,80-81]。冻结季节北极海表面气温则会显著影响北极地区的FDD^[80]。FDD是指温度低于冰点的天数总和,是衡量北极海冰生长时间的重要指标。当年冰增长对冬季(11月至次年3月)海冰体积增加起到了重要驱动作用。冬季气温升高会导致冰层生长减少,使当年冰体积减少,并进一步导致冬季海冰厚度变薄^[80]。此外,由于薄冰比厚冰对温度变化更敏感,这意味着,随着全球变暖、海冰厚度持续下降,北极海冰对气温变化将更加敏感^[82]。由于海面吸收的辐射能量高于海冰表面吸收的辐射能量,海面和大气之间的湍流交换一般更强。此外融池除了通过影响辐射通量促进夏季海冰融化外,还能通过影响潜热抑制冬季海冰冻结^[52]。在冬季,融池上表面会形成一个冻结的冰面,将融水困在冰表面和下面的海冰之间,这些融水在冻结过程中会释放潜热,抑制底部海冰生长^[52]。此外,海冰的变化也会反过来对湍流交换产生影响。针对1979—2014年海冰变化的研究表明,北极海冰覆盖率的减少将增强湍流交换,从而加剧大气变暖;而增暖的大气又进一步影响北极海冰,导致海冰变薄。

1.2 海冰-海洋热力学过程

海冰-海洋界面的热力学平衡主要受海洋热含量和海冰底部融化、海冰生长产生的潜热通量以及海冰热传导的控制^[83]。在融化季节,大部分海洋热通量来自入射的太阳辐射,也有一部分来自于暖流输送。

穿透海冰进入海洋的太阳辐射会加热海水,进而影响海洋热含量和海冰厚度。此外,在北极,由于温跃层以上吸收的热量主要用于加热海冰或反馈给大气,太阳辐射对次表层海水的加热通常更强。这导致北极海洋表面通常为冰冷的淡水,次表层海洋则为温暖的咸水。当大气温度足够低时,海洋表层水冷却到冰点,海冰在海洋表面形成^[84]。在风的作用下,尤其是在海冰自由漂移时,混合作用增强,被困在混合层以下的暖水会通过垂向输运将热量传递给海冰,并在冬季减缓其生长^[84-85]。随着全球变暖,海洋温度上升,海洋热通量的垂向输运对海冰的年代际变率的影响可能会持续增强^[84,86]。

来自太平洋的暖流输送会对海洋热含量造成影响,进而直接和间接地影响北极西部的海冰变化。直接影响指当温暖的太平洋水团进入楚科奇海时,其携带的热量直接导致海冰的底部和侧向融化,可能成为海冰季节性融化开始的触发因素^[87]。间接影响指时间滞后效应,通常会影冰厚的年际变化,其具体机理如下:前一年夏季进入海洋的热通量可在北冰洋西部形成一个暖水团,促使次年春季和夏季的海冰融化,并通过降低海冰反照率减少吸收的太阳辐射,进而导致北极西部海冰变薄^[87-88]。白令海峡是太平洋和北冰洋之间唯一的海洋通道,北冰洋的楚科奇海通过它与太平洋相连。因此,白令海峡的海洋热含量可反映从太平洋进入北冰洋的海洋热通量变化^[89]。就热量而言,白令海峡是楚科奇海海冰消退的重要贡献因素,来自太平洋水域的热通量通过上述直接和间接作用对海冰厚度产生重要影响。然而,白令海峡的热含量年际变化很大,它不仅反映了温度的变化,还反映了从太平洋到北冰洋物质能量运输的变化^[87]。这一输运变化不仅与局地风力变化有关,还与太平洋-北极大气压强梯度差的显著变化有关^[87,89]。Shimada等^[88]提出了一个正反馈机制,即进入北冰洋的太平洋水携带的热量融化了海冰,使得开阔水域增加,从而增强了海冰运动,这将进一步增强驱动太平洋水进入北极的风应力,促进太平洋水进入北极。

来自大西洋的暖水同样会通过影响海洋热含量影响海冰厚度。过去,由于温跃层被认为可有效地将海洋表层与相对温暖的中层水团所携带的热量隔离开来^[90],中层海洋热量并没有被公认为是北极海冰衰减的重要因素。后来的研究表明,海洋的热量对北极非常重要^[91]。这通常与来自大西洋的温暖(0.08℃)中层水(150~900 m)有关,即“大西洋水”(Atlantic Waters)^[91]。携带大量热量的大西洋水会进入北极,并沿盆地边缘呈气旋性流动^[92]。北大西洋水的热量沿扩散路径逐渐损失,其中部分热量会传递到温跃层以上^[90,93-94]。近几十年来,北冰洋中层(150~900 m)大西洋水的温度不断上升,使得北冰洋海洋层化减弱,进而对海冰产生重要作用,使得海冰厚度变薄^[91]。最新的研究表明,来自北极的海洋热量释放位置有了明显的北移,这表明未来北极的大西洋化可能得到

加强并向更高纬度推进^[95]。

2 动力学因素

北极海冰的总体运动变化受风和海流的影响,与大气环流模态和冰间水道的方向具有一定的相关性^[96]。作为一种潜在的能量传输方式,动力学因素会对北极海冰变化产生重要影响^[97]。近几十年来观测到的北极海冰平均厚度变薄伴随着冰漂移速度和冰形变的增加,其背后就是风和海流共同作用的结果^[98-100]。

2.1 冰漂移

海冰漂移主要受上层的风和下层的海流影响^[101]。海冰漂移的短期变化主要由风驱动,风场的变化会引起海冰漂移,导致北冰洋海冰输运量变化,这是导致北极海冰损失的重要贡献因素之一^[102-104]。其中,弗拉姆海峡海冰输出在整个北极海冰输出中占主导地位^[99,104]。

