

魏硕, 张永莉, 聂红涛, 等. 波弗特海 2019 年夏季海冰极端低值成因研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(5): 92–101, doi:10.12284/hyxb2022077
Wei Shuo, Zhang Yongli, Nie Hongtao, et al. Cause of Beaufort Sea low ice condition in the summer of 2019[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(5): 92–101, doi:10.12284/hyxb2022077

波弗特海 2019 年夏季海冰极端低值成因研究

魏硕¹, 张永莉¹, 聂红涛^{1*}, 魏皓¹

(1. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072)

摘要: 波弗特海海冰的剧烈变化对区域内生态系统以及经济活动具有重要影响。基于美国国家冰雪数据中心发布的海冰密集度数据, 本文对 2019 年波弗特海夏季海冰面积出现极端低值的机制进行了探讨。2019 年融冰季 (5–9 月) 海冰覆盖面积为 $1.38 \times 10^6 \text{ km}^2$, 远低于 1998–2020 年平均面积 $2.28 \times 10^6 \text{ km}^2$, 统计 2019 年前秋 (2018 年 10–12 月) 和前冬季节 (2019 年 1–4 月) 海冰覆盖面积, 发现其与 1998–2019 年多年平均结果无显著差异; 先前季节的海冰冰况不是造成极端低值事件的主要原因。综合海冰漂移场、海冰厚度、10 m 风场以及海表面净热通量数据发现, 2019 年 5 月份海冰面积减小 $2.33 \times 10^6 \text{ km}^2$, 是 1998 年以来 5 月海冰损失量最大的年份, 占融冰季节海冰面积减小量的 62%。与 1998 年、2008 年、2012 年以及 2016 年波弗特海夏季发生海冰覆盖面积极端低值现象的机制不同, 不断减小的海冰厚度以及 2019 年 5 月异常强的风场, 促使海冰快速向外输出, 波弗特海南部 5 月 16 日就形成开阔水域; 伴随着异常高的海表面净热通量使得海冰更多地融化, 造成了 2019 年夏季海冰的异常现象。随着海冰厚度的不断变薄, 海冰对风场的响应越来越强, 海冰消退时间不断提前, 波弗特海夏季海冰的极端低值现象可能更为频繁地出现。

关键词: 波弗特海; 海冰覆盖面积; 极端年份; 机制分析

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)05-0092-10

1 引言

近几十年来北冰洋海冰覆盖面积和范围急剧减小^[1-3], 海冰厚度和海冰密集度也不断降低, 对区域气候环境、生态系统和经济活动均产生深远影响^[4]。波弗特海(图 1)位于西北冰洋, 是北冰洋海冰变化最剧烈的边缘海之一。波弗特海海冰融化早晚影响着浮游植物藻华, 对区域的生态系统具有重要影响^[5]。融冰形成的淡水增加了北冰洋淡水含量, 并使波弗特流涡局部变淡^[6-7]。此外, 波弗特海是西北航道的重要组成部分, 其海冰状况对于航道开通时间意义重大^[8]。

在海冰总体减少的趋势下, 波弗特海海冰年际变

化明显。研究表明, 波弗特海海冰覆盖面积在 3 月最大, 9 月最小, 海冰通常从 5 月开始融化^[9]。随着多年冰覆盖范围不断减小^[6, 10-11], 海冰厚度不断变薄^[12], 冰漂移速度加快^[13], 波弗特海夏季冰边缘线快速向北退缩^[14-15]。从 1998 年开始, 波弗特海海冰类型逐渐由多年冰向一年冰转化^[9, 11, 16]。1998 年也是 1953 年以来波弗特海海冰的极端低值年, 9 月份海冰覆盖面积较 1953–1997 年平均低 39%^[17]; 此后, 2008 年又出现了极端低值^[18]。2012 年夏季, 波弗特海出现了 31 d 的无冰期^[19]; 仅仅 4 年之后, 2016 年夏季波弗特海再次出现无冰现象^[20]。夏季海冰覆盖面积的长期年际变化不仅取决于当前季节的热力和动力贡献, 还与此前季

收稿日期: 2021-08-10; 修订日期: 2021-11-11。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630969, 41941013)。

作者简介: 魏硕(1997—), 男, 河南省南阳市人, 主要从事海洋海冰动力学方面研究。E-mail: weishuo@tju.edu.cn

* 通信作者: 聂红涛, 副教授, 主要从事海洋环境动力学方面研究。E-mail: htNie@tju.edu.cn

节的热力和动力学过程有关^[21]。1998年夏季海冰低值与北极震荡指数的低值以及1997年11月至1998年4月持续东风和南风下多年冰不断输出有关^[17, 22]。2007年夏季,波弗特海海冰覆盖面积低于1998年之后任何一个夏季^[23-24],导致2007年冬季结冰较晚,2008年夏季开阔水域形成较早^[6]。2012年海冰极小值是因为浮冰更容易受到8月初北极气旋的影响^[25],这是几十年来海冰不断减少的结果^[26]。2016年1-4月份波弗特海海冰输出远高于1979-2016年38年的平均水平,造成了2016年的海冰异常^[20]。基于美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)发布的海冰密集度(Sea Ice Concentration, SIC)数据,本文追踪波弗特海海冰面积(Sea Ice Area, SIA)年际变化,发现2019年波弗特海夏季再次出现了海冰面积极端低值。此次海冰异常是如何形成的,其与之前的海冰面积极端低值年形成机制是否相同值得探究。对海冰异常形成规律的分析,有助于进一步探究近年来北冰洋边缘海海冰迅速减少的原因,从而对预测海冰变化提供支持。