海冰输运量具有明显的季节变化,大部分输运发生在 11 月至次年 4 月^[105]。从长期变化来看,根据 1979—2007 年的冰站和浮标数据,弗拉姆海峡附近的冰速自 1979 年之后有增加趋势^[106];大部分研究^[99,104-105]指出近年来海冰输运量增加,但也有少数研究^[107]发现海冰输运量在 2003—2008 年并没有显著变化。另外,北极中央海区的漂移速度增加并不一定导致弗拉姆海峡的冰速加快^[104,106]。

研究表明,弗拉姆海峡海冰输出量的长期变化并没有对北极海冰总量的长期衰减趋势产生显著贡献^[105,108]。但弗拉姆海峡冰量输出可能是导致个别年份冰量异常的重要原因,会对海冰厚度的年际变化产生贡献^[105,108]。冰区输出量的增加会导致更多的开放水域、更多的海洋混合层吸热,以及更强的夏季融化^[33,104],冰雪覆盖的减少又将通过近表面温度的“放大”效应加剧这一过程。此外,开阔水域增加导致来自海洋的水汽通量增加以及入射长波辐射增加^[109]。通过这两种正反馈机制,冰区输运量的变化将间接对海冰厚度产生影响;但仍存在一些负反馈机制,例如在冬季,开放水域增加会促进新的海冰生长^[104,110]。

2.2 冰形变

除冰漂移外,海冰形变也可导致海冰厚度分

布发生变化^[111]。在边缘冰区,波浪容易引起海冰碎裂,碎裂后较小的、可移动的浮冰更容易受到辐射强迫,发生侧向融化^[112-113]。在边缘冰区破碎时,波浪还会在上混合层中产生湍流,增强垂向混合进而促进底部融化^[113-114]。此外,海冰碎裂还会导致更多的冰间水道形成,进而使局地反照率下降,加速海冰变薄^[106]。冰脊的形成同样对冰厚具有重要影响。在夏季,浮冰处于自由漂移状态,浮冰间很少相互作用;而在生长季节,由于冰层几乎是连续的,风和洋流的强迫作用会使冰内应力增强^[115],当冰内应力足够强时,就会形成裂缝和冰脊,而且这种冰厚分布的变化通常是突然而强烈的^[57,116]。辐散也是重要的海冰形变过程,它会导致更多的海冰融化和变薄,促进水道形成,同时散度增强会增加冬季冰产量,导致卤水排出量增加,这会降低海洋的垂向稳定度,使更多的海洋热含量到达冰层下方^[100,111,116]。此外,海冰的剪切运动会激发上升流,进而将温暖的海水带到上层海洋,融化更多的冰;而涡度变化常常伴随散度变化,例如波弗特海的高散度伴随着负涡度^[100,111];也有研究指出海冰破碎与北极风暴有关^[117]。

研究表明,不仅海冰形变会影响冰厚,冰厚变化也会对海冰的形变速率产生影响。尽管海洋动量的主要来源是风,风的变化控制着海洋表面应力的年周期和年际变化,但动量向海洋的转移从季节到十年尺度上都受到海冰条件的控制^[98]。近几十年来,北极海冰的范围和厚度显著减少,更年轻、更薄的海冰取代了较厚的多年冰,海冰的减少导致更大的形变速率和漂移速度,导致更多的海冰从北极输出,留下更年轻、更薄的海冰,形成正反馈^[111]。同理,海冰形变集中在速度梯度较大、冰强度较低的薄冰区,而形变会破坏冰层,进一步使海冰厚度减小、强度降低^[117]。

3 大尺度环流异常的热力学和动力学影响

大尺度环流异常也会通过热力学和动力学共同影响北极冰厚,其影响机制既包括大气的作用,也包括海洋的作用。局地大气-海冰-海洋相互作用对各种大尺度环流异常十分敏感,例如北极偶极子异常(DA)、北极涛动(AO)、太平洋年代际涛

动(PDO)、北太平洋涛动(NPO)、北大西洋涛动(NAO)、麦德-朱利安振荡(MJO)、厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)和北大西洋年代际振荡(AMO)等。因此,导致海冰变化的因素包括大气、海洋和冰冻圈之间的复杂相互作用,每种相互作用都有不同的时间和空间尺度的响应和反馈^[118-122]。

DA 是北极海冰向北大西洋输运的重要驱动力,对海冰的年际变化有重要影响^[123-125]。这种局地的北极海平面气压异常在北极有两个作用中心,因此会产生强烈的经向风异常。在正位相(即北极海平面气压正异常位于加拿大群岛,负异常位于巴伦支海),经向风异常从北极西部吹向东部,增强的穿极流促使更多的北极海冰流出巴伦支海和格陵兰海,进入北大西洋^[123,125]。此外,研究显示,2001—2008 年,活跃的正 DA 使得通过白令海峡的海洋热通量增加,增强了太平洋暖流的流入^[125-126],加速了海冰的底部和侧向融化,并加强了海冰反照率反馈^[125],导致海冰急剧减薄^[88,127]。冬季和夏季的 DA 会导致冬季和春季风异常,进一步影响随后的(夏季)海冰异常^[22],导致某些年份出现夏季海冰异常低值(如 2007 年)。在 DA 的负位相,情况则刚好相反^[125-126]。

不同于 DA, AO 中心覆盖整个北极,衍生的风异常在正位相时是气旋性的,在负位相时是反气旋性的^[123,125]。在 AO 的正位相期间,北大西洋的异常气旋性环流导致巴伦支海出现热通量异常,进而限制局地海冰生长。海冰的气候态运动特征为波弗特海的反气旋环流和横贯北冰洋的穿极流^[128]。在北冰洋,与 AO 正位相相关的强西南气流导致风应力右侧的埃克曼漂移增强,进而导致异常气旋性海冰环流^[125,128]。拉普捷夫海和东西伯利亚海的冰辐散增强,使得海冰厚度变薄、开放水域增加,进而释放了更多潜热,加剧局部增暖^[128]。新形成的海冰被增强的埃克曼漂流运输到楚科奇海/波弗特海,从而增加了该区域的海冰覆盖范围和厚度。此外, AO 正位相期间弗拉姆海峡的海冰运输增加^[128]。针对 1995—2008 年的研究表明,与 DA 相比, AO 与海冰快速消退之间的联系较弱^[23,125],正位相 DA 是影响海冰输出北极的关键因素^[129-130]。

PDO 是海表面温度异常的主要模态,其特征为太平洋 20°N 以北区域表层海水温度异常偏暖

或偏冷,通常在一个位相持续超过 10 年(有时会暂时逆转到相反的状态)^[131]。PDO 正位相期间,西太平洋偏冷而东太平洋偏暖;在负位相期间,则西太平洋偏暖而东太平洋偏冷^[132]。研究发现, PDO 会通过影响大气环流和海洋热传导对北极海冰产生强烈影响^[133-134]。相对于正位相,在 PDO 负位相期间,北极增暖更强,对流层厚度梯度减小,高层西风带减少更明显,即在负位相时期,海冰的长期衰减对北极的影响更大(减少)^[131]。研究表明,夏季和秋季 PDO 对 1979—2017 年北极海冰损失的贡献率分别为 20%和 22%^[133]。

NPO 指位于北太平洋上的阿留申低压与夏威夷高压同时增强或减弱的现象,是影响北太平洋海表面温度的另一个重要模态。当 NPO 为正时,阿留申低压与夏威夷高压均增强,气压差增大,且阿留申低压较常年偏东,夏威夷高压偏西;当 NPO 为负时,情况则相反^[135-136]。NPO 会对北极海冰的年际变化造成影响,且与北冰洋边缘冰区变化密切相关^[135]。此外,也有研究指出春季(4—6 月)NPO 会影响波弗特海次年夏季海冰,这是因为在 NPO 正位相期间,波弗特海的东风增强,导致海冰平流增强、海冰厚度减小,且由于强烈的东风,海冰更多地从海岸分离^[136]。

NAO 和 AO 是 20 世纪 90 年代初以前影响海冰运动和弗拉姆海峡输运的主要气候变率模态,可能会对北极冰厚的年际变化造成影响^[137]。与 AO 类似, NAO 正位相会增加弗拉姆海峡的海冰输出,导致北极海冰损失^[138]。更进一步的研究发现,乌拉山脉冬季大气阻塞高压与正位相 NAO 共同作用时,海冰减少最为强烈^[139]。针对 1979—2016 年的研究显示,自 20 世纪 90 年代以来, NAO 趋势逆转为负位相, NAO 与海冰之间的联系也有所减弱。与 DA 通过平流和融化过程影响海冰不同, NAO 负位相主要通过影响融化过程影响海冰,即夏季 NAO 负位相有利于更多的海冰融化,从而减少海冰覆盖范围^[140]。

MJO 是热带季节内最显著的模态,其特征时间尺度为 30~70 d,可以通过向极地传播的经向罗斯贝波,以太平洋-北美(PNA)模式影响北极,对更长时间尺度的北极变暖和海冰产生影响^[141-142]。研究表明,热带对流模态期间罗斯贝波的向上和

向极传播有助于北极放大效应,使北极变暖加速^[141-142]。此外,MJO可通过表面风速和温度异常在夏季和冬季影响北极海冰^[142-143]。当热带印度洋上空的对流增强时,白令海西北风盛行,海冰密集度为正异常;鄂霍次克海东南风盛行,海冰密集度为负异常^[142]。而当印度洋上空的对流被抑制时,情况则相反^[142]。但MJO对北极海冰厚度的具体影响还有待进一步研究。

ENSO同样会对北极海冰厚度年际变化产生影响。一方面,ENSO事件会对热带和中高纬大气环流造成影响,它会引起沃克环流减弱和哈德莱环流加强,使南方涛动出现负位相,北半球500 hPa副热带高压呈现正位相^[144]。因此,在ENSO事件期间,局地哈德莱环流的变化导致东北太平洋/西北美区域输向北极热通量的改变,该过程使气温升高并抑制了楚科奇海和波弗特海南部海冰的生长^[128]。另一方面,ENSO的影响还包括从热带传播到中高纬的遥相关型,最典型的就是冬季的PNA型和夏季的东亚遥相关型(厄尔尼诺对北半球大气环流的影响)^[144]。有研究表明,中部型ENSO,表现为热带中太平洋地区的海温正异常,与北极夏季气候存在显著的大尺度遥相关关系,它会抑制北极夏季增暖,进而减少海冰融化^[145]。这种联系的可能途径是,通过区域海表温度对北半球的中纬度气压场和经向环流产生影响,并通过AO的调制作用,最终对北极海冰变化产生影响^[146]。

此外,也有研究指出AMO与北极海冰有关。AMO是发生在北大西洋区域具有海盆尺度的、具有多年变率的海表温度异常变化现象,是影响北极气温年代际变化的因素之一^[147-148]。AMO阶段的北极地区普遍变暖,可能导致北极大西洋区海冰覆盖减少,进而影响海冰厚度^[149]。

4 总结与展望

海冰作为大气和海洋之间热量、动量和物质交换的媒介,在北极气候系统中起着重要作用。未来北极海冰厚度的可能变化,以及随之而来的冰反照率反馈的变化,是预测未来气温上升的最大不确定性因素之一。因此,提升对北极海冰厚度变化的系统性认识、建立各个影响因素之间的