2 数据和方法

2.1 研究区域

波弗特海是北冰洋美亚海盆的陆架边缘海,位于美国阿拉斯加北部和加拿大西北部沿岸,西侧是楚科奇海,东侧延伸至班克斯岛,北部与加拿大海盆相连(图1)。

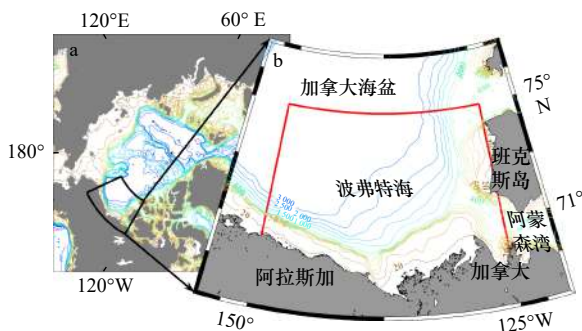


图1 研究区域
Fig. 1 Study area

红色粗实线为波弗特海范围(125°~150°W, 75°N以南),彩色背景线为等深线

The bold solid red line represents the cover of Beaufort Sea (125°~150°W and south of 75°N), the colored background lines are isobath lines

2.2 数据来源

海冰密集度数据来源于美国国家冰雪数据中心发布的微波遥感海冰密集度数据^[27](Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, ver-

sion 1)。该数据集由以下3种被动微波观测记录,分别为Nimbus-7卫星搭载的扫描式多通道微波辐射计(SMMR)、美国国防气象卫星搭载的多波段微波辐射扫描仪(SSM/I)和多波段微波辐射成像探测器(SSMIS)。一般来说,冬季海冰密集度误差在5%左右,而在夏季存在融池时,误差较大,整体在15%以内^[27]。数据覆盖范围包括30.98°~90°N的整个区域,空间分辨率为25 km×25 km,时间从1978年10月26日至2020年12月31日,对于1978年11月1日至1987年7月7日期间隔天提供的数据,采用线性内插将数据补齐。1987年12月2日至1988年1月12日的缺失数据不影响本文结果,暂未处理。除上述外的其余时段提供逐日数据。

海冰漂移数据来自NSIDC^[28]。该数据由多套卫星遥感数据、漂流浮标数据以及再分析数据融合而成,提供每日和每周的海冰漂移矢量数据。该数据集纬向分量偏差约±0.05 cm/s,经向分量偏差在0.4~0.7 cm/s之间^[28]。空间上覆盖了29.7°~90°N的整个区域,空间分辨率为25 km×25 km,时间从1978年10月25日至2020年12月31日。

海冰厚度数据来自华盛顿大学研发的PIOMAS海冰模式数据^[29],PIOMAS的数据已广泛应用到极地海冰的研究中^[30-32]。该数据空间覆盖范围包括45°~90°N的整个区域,模式网格点为360×120,时间从1979年1月1日至2020年12月31日,时间分辨率为1d。

大气强迫数据来自欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的第五代大气再分析数据集ERA5,包括10 m风场、短波辐射、长波辐射、感热通量、潜热通量。覆盖范围为全球,空间分辨率为0.25°×0.25°,时间从1979年1月1日至今,时间分辨率为1h。

2.3 方法

本文海冰覆盖面积的计算采用海冰密集度15%作为阈值^[33-34],具体计算公式如下:

$$SIA = \sum w_i s_i c_i ds, \begin{cases} w_i = 1, c_i \geq 15\% \\ w_i = 0, c_i < 15\% \end{cases}, \quad (1)$$

式中, w_i 为每个网格的权重系数; s_i 为每个网格的面积; c_i 为每个网格的海冰密集度。当网格内海冰密集度低于15%时,则相应的权重系数为0,认为该网格区域内无冰;当网格内海冰密集度超过和等于15%时,其权重系数为1,该网格内海冰覆盖面积为相应海冰密集度与网格面积的乘积。将区域内网格海冰面积加总得到该区域的海冰总面积。

海冰漂移数据在波弗特海东边界(125°W)存在

缺失,无法估计;西边界(150°W)、北边界(75°N)海冰面积通量(F_i)的计算参照下式^[20]:

$$F_i = \sum c_i u_i \Delta x, \quad (2)$$

式中, c_i 为边界上每个网格点的海冰密集度; u_i 为对应网格点上的海冰漂移速度; Δx 为每个网格的宽度。正通量表示海冰向波弗特海区域输入,海冰增加;负通量表示波弗特海内海冰向外输出,海冰减少。参照 Babb 等^[20] 采用的方法,某一段时间内波弗特海海冰面积减小量由海冰输出量和海冰融化量组成,海冰动力输出贡献为两个边界的动力输出量之和,海冰面积减小总量减去动力输出贡献即可得到由于热力过程导致的海冰面积损失量。由于观测数据限制,本文未考虑海冰挤压、成脊等物理过程造成的海冰面积变化。