联系至关重要。尽管影响北极海冰厚度变化的物理过程已被广泛研究,但受到海冰厚度观测数据质量的影响,大尺度变化特征的刻画目前十分有限,且气候模式对于北极海冰厚度的预测仍然有极大的不确定性。此外,冰表面温度的暖偏差是全球再分析数据在北极地区存在的主要问题之一,最显著的温度偏差出现在积雪较厚的地区,这是由于数值模式中海冰表面的雪层缺失导致海洋到大气的传导热通量的高估^[150]。雪厚和雪密度对温度结构也有影响,采用常数密度假设的海冰模式可能会高估秋季的海冰增长^[151]。吹雪和降雪可导致积雪深度和密度发生明显变化,进而导致积雪/海冰表面热收支在较小的水平距离内发生显著变化^[151]。

基于上述的分析研究,影响北极海冰厚度的热力学和动力学过程还需要从以下几个方面开展研究。

1. 加强对热力学、动力学两者结合的研究。本文将冰厚变化成因归类为热力学和动力学两方面,但在实际过程中,热力学和动力学过程是密不可分的,两者常常相互作用,共同对海冰厚度造成影响。例如,海冰的热力过程可通过消融和冻结改变冰厚和海冰密集度分布,由此影响海冰漂移^[152];海冰的动力过程可通过成脊和平流改变冰厚分布,从而影响海冰热力过程^[152];而海冰漂移会引起净潜热输送,从而影响大气环流和大洋环流等^[153]。

2. 加强对冰内结构和冰内热传导的研究。除了从大气-海冰界面和海冰-海洋界面接收的热通量外,这些热通量如何在冰内进行传导并最终导致海冰融化的物理过程同样十分重要。海冰内部卤水泡,泥沙和其他杂质也会使冰内热力性质更加复杂,如卤水泡就起着一种“热库”作用,减缓冰内加热和冷却。加强对冰内结构和冰内热传导的研究,将有助于加深对海冰变化物理机制的认识,构建更符合实际的海冰模式。

3. 发展中小尺度过程的参数化方案。目前大部分数值模式是在大尺度下建立发展起来的,适用中小尺度的更加精细的数值模式还在初步发展阶段。亟需在更精细的中小尺度海冰数值模式中充分考虑当前大尺度数值模式中所忽略的因子。如在波浪和潮汐等的作用下,不同尺度的海冰动

力过程有着很大差异, 需根据时空尺度区分讨论。

4. 优化海冰动力学模式与热力学模式的耦合方案。这里的耦合不仅是将大尺度下的热力学模式直接与动力学模式进行耦合, 而且进一步考虑海冰动力模式和热力模式的交互影响。由于北极海冰覆盖范围动态变化, 海冰边缘区、冰间湖或水道等也在不停变化, 需要对海冰边缘区域的动力、热力过程作特殊考虑。如波浪对海冰生长率的影响、不同海冰类型对海冰生消过程的影响

等, 这是当前研究中所比较欠缺的。

5. 推进海冰与气候变化之间复杂相互作用的研究。全球碳排放控制的情况以及其对未来北极海冰变化的影响, 海冰减少对大气、海洋环流等的反馈, 以及这一反馈如何最终作用于海冰本身等, 这些都需要进一步的研究, 以更好地预测冰厚的未来变化趋势。尤其是经过近几十年北极海冰的持续减少, 现在的北极冰层更加脆弱, 更易受到外界强迫因素的影响^[109, 154-156]。

参考文献

- 1 柯长青, 彭海涛, 孙波, 等. 2002 年—2011 年北极海冰时空变化分析[J]. 遥感学报, 2013, 17(2): 452-466.
- 2 杨修群, 谢倩, 黄士松. 北极冰异常对亚洲夏季风影响的数值模拟[J]. 海洋学报, 1994, 16(5): 34-40.
- 3 WALSH J E. The role of sea ice in climatic variability: Theories and evidence[J]. Atmosphere-Ocean, 1983, 21(3): 229-242.
- 4 LU P, LI Z J, ZHANG Z H, et al. Arctic sea ice distribution in summer based on aerial photos[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 24(6): 62-67.
- 5 VIHMA T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: A review[J]. Surveys in Geophysics, 2014, 35(5): 1175-1214.
- 6 解思梅, 包澄澜, 薛振和, 等. 南方海洋涛动[J]. 科学通报, 1995, 40(18): 1679-1681.
- 7 PERSSON P O G, BLOMQUIST B, GUEST P, et al. Shipboard observations of the meteorology and near-surface environment during autumn freezeup in the Beaufort/Chukchi Seas[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(7).
- 8 WANG L T, TAO J F, JING Y, et al. Research on reverberation signal under ice based on physical acoustic modeling and its related characteristics[C]//2019 International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI). Nanjing, China. IEEE, 2019: 78-82.
- 9 LAXON S, PEACOCK N, SMITH D. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region[J]. Nature, 2003, 425(6961): 947-950.
- 10 GILES A B, MASSOM R A, LYTLE V I. Fast-ice distribution in east Antarctica during 1997 and 1999 determined using RADARSAT data[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C2).
- 11 KWOK R, CUNNINGHAM G F, WENSNAHAN M, et al. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2009, 114(C7): C07005.
- 12 PETTY A A, KURTZ N T, KWOK R, et al. Winter Arctic sea ice thickness from ICESat-2 freeboards[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125(5): e2019JC015764.
- 13 RICKER R, HENDRICKS S, KALESCHKE L, et al. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data[J]. The Cryosphere, 2017, 11(4): 1607-1623.
- 14 ROTHROCK D A, YU Y, MAYKUT G A. Thinning of the Arctic sea-ice cover[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(23): 3469-3472.
- 15 MEREDITH M P, SOMMERKORN M, CASSOTTA S, et al. Chapter 3: Polar Regions. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate[R/OL](2019-09). <http://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/>.
- 16 OVERLAND J, DUNLEA E, BOX J E, et al. The urgency of Arctic change[J]. Polar Science, 2019, 21: 6-13.
- 17 DAI A G, SONG M R. Little influence of Arctic amplification on mid-latitude climate[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(3): 231-237.
- 18 HALLORAN P R, HALL I R, MENARY M, et al. Natural drivers of multidecadal Arctic sea ice variability over the last millennium[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 688.
- 19 COMISO J C, PARKINSON C L, GERSTEN R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(1): L01703.
- 20 SERREZE M C, BARRETT A P, SLATER A G, et al. The large-scale energy budget of the Arctic[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D11): D11122.

- 21 STROEVE J, HOLLAND M M, MEIER W, et al. Arctic sea ice decline: Faster than forecast[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9): L09501.
- 22 RIGOR I G, WALLACE J M. Variations in the age of Arctic sea-ice and summer sea-ice extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9): L09401.
- 23 MASLANIK J A, FOWLER C, STROEVE J, et al. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): L24501.
- 24 NGHIEM S V, RIGOR I G, PEROVICH D K, et al. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): L19504.
- 25 PFIRMAN S, HAXBY W F, COLONY R, et al. Variability in Arctic sea ice drift[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(16): L16402.
- 26 MASLANIK J, STROEVE J, FOWLER C, et al. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13502.
- 27 COMISO J C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(4): 1176-1193.
- 28 LINDSAY R, SCHWEIGER A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(1): 269-283.
- 29 KWOK R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: Losses and coupled variability (1958–2018)[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(10): 105005.
- 30 MAYKUT G A, PEROVICH D K. The role of shortwave radiation in the summer decay of a sea ice cover[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C7): 7032-7044.
- 31 INOUE J, KIKUCHI T, PEROVICH D K. Effect of heat transmission through melt ponds and ice on melting during summer in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C5): C05020.
- 32 STEELE M. Sea ice melting and floe geometry in a simple ice-ocean model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, 97(C11): 17729-17738.
- 33 PEROVICH D K, RICHTER-MENGE J A, JONES K F, et al. Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(11): L11501.
- 34 PEROVICH D K, RICHTER-MENGE J A, JONES K F, et al. Arctic sea-ice melt in 2008 and the role of solar heating[J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(57): 355-359.
- 35 TSAMADOS M, FELTHAM D, PETTY A, et al. Processes controlling surface, bottom and lateral melt of Arctic sea ice in a state of the art sea ice model[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2052): 20140167.
- 36 PEROVICH D K, RICHTER-MENGE J A. Regional variability in sea ice melt in a changing Arctic[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2045): 20140165.
- 37 JORDAN R E, ANDREAS E L, MAKSHITAS A P. Heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C4): 7785-7806.
- 38 CURRY J A, SCHRAMM J L, EBERT E E. Sea ice-albedo climate feedback mechanism[J]. *Journal of Climate*, 1995, 8(2): 240-247.
- 39 PEROVICH D K, LIGHT B, EICKEN H, et al. Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979–2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): L19505.
- 40 MAYKUT G A. The surface heat and mass balance[M]//*The Geophysics of Sea Ice*. Boston, MA: Springer US, 1986: 395-463.
- 41 UNTERSTEINER N. On the mass and heat budget of Arctic sea ice[J]. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A*, 1961, 12(2): 151-182.
- 42 EBERT E E, CURRY J A. An intermediate one-dimensional thermodynamic sea ice model for investigating ice-atmosphere interactions[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1993, 98(C6): 10085-10109.
- 43 PEROVICH D K. Seasonal changes in sea ice optical properties during fall freeze-up[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1991, 19(3): 261-273.
- 44 EHN J, GRANSKOG M A, REINART A, et al. Optical properties of melting landfast sea ice and underlying seawater in Santala Bay, Gulf of Finland[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C9): C09003.
- 45 EHN J K, HWANG B J, GALLEY R, et al. Investigations of newly formed sea ice in the Cape Bathurst polynya: 1. Structural, physical,

- and optical properties[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C5).
- 46 PEROVICH D K, POLASHENSKI C. Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(8): L08501.
- 47 GRENFELL T C, PEROVICH D K. Seasonal and spatial evolution of albedo in a snow-ice-land-ocean environment[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C1): C01001.
- 48 GRENFELL T C, MAYKUT G A. The optical properties of ice and snow in the Arctic Basin[J]. *Journal of Glaciology*, 1977, 18(80): 445-463.
- 49 GRENFELL T C, PEROVICH D K. Spectral albedos of sea ice and incident solar irradiance in the southern Beaufort Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1984, 89(C3): 3573-3580.
- 50 THOMAS D N, DIECKMANN G S. *Sea ice: An introduction to its physics, chemistry, biology and geology*[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2003.
- 51 FLOCCO D, SCHROEDER D, FELTHAM D L, et al. Impact of melt ponds on Arctic sea ice simulations from 1990 to 2007[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C9): C09032.
- 52 FLOCCO D, FELTHAM D L, BAILEY E, et al. The refreezing of melt ponds on Arctic sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(2): 647-659.
- 53 LANDY J C, EHN J K, BARBER D G. Albedo feedback enhanced by smoother Arctic sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(24): 10714-10720.
- 54 TAYLOR P D, FELTHAM D L. A model of melt pond evolution on sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C12).
- 55 HUANG W F, LI Z J, WANG Y X, et al. A concept for autonomous and continuous observation of melt pond morphology: Instrument design and test trail during the 4th CHINARE-Arctic in 2010[J]. *Advances in Polar Science*, 2011, 22(4): 273-280.
- 56 LI Z J, KANG J C, ZHANG Y L. Crystals and fabrics analysis of an Arctic thermal growth multi-year ice sample[J]. *Chinese Journal of Polar Science*, 2002, 13(2): 103-110.
- 57 RICHTER-MENGE J A, PEROVICH D K, PEGAU W S. Summer ice dynamics during SHEBA and its effect on the ocean heat content[J]. *Annals of Glaciology*, 2001, 33: 201-206.
- 58 PEROVICH D K, RICHTER-MENGE J A. Ice growth and solar heating in springtime leads[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105(C3): 6541-6548.
- 59 GOW A J, MEESE D A, PEROVICH D K, et al. The anatomy of a freezing lead[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(C10): 18221.
- 60 KIM K Y, KIM J Y, KIM J, et al. Vertical feedback mechanism of winter Arctic amplification and sea ice loss[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-10.
- 61 SCREEN J A, Simmonds I. Declining summer snowfall in the Arctic: Causes, impacts and feedbacks[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(11-12): 2243-2256.
- 62 DOU T F, XIAO C D, LIU J P, et al. A key factor initiating surface ablation of Arctic sea ice: Earlier and increasing liquid precipitation[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(4): 1233-1246.
- 63 WARREN S G, RIGOR I G, UNTERSTEINER N, et al. Snow depth on Arctic sea ice[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(6): 1814-1829.
- 64 HEZEL P J, ZHANG X, BITZ C M, et al. Projected decline in spring snow depth on Arctic sea ice caused by progressively later autumn open ocean freeze-up this century[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(17): L17505.
- 65 VIHMA T, SCREEN J, TJERNSTRÖM M, et al. The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3): 586-620.
- 66 BINTANJA R, ANDRY O. Towards a rain-dominated Arctic[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(4): 263-267.
- 67 BINTANJA R, KATSMAN C A, SELTEN F M. Increased Arctic precipitation slows down sea ice melt and surface warming[J]. *Oceanography*, 2018, 31(2): 118-125.
- 68 BROCK B W. Shrinking sea ice, increasing snowfall and thinning lake ice: A complex Arctic linkage explained[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 091004.
- 69 王伟民. 大气科学基础[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- 70 GORODETSKAYA I V, TREMBLAY L B, LIEPERT B, et al. The influence of cloud and surface properties on the Arctic Ocean