在任何给定的时间间隔内,面积通量(σ_F)的不确定性可以通过下式计算得出^[35]:

$$\sigma_F = \sigma_u L \sqrt{\frac{N_d}{N_s}}, \quad (3)$$

式中, L 为断面宽度; σ_u 为运动估计的标准差; N_d 为估计时段的天数; N_s 为每个断面上网格点的个数。

海表面净热通量由感热通量、潜热通量、长波辐射和短波辐射组成。海表面净热通量计算公式如下:

$$Q_{net} = Q_{sw} + Q_{lw} + Q_{lat} + Q_{sen}, \quad (4)$$

式中, Q_{net} 为净热通量; Q_{sw} 和 Q_{lw} 分别代表进入海表面的太阳辐射以及海表面对外的长波辐射; Q_{lat} 和 Q_{sen} 分别是潜热通量和感热通量。当 Q_{lw} 、 Q_{lat} 和 Q_{sen} 为负值时,表明海洋损失热量, Q_{net} 和 Q_{sw} 为正时,表明海洋得到热量。

利用逐日海冰密集度和短波辐射来估计波弗特海开阔水域吸收的太阳辐射量(F_{ow}),计算公式如下^[20]:

$$F_{ow} = F(1 - \alpha)A_{ow}, \quad (5)$$

式中, F 为到达海表的短波辐射,单位为 W/m^2 ; α 为开阔水域的反照率(0.07); A_{ow} 为开阔水域的面积。

3 结果与分析

3.1 2019 年海冰极端低值

波弗特海融冰季节(5–9月)海冰覆盖面积如图2所示。1979–2020年,波弗特海融冰季节海冰覆盖面积呈现明显的下降趋势,下降速率约为 $3\,460\text{ km}^2/\text{a}$ 。从1998年开始,前后两个阶段海冰覆盖面积有着明显的差异^[16,20]。1979–1997年,融冰季波弗特海平均海冰面积为 $(3.04 \pm 0.48) \times 10^5\text{ km}^2$,下降速率并不明显,约为 $1\,010\text{ km}^2/\text{a}$ 。1998–2020年,平均海冰面积为 $(2.26 \pm 0.64) \times 10^5\text{ km}^2$,海冰面积减小速率十分显著,约

为 $3\,580\text{ km}^2/\text{a}$ 。从图2可以看出,自波弗特海1998年首次出现极端低值年以来,2008年、2012年、2016年极端低值年相继出现。仅在3年之后,2019年波弗特海再次出现极端低值。

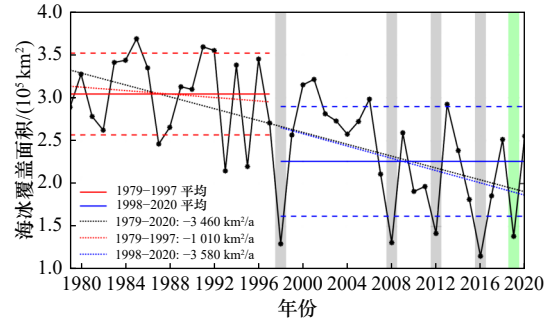


图2 1979–2020年波弗特海融冰季海冰覆盖面积年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of sea ice cover in the melt season of Beaufort Sea during 1979–2020

1998–2019年多年平均结果表明,波弗特海融冰从阿蒙森湾口开始,开阔水域逐渐向北部和西部扩展(图3a至图3e)。5–6月份,整个海域依然被海冰覆盖,东南部以及阿蒙森湾口海冰密集度逐渐减小;直到7月份,东南部海域逐渐出现开阔水域,开阔水域在8月和9月继续向西和向北扩展。8月,波弗特海南部已经完全成为开阔水域。通过比较发现,2019年5月份,整个波弗特海域,海冰密集度远低于多年平均结果,并且低海冰密集度区域集中在波弗特海南部。6月份,波弗特海南部已经基本完全形成开阔水域,而多年平均结果南部依然被海冰覆盖。事实上,从逐日海冰密集度数据可以看出,2019年5月16日开始,波弗特海东南部已经开始出现开阔水域;5月22日,西南部也出现开阔水域。7月,多年平均结果显示开阔水域还仅仅存在于波弗特海东南部,而2019年除东北部外,西部大部分区域已经没有海冰。8–9月份,海冰逐渐减少,并且主要集中在波弗特海东北部地区(图3f至图3j)。2019年波弗特海海冰密集度与多年平均对比结果表明融冰季节波弗特海绝大多数区域都小于多年平均结果(图3k至图3o)。

3.2 前秋与前冬季节海冰变化

究竟是什么原因导致了2019年波弗特海海冰的极端低值?前人研究结果表明,融冰季海冰覆盖的情况不仅与当前季节有关,还需考虑前秋和前冬季节的海冰状况^[20–21]。因此,为了便于比较,参照前人的划分方法将前一年10–12月份定义为前秋季节,所在年1–4月份定义为前冬季节,5–9月份为融冰季节^[21]。1998–2019年多年平均结果(图4a)表明,前秋季节波

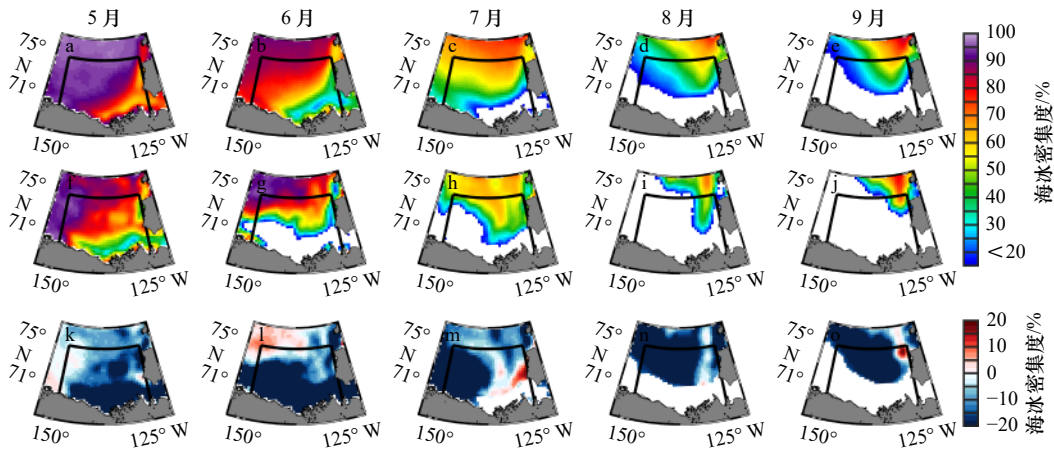


图3 1998–2019年多年平均以及2019年融冰季海冰密集度

Fig. 3 Sea ice concentration in the melt season of multi-year average of 1998–2019 and 2019

a–e 为 1998–2019 年平均; f–j 为 2019 年; k–o 为 2019 年与 1998–2019 年平均之间的差异; 黑色粗实线为图 1b 中波弗特海区域

a–e are the average of 1998–2019; f–j are the 2019, and k–o are the difference between 2019 and

1998–2019; the bold black line represents the cover of Beaufort Sea in Fig. 1b

弗特海完全被海冰覆盖, 高海冰密集度区域集中在波弗特海北部; 而 2019 年则集中在波弗特海中部和东部地区, 除了西北部边缘海冰密集度小于多年平均, 大部分地区海冰密集度高于多年平均结果(图 4d, 图 4g)。前冬季节, 整个海域依然被海冰覆盖, 东南部区域海冰密集度略小于其他区域。2019 年东南部与多年平均结果相比略小, 但整体差异不大(图 4b, 图 4e, 图 4h)。然而, 在融冰季节, 不论是海冰覆盖区域还是海冰密集度, 2019 年与多年平均结果都有很大差异(图 4c, 图 4f, 图 4i)。

按照前文面积通量计算方法, 2019 年前秋、前冬

以及融冰季北边界和西边界海冰面积通量及误差如表 1 所示, 可见误差可以忽略。图 5 展示了 1998–2019 年前秋、前冬以及融冰季节海冰面积总变化量 ($\Delta\text{SIA}_{\text{total}}$)、动力输出贡献 ($\Delta\text{SIA}_{\text{dynamic}}$)、热力融化贡献 ($\Delta\text{SIA}_{\text{thermal}}$) 以及每个阶段末波弗特海剩余的海冰总面积。在所有年份中, 热力过程在前秋季节促使海冰增加, 在融冰季节使得海冰减少。虽然 2019 年前秋季节海冰面积增加较少, 但是 2018 年 9 月底波弗特海东部存在大量海冰, 海冰面积为 $1.77 \times 10^5 \text{ km}^2$, 远高于 1998–2019 年平均值 $1.13 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。2019 年前秋季节末, 海冰面积为 $4.71 \times 10^5 \text{ km}^2$, 略高于 1998–2019 年

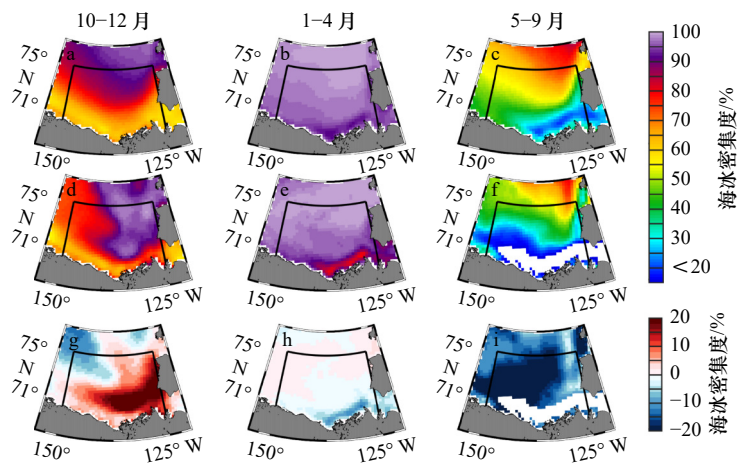


图4 1998–2019年多年平均以及2019年前秋、前冬、融冰季海冰密集度

Fig. 4 Sea ice concentration in the preceding fall, preceding winter, melt season of multi-year average of 1998–2019 and 2019

a–c 为 1998–2019 年平均; d–f 为 2019 年平均; g–i 为 2019 年与 1998–2019 年平均之间的差异; 黑色粗实线为图 1b 中波弗特海区域

a–c are the average of 1998–2019; d–f are the 2019, and g–i are the difference of 2019 and 1998–2019; the bold black line represents the cover of Beaufort Sea

in Fig. 1b

表 1 2019 年前秋、前冬以及融冰季节北边界、西边界面积通量及计算误差 (括号内为误差)

Table 1 Ice transport and the uncertainty across the northern and western gates of 2019 in the preceding fall, preceding winter and melt season (the uncertainty is in brackets)