- shortwave radiation budget in coupled models[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(5): 866-882.
- 71 STRAMLER K, DEL GENIO A D, ROSSOW W B. Synoptically driven Arctic winter states[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(6): 1747-1762.
- 72 PITHAN F, MEDEIROS B, MAURITSEN T. Mixed-phase clouds cause climate model biases in Arctic wintertime temperature inversions[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(1-2): 289-303.
- 73 RADDATZ R L, PAPAKYRIAKOU T N, ELSE B G, et al. Downwelling longwave radiation and atmospheric winter states in the western maritime Arctic[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(9): 2339-2351.
- 74 PERSSON P O G, SHUPE M D, PEROVICH D, et al. Linking atmospheric synoptic transport, cloud phase, surface energy fluxes, and sea-ice growth: Observations of midwinter SHEBA conditions[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 49(4): 1341-64.
- 75 SKIFIC N, FRANCIS J A. Drivers of projected change in Arctic moist static energy transport[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(7): 2748-2761.
- 76 PARK H S, LEE S, SON S W, et al. The impact of poleward moisture and sensible heat flux on Arctic winter sea ice variability[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(13): 5030-5040.
- 77 KOENIGK T, BRODEAU L. Arctic climate and its interaction with lower latitudes under different levels of anthropogenic warming in a global coupled climate model[J]. *Climate Dynamics*, 2017, 49(1-2): 471-492.
- 78 CHAPMAN W L, WALSH J E. Recent variations of sea ice and air temperature in high latitudes[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(1): 33-48.
- 79 TILLING R L, RIDOUT A, SHEPHERD A, et al. Increased Arctic sea ice volume after anomalously low melting in 2013[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(8): 643-646.
- 80 RICKER R, HENDRICKS S, GIRARD-ARDHUIN F, et al. Satellite-observed drop of Arctic sea ice growth in winter 2015–2016[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(7): 3236-3245.
- 81 LAXON S, PEACOCK N, SMITH D. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region[J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 947-950.
- 82 FISCHER H, LEMKE P. On the required accuracy of atmospheric forcing fields for driving dynamic-thermodynamic sea ice models[M]. *American Geophysical Union (AGU)*, 2013.
- 83 LIN L, ZHAO J P. Estimation of oceanic heat flux under sea ice in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(3): 605-614.
- 84 GUPTA M, MARSHALL J, SONG H, et al. Sea-ice melt driven by ice-ocean stresses on the mesoscale[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(11): e2020JC016404.
- 85 PETERSON A K, FER I, MCPHEE M G, et al. Turbulent heat and momentum fluxes in the upper ocean under Arctic sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(2): 1439-1456.
- 86 DAVIS P E D, LIQUE C, JOHNSON H L, et al. Competing effects of elevated vertical mixing and increased freshwater input on the stratification and sea ice cover in a changing Arctic Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(5): 1531-1553.
- 87 WOODGATE R A, WEINGARTNER T, LINDSAY R. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(1): L01602.
- 88 SHIMADA K, KAMOSHIDA T, ITOH M, et al. Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8): L08605.
- 89 WOODGATE R A, AAGAARD K, WEINGARTNER T J. A year in the physical oceanography of the Chukchi Sea: Moored measurements from autumn 1990–1991[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(24-26): 3116-3149.
- 90 RUDELS B, ANDERSON L G, JONES E P. Formation and evolution of the surface mixed layer and halocline of the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, 101(C4): 8807-8821.
- 91 POLYAKOV I V, TIMOKHOV L A, ALEXEEV V A, et al. Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(12): 2743-2756.
- 92 RUDELS B, JONES E P, ANDERSON L G, et al. On the intermediate depth waters of the Arctic Ocean[M]. *American Geophysical Union (AGU)*, 1994.
- 93 STEELE M, BOYD T. Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C5): 10419-10435.