	北边界	西边界
前秋面积/(10 ⁴ km ²)	12.69(0.72)	-24.40(0.95)
前冬面积/(10 ⁴ km ²)	5.41(0.68)	-27.25(0.82)
融冰季面积/(10 ⁴ km ²)	14.63(0.76)	-14.07(1.08)

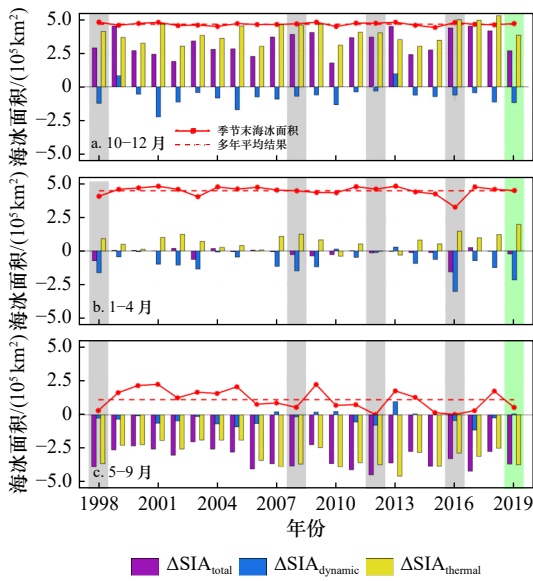


图 5 1998–2019 年前秋(a)、前冬(b)以及融冰季节(c)内海冰面积总变化量(ΔSIA_{total})、动力输出贡献(ΔSIA_{dynamic})和热力融化贡献(ΔSIA_{thermal})

Fig. 5 Total variation (ΔSIA_{total}), dynamic contribution (ΔSIA_{dynamic}), and thermal contribution (ΔSIA_{thermal}) of sea ice area in the preceding fall (a), preceding winter (b), melt season (c) of 1998–2019

平均值 $4.67 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。2019 年前冬季节, 动力输运为 $2.18 \times 10^5 \text{ km}^2$, 仅次于 2016 年, 远高于 1998–2019 年平均值 $1.66 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。但 2019 年热力贡献达到 1998 年以来最高值, 使前冬季节海冰增加 $1.96 \times 10^5 \text{ km}^2$, 远远高于平均值 $0.68 \times 10^5 \text{ km}^2$, 因此, 前冬季节海冰仅仅减小 $0.23 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。2019 年前冬季节末海冰面积为 $4.50 \times 10^5 \text{ km}^2$, 与 1998–2019 年平均值 $4.49 \times 10^5 \text{ km}^2$ 相当。这与 1998 年和 2016 年极端低值年不同, 1998 年和 2016 年前冬季节海冰面积减少分别为 $0.73 \times 10^5 \text{ km}^2$ 和 $1.58 \times 10^5 \text{ km}^2$, 季节末海冰覆盖面积分别为 $4.07 \times 10^5 \text{ km}^2$ 和 $3.25 \times 10^5 \text{ km}^2$, 研究指出前冬季节海冰减少是造成 1998 年和 2016 年极端年份的主要原因^[17,20–21]。2019 年前秋和前冬季节与多年平均结果相当, 前秋和前冬季

节的海冰状况不是造成 2019 年海冰异常的关键因素。

3.3 融冰季动力热力贡献

2019 年融冰季海冰面积减小量约为 $3.75 \times 10^5 \text{ km}^2$, 而 5 月份海冰面积减小为 $2.33 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占融冰季内海冰面积减小量的 62%, 另外 38% 海冰面积减小发生在 6–9 月, 其中动力输运使波弗特海海冰面积增加 $0.85 \times 10^5 \text{ km}^2$, 热力融化减小 $2.27 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。2019 年 5 月份海冰面积损失是 1998–2019 年平均态的 3.3 倍, 是 1998 年以来 5 月海冰面积损失的最大值(图 6a)。逐日海冰密集度数据表明 2019 年 5 月 16 日开始, 波弗特海南部已经开始出现开阔水域。从图 6b 海冰面积减小量的逐日变化曲线中也可以看出, 2019 年 5 月 16 日之前, 虽然海冰面积减小量高于 1998–2019 年平均, 但曲线平缓, 减小速率较慢; 5 月 16 日开始, 海冰快速减少。表 2 统计结果表明, 5 月 1 日至 15 日, 海冰损失为 $8.01 \times 10^4 \text{ km}^2$, 5 月 16 日至 31 日, 海冰损失为 $15.30 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是前半月的 1.9 倍。