- 94 MARTINSON D G, STEELE M. Future of the Arctic sea ice cover: Implications of an Antarctic analog[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(2): 307-310.
- 95 SHU Q, WANG Q, SONG Z, et al. The poleward enhanced Arctic Ocean cooling machine in a warming climate[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2966.
- 96 邓娟, 柯长青, 雷瑞波, 等. 2009 年春夏季北极海冰运动及其变化监测[J]. *极地研究*, 2013, 25(1): 96-104.
- 97 BARRY R G, SERREZE M C, MASLANIK J A, et al. The Arctic sea ice-climate system: Observations and modeling[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(4): 397-422.
- 98 MARTIN T, STEELE M, ZHANG J L. Seasonality and long-term trend of Arctic Ocean surface stress in a model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(3): 1723-1738.
- 99 KRUMPEN T, GERDES R, HAAS C, et al. Recent summer sea ice thickness surveys in Fram Strait and associated ice volume fluxes[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(2): 523-534.
- 100 SPREEN G, KWOK R, MENEMENLIS D, et al. Sea-ice deformation in a coupled ocean-sea-ice model and in satellite remote sensing data[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(4): 1553-1573.
- 101 THORNDIKE A S, COLONY R. Sea ice motion in response to geostrophic winds[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87(C8): 5845-5852.
- 102 WATANABE E, HASUMI H. Arctic sea ice response to wind stress variations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C11).
- 103 LINDSAY R W, ZHANG J, SCHWEIGER A, et al. Arctic sea ice retreat in 2007 follows thinning trend[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(1): 165-176.
- 104 SMEDSRUD L H, SIREVAAG A, KLOSTER K, et al. Recent wind driven high sea ice area export in the Fram Strait contributes to Arctic sea ice decline[J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(4): 821-829.
- 105 SPREEN G, DE STEUR L, DIVINE D, et al. Arctic sea ice volume export through fram strait from 1992 to 2014[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(6): e2019JC016039.
- 106 RAMPAL P, WEISS J, MARSAN D. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979-2007[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C5): C05013.
- 107 SPREEN G, KERN S, STAMMER D, et al. Fram Strait sea ice volume export estimated between 2003 and 2008 from satellite data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): L19502.
- 108 LI X W, YANG Q H, YU L J, et al. On the 2011 record low Arctic sea ice thickness: A combination of dynamic and thermodynamic anomalies[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2021: 1-18.
- 109 SCREEN J A, SIMMONDS I, KEAY K. Dramatic interannual changes of perennial Arctic sea ice linked to abnormal summer storm activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D15): D15105.
- 110 SMEDSRUD L H, SORTEBERG A, KLOSTER K. Recent and future changes of the Arctic sea-ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(20): L20503.
- 111 STERN H L, LINDSAY R W. Spatial scaling of Arctic sea ice deformation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C10): C10017.
- 112 ASPLIN M G, SCHARIEN R, ELSE B, et al. Implications of fractured Arctic perennial ice cover on thermodynamic and dynamic sea ice processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(4): 2327-2343.
- 113 BOUTIN G, LIQUE C, ARDHUIN F, et al. Towards a coupled model to investigate wave-sea ice interactions in the Arctic marginal ice zone[J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(2): 709-735.
- 114 SUTHERLAND P, MELVILLE W K. Field measurements and scaling of ocean surface wave-breaking statistics[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(12): 3074-3079.
- 115 STEELE M, ZHANG J L, ROTHROCK D, et al. The force balance of sea ice in a numerical model of the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C9): 21061-21079.
- 116 吴辉碁, 白珊, 张占海. 海冰动力学过程的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1998, 20(2): 1-13.
- 117 HUTTER N, LOSCH M, MENEMENLIS D. Scaling properties of Arctic sea ice deformation in a high-resolution viscous-plastic sea ice model and in satellite observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(1): 672-687.
- 118 WALSH J E, JOHNSON C M. Interannual atmospheric variability and associated fluctuations in Arctic sea ice extent[J]. *Journal of*