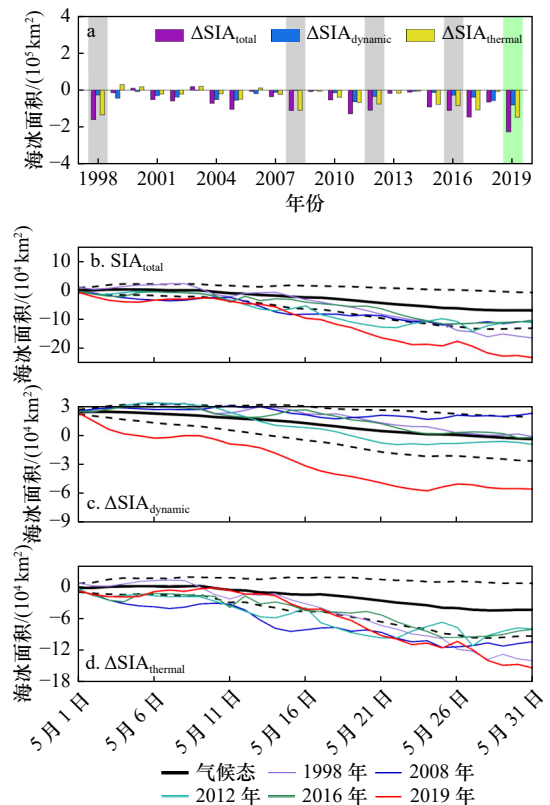


图 6 1998–2019 年 5 月海冰面积收支(a)以及 2019 年 5 月海冰面积总变化量(ΔSIA_{total})(b)、动力输出贡献(ΔSIA_{dynamic})(c)、热力融化贡献(ΔSIA_{thermal})(d)日均累积量

Fig. 6 Sea ice area budget in the May of 1998–2019 (a) and cumulative of the total variation of sea ice area (ΔSIA_{total}) (b), dynamic contribution (ΔSIA_{dynamic}) (c), and thermal contribution (ΔSIA_{thermal}) (d) in May of 2019

表2 2019年5月海冰面积收支
Table 2 Sea ice area budget in May of 2019

	1-31日	1-15日	16-31日
总量/(10 ⁴ km ²)	-23.31(-7.03)	-8.01(-2.31)	-15.30(-4.72)
动力贡献/(10 ⁴ km ²)	-7.95(-2.79)	-4.91(-1.01)	-3.03(-1.78)
热力贡献/(10 ⁴ km ²)	-15.36(-4.23)	-3.10(-1.29)	-12.27(-2.94)

注:括号内为1998-2019年平均。

海冰减少是动力过程和热力过程共同作用的结果^[12, 20-21]。图6b至图6d展示了5月海冰面积总量、动力贡献、热力贡献的日均累积量,2019年5月动力输运、热力融化导致的海冰损失量分别为1998-2019年平均的2.8倍和3.6倍。2019年5月份热力融化和动力输出的海冰之比约为2:1,热力融化为15.36×10⁴ km²,动力输出为7.95×10⁴ km²,其中北部边界输入为4.43×10⁴ km²,西边界输出为12.38×10⁴ km²。热力融化在5月1日至15日贡献相对较小,5月16日之后快速增加。在5月1日至15日,动力输出为4.91×10⁴ km²,热力导致海冰减少只有3.10×10⁴ km²,动力输出是热力融化的1.6倍。5月16日至31日,海冰融化了12.27×10⁴ km²,是动力输出的4.0倍。相较于其他极端年份,2019年5月海冰减少依然十分显著。其他异常年5月份的海冰输出与多年平均结果相比没有显著差异,而2019年5月动力输运一直高于多年平均,热力融化也较其他异常年较高,2019年夏季海冰极端低值更多地是依赖于当季的变化。

3.4 2019年5月海冰异常的原因分析

1998-2019年1-4月海冰厚度平均结果显示,波弗特海区域除阿蒙森湾口附近海冰厚度偏薄,其他区域海冰厚度都在2 m上下。而2019年,波弗特海南部海冰厚度普遍低于2 m,整体海冰厚度也远小于多年平均结果(图7)。图8a展示了5月波弗特海10 m纬向分量(u)和经向分量(v)、海冰面积减小量逐日变化。通过相关性分析发现,东风与每天海冰减少量

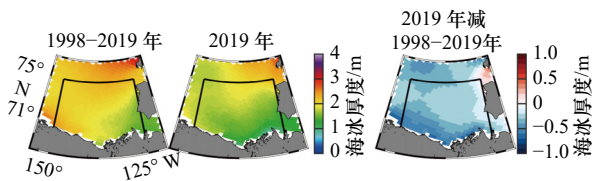


图7 PIOMAS模拟的1-4月海冰平均厚度

Fig. 7 Average sea ice thickness from January to April simulated by PIOMAS

黑色粗实线为图1b中波弗特海区域

The bold black line represents the cover of Beaufort Sea in Fig. 1b

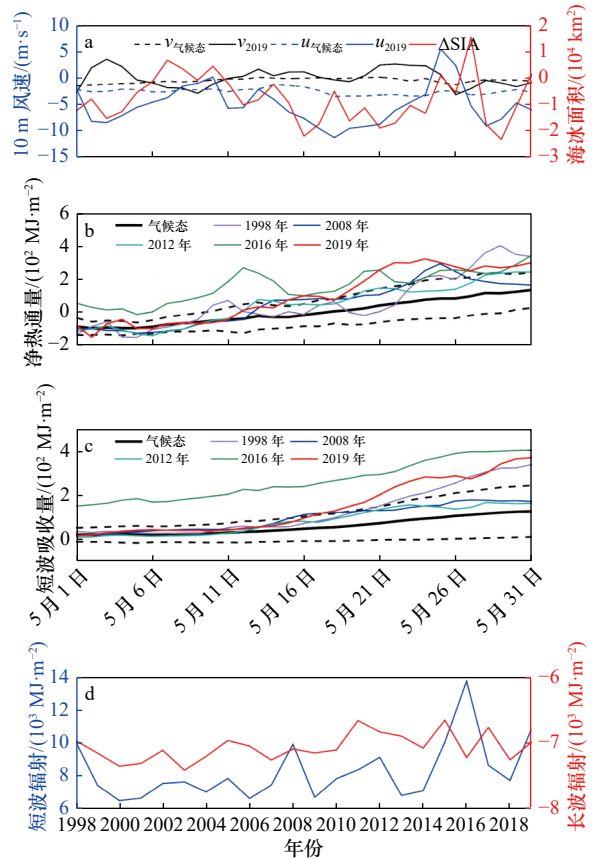


图8 波弗特海2019年5月10 m风场、逐日海冰面积减少量(a)、海表面净热通量(b)、短波辐射吸收量(c)和1998-2019年5月累积短波辐射和长波辐射年际变化(d)

Fig. 8 10 m wind field and daily decrease of sea ice area (a), net sea surface heat flux (b), and solar absorption (c) over the Beaufort Sea in May of 2019, and inter-annual variation of cumulative solar radiation and thermal radiation in May during 1998-2019 (d)

相关系数为0.50($p < 0.01$),北风与其相关系数为-0.48($p < 0.01$)。从表1及3.2节结果中发现,波弗特海5月份海冰主要从西边界输出,海冰输出主要与东风有关。2019年5月份东风平均风速为-5.08 m/s,是1998-2019年5月平均的2.4倍;由海冰漂移场也可以看出,2019年5月冰漂移速度远大于1998-2019年平均速度(图9)。5月1日至15日,波弗特海还未形成开阔水域,海表面净热通量也保持在较低水平。东风平均风速为-4.29 m/s,在强东风的作用下,波弗特海海冰不断从西边界输出,输出海冰面积达到7.17×10⁴ km²。海冰面积逐日变化量与东风风速具有很好的一致性,峰值出现时间相吻合(图8a)。5月前半月,热力贡献较小,因为这一阶段波弗特海几乎完全被海冰覆盖。随着海冰的不断输出,波弗特海南部海冰不断减少,开阔水域逐渐形成,热力贡献逐渐增

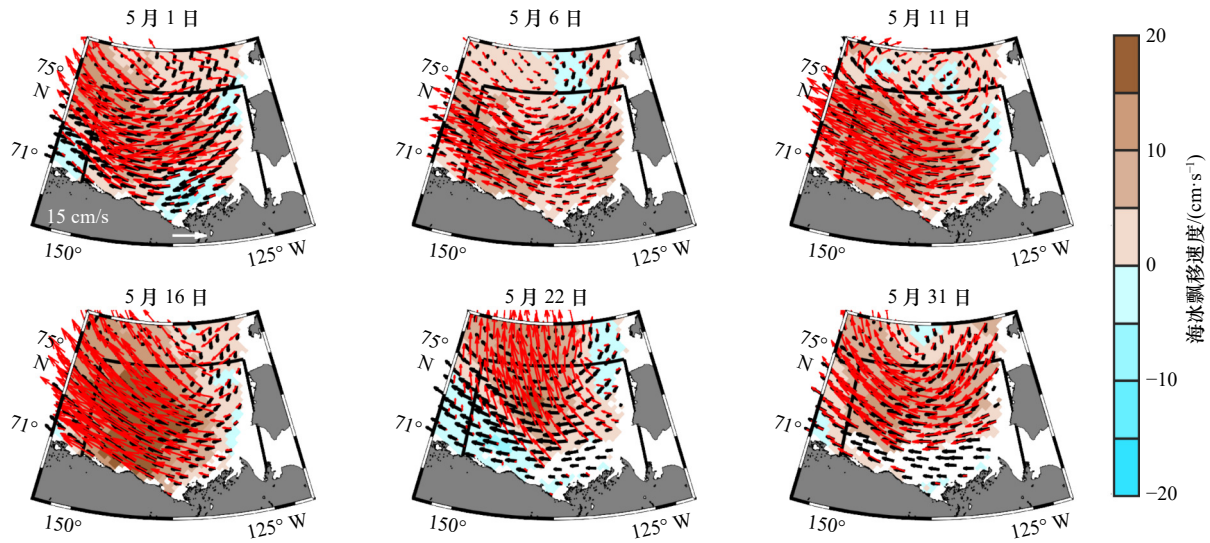


图9 5月海冰漂移场

Fig. 9 The spatial distribution of sea ice drift in May

黑色箭头为1998–2019年平均,红色箭头为2019年,底色为2019年与多年平均之间的差异;黑色粗实线为图1b中波弗特海区域
The black arrows represent the average for 1998–2019, the red represent the 2019, and the color shading shows the difference between 2019 and 1998–2019; the bold black line represents the cover of Beaufort Sea in Fig. 1b

加。事实上,5月12日,海表面净热通量才由负转为正(图8b)。5月16日至31日,虽然东风增强,平均风速达到 -5.81 m/s ,但是随着海冰的不断输出和融化,波弗特海南部开阔水域不断扩大,存留海冰越来越少,使得这一阶段海冰输出量减小。随着开阔水域的增大以及海表面净热通量增加,更多的太阳辐射进入上层海洋,热力贡献大幅增加,这加剧了海冰融化,加强了正反馈循环。5月后半月,热力贡献增加,动力贡献减少,从图8a也可以看出这一阶段东风风速与海冰面积逐日变化一致性变差。2019年5月风场强度远大于多年平均结果,海冰不断向外输出,造成波弗特海南部较早地形成开阔水域,促使波弗特海吸收更多的太阳辐射。2019年5月累积吸收短波辐射量为 44.46 MJ/m^2 (图8c),约为1998–2019年多年平均结果的2.5倍,这加强了区域海冰的正反馈效应,导致海冰更多地融化,使2019年成为1998年以来5月海冰损失量最大的年份。