- Geophysical Research: Ocean, 1979, 84(C11): 6915-6928.
- 119 OVERLAND J E, PEASE C H. Cyclone climatology of the Bering Sea and its relation to sea ice extent[J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(1): 5-13.
- 120 FANG Z, WALLACE J M. Arctic sea ice variability on a timescale of weeks and its relation to atmospheric forcing[J]. Journal of Climate, 1994, 7(12): 1897-1914.
- 121 SLONOSKY V C, MYSAK L A, DEROME J. Linking arctic sea-ice and atmospheric circulation anomalies on interannual and decadal timescales[J]. Atmosphere-Ocean, 1997, 35(3): 333-366.
- 122 PRINSENBURG S J, PETERSON I K, NARAYANAN S, et al. Interaction between atmosphere, ice cover, and ocean off Labrador and Newfoundland from 1962 to 1992[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997, 54(S1): 30-39.
- 123 WU B Y, WANG J, WALSH J E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion[J]. Journal of Climate, 2006, 19(2): 210-225.
- 124 WATANABE E, WANG J, SUMI A, et al. Arctic dipole anomaly and its contribution to sea ice export from the Arctic Ocean in the 20th century[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(23): L23703.
- 125 WANG J, ZHANG J L, WATANABE E, et al. Is the dipole anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent?[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(5): L05706.
- 126 WOODGATE R A, AAGAARD K, WEINGARTNER T J. Interannual changes in the Bering Strait fluxes of volume, heat and freshwater between 1991 and 2004[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(15): L15609.
- 127 STEELE M, MORISON J, ERMOLD W, et al. Circulation of summer Pacific halocline water in the Arctic Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109(C2): C02027.
- 128 LIU J P, CURRY J A, HU Y Y. Recent Arctic sea ice variability: Connections to the Arctic oscillation and the ENSO[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(9): L09211.
- 129 OVERLAND J E, WANG M, SALO S. The recent Arctic warm period[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2008, 60(4): 589-597.
- 130 OGI M, RIGOR I G, MCPHEE M G, et al. Summer retreat of Arctic sea ice: Role of summer winds[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(24): L24701.
- 131 SCREEN J A, FRANCIS J A. Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(9): 856-860.
- 132 杨学祥, 杨冬红. “太平洋十年涛动”冷位相时期的全球飓风等灾害[J]. 海洋预报, 2006, 23(3): 30-35.
- 133 YU L J, ZHONG S Y, VIHMA T. The contributions of the leading modes of the North Pacific sea surface temperature variability to the Arctic sea ice depletion in recent decades[J]. The Cryosphere Discussions, 2019: 1-32.
- 134 ZHANG R. Mechanisms for low-frequency variability of summer Arctic sea ice extent[J]. PNAS, 2015, 112(15): 4570-4575.
- 135 LINKIN M E, NIGAM S. The North Pacific Oscillation–West Pacific teleconnection pattern: Mature-phase structure and winter impacts[J]. Journal of Climate, 2008, 21(9): 1979-1997.
- 136 ZHANG M H, PERRIE W, LONG Z X. Springtime North Pacific Oscillation and summer sea ice in the Beaufort Sea[J]. Climate Dynamics, 2019, 53(1-2): 671-686.
- 137 RIGOR I G, WALLACE J M, COLONY R L. Response of sea ice to the Arctic oscillation[J]. Journal of Climate, 2002, 15(18): 2648-2663.
- 138 ZHANG S Y, GAN T Y, BUSH A B G. Variability of Arctic sea ice based on quantile regression and the teleconnection with large-scale climate patterns[J]. Journal of Climate, 2020, 33(10): 4009-4025.
- 139 LUO B, LUO D, WU L X, et al. Atmospheric circulation patterns which promote winter Arctic sea ice decline[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(5): 054017.
- 140 BI H, YANG Q, LIANG X, et al. Contributions of advection and melting processes to the decline in sea ice in the Pacific sector of the Arctic Ocean[J]. The Cryosphere, 2019, 13(5): 1423-1439.
- 141 SEO K H, LEE H J, FRIERSON D M W. Unraveling the teleconnection mechanisms that induce wintertime temperature anomalies over the Northern Hemisphere continents in response to the MJO[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2016, 73(9): 3557-3571.
- 142 HONG J Y, KIM J H, PARK D S R. Reexamination of the madden-Julian oscillation effect on wintertime sea ice concentrations in the North Pacific[J]. Atmosphere, 2019, 11(1): 7.

- 143 HENDERSON G R, BARRETT B S, LAFLEUR D. Arctic sea ice and the Madden-Julian Oscillation (MJO)[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(7-8): 2185-2196.
- 144 赵振国. 厄尔尼诺现象对北半球大气环流和中国降水的影响[J]. *大气科学*, 1996, 20(4): 422-428.
- 145 HU C D, YANG S, WU Q G, et al. Shifting El Niño inhibits summer Arctic warming and Arctic sea-ice melting over the Canada Basin[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11721.
- 146 左涛, 陈锦年, 王凡. 中部型 El Niño 与北极海冰变化的联系[J]. *海洋湖沼通报*, 2015(3): 1-13.
- 147 CHYLEK P, FOLLAND C K, LESINS G, et al. Arctic air temperature change amplification and the Atlantic Multidecadal Oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(14): L14801.
- 148 FEI L, ORSOLINI Y J, WANG H J, et al. Atlantic multidecadal oscillation modulates the impacts of Arctic sea ice decline[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(5): 2497-2506.
- 149 ZHANG J L, LINDSAY R, SCHWEIGER A, et al. The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(4): 720-726.
- 150 BATRAK Y, MÜLLER M. On the warm bias in atmospheric reanalyses induced by the missing snow over Arctic sea-ice[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-8.
- 151 POLYAKOV I V, TIMOKHOV L A, ALEXEEV V A, et al. Arctic Ocean warming contributes to reduced polar ice cap[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(12): 2743-2756.
- 152 郭智昌, 赵进平. 北极海冰数值模拟研究述评[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(2): 219-228.
- 153 SPREEN G, KWOK R, MENEMENLIS D. Trends in Arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992–2009[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(19): 1-6.
- 154 SIMMONDS I, RUDEVA I. The great Arctic cyclone of August 2012[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(23): L23709.
- 155 PARKINSON C L, COMISO J C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(7): 1356-1361.
- 156 SIMMONDS I, KEAY K. Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior over 1979–2008[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): L19715.

Overview on the thermodynamic and dynamic factors influencing Arctic sea ice thickness

Wang Yun¹, Li Xuewei¹, Wang Jinfei¹, Yu Lejiang², Yang Qinghua¹

(¹ School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China;

² Key Laboratory of Polar Science, MNR, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China)

Abstract

Under current climate change conditions, Arctic sea ice has become a key scientific topic, because of its close connection with global climate. Sea ice thickness, important for material and energy exchanges between the atmosphere, sea ice and oceans, is also an indicator of climate change. In the last 40 years, Arctic sea ice cover has rapidly shrunk, ice thickness has markedly decreased, and ice melt has strongly accelerated. These changes have markedly affected the climate system at the regional and global scale. Summarizing previous research results, this paper comprehensively describes the thermodynamic and dynamic processes

affecting Arctic sea ice thickness. Thermodynamically, sea ice thickness is affected by atmospheric variables including ice characteristics, air temperature, water vapor, rainfall, snowfall and cloud cover, through the sea ice surface radiation budget and turbulent heat exchange (sensible and latent heat). Moreover, the ocean heat flux affecting sea ice thickness results from upper ocean heating by solar radiation, vertical mixing induced by wind stress, and warm water input from middle and low latitudes. Dynamically, the interaction between wind stress and ocean currents generates sea ice transport and deformation, thereby affecting the sea ice thickness. In summary, climate variability induces additive forcing from these thermodynamic and dynamic processes on sea ice thickness variation.

Keywords Arctic sea ice, sea ice thickness, thermodynamics, dynamics