波弗特海的极端低值都伴随着异常高的太阳辐射(图8d),但不同年份又存在差异。1998年和2016年波弗特海融冰季的海冰极端低值是由于前冬季节的海冰输出导致的^[17,20–21],1998年和2016年前冬季节海冰面积减小分别为 $0.73\times 10^5\text{ km}^2$ 和 $1.58\times 10^5\text{ km}^2$,季节末海冰覆盖面积较1998–2019年平均值分别低9%和28%,海冰面积的减小使得这两年5月海表面吸收的短波辐射异常高,分别为1998–2019年平均值的2.2倍和4.6倍。2007年夏末异常少的海冰以及2008

年前冬季节强的海冰输出造成了2008年夏季海冰覆盖面积的异常^[21],2008年前冬季节海冰输出为 $1.51\times 10^5\text{ km}^2$,5月累积短波辐射吸收量为多年平均的1.7倍。2012年的异常是受到8月初强气旋的影响^[25],融冰季节内海冰面积减小 $4.4\times 10^5\text{ km}^2$,是1998–2019年中的最大值,其中动力输出为 $0.76\times 10^5\text{ km}^2$,是极端年中融冰季节动力输出最多的一年。2019年前冬季节末海冰覆盖面积为 $4.50\times 10^5\text{ km}^2$,与多年平均结果 $4.49\times 10^5\text{ km}^2$ 相当,但是5月份海洋累积吸收的短波辐射量是1998–2019年平均值的2.5倍,这一方面是因为2019年较高的太阳辐射,另一方面5月初异常强的动力环境促使较早形成了开阔水域。海冰的不断变薄(图7),以及强动力环境使波弗特海较早地形成了开阔水域,加强了海冰的正反馈效应,伴随着异常高的海表面净热通量,造成了2019年海冰极端低值。

由于年代际趋势和季节变化,海冰向更年轻和更薄的冰类型转化^[36–37],使其更容易受到动力和热力强迫的影响^[19]。波弗特海海冰对风场的响应越来越强,这导致了波弗特海向西输运进入楚科奇海海冰的增加^[38],并且西边界的输出量大于北边界^[38–39]。同时,21世纪以来,北极增暖的趋势十分显著,是全球平均水平的2倍^[40],这加快了海冰融化。因此,一旦波弗特海区域动力环境增强,就可能会导致融冰期过早地形成开阔水域,加强海冰融化的正反馈效应,造成极端低值。随着波弗特海海冰消退时间的不断提前^[41–42],波弗特海融冰季节海冰的极端低值现象可能更为频

繁地出现,成为波弗特海的常态。

4 总结

本研究基于卫星观测的海冰密集度数据,对波弗特海融冰季海冰覆盖面积极端年份进行了探究,并利用冰漂移场、海冰厚度、10 m 风场、海表面净热通量等数据对其产生的原因进行了分析。具体结论如下:

(1)继1998年、2008年、2012年和2016年波弗特海出现极端低值后,2019年波弗特海再次出现了极端低值,波弗特海海冰极端低值年出现频率越来越高。2019年波弗特海融冰季海冰覆盖面积为 $1.38 \times 10^5 \text{ km}^2$,远低于1998–2020年平均 $2.28 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

(2)2019年海冰面积极端低值主要由融冰季节的海冰变化导致,而与前秋和前冬季海冰覆盖面积的变化无关。2019年融冰季(5–9月)海冰面积减小量约为 $3.75 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中5月份海冰面积减小为 $2.33 \times 10^5 \text{ km}^2$,占融冰季内海冰面积减小量的62%。2019年

融冰伊始海冰厚度较多年平均结果明显较低,而5月风场强度远大于多年平均结果,东风强度是多年平均的两倍,海冰不断向外输出,造成波弗特海南部较早地形成开阔水域;同时异常高的海表面净热通量导致海冰更多地融化,以上因素共同造成了2019年融冰季海冰面积的极端低值。

(3)波弗特海的极端低值都伴随着异常高的太阳辐射,但不同年份又存在差异。1998年、2008年和2016年是与前冬季的海冰输出有关,2012年与融冰季内北极气旋存在联系。2019年在前冬季末海冰覆盖面积与多年平均结果相当,但5月份太阳辐射吸收量是1998–2019年多年平均的2.5倍,除了异常高的太阳辐射,还与2019年强动力环境导致的开阔水域较早形成密切相关。随着海冰厚度的不断变薄,海冰对风场的响应越来越强,海冰消退时间提前,波弗特海夏季海冰的极端低值现象可能更为频繁地出现,波弗特海海冰预测将面临更为严峻的挑战。

参考文献:

- [1] Lu Xiaomei, Hu Yongxiang, Liu Zhaoyan, et al. Observations of Arctic snow and sea ice cover from CALIOP lidar measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 194: 248–263.
- [2] Onarheim I H, Eldevik T, Smedsrud L H, et al. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(12): 4917–4932.
- [3] Wang Yunhe, Bi Haibo, Huang Hanxia, et al. Satellite-observed trends in the Arctic sea ice concentration for the period 1979–2016[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(1): 18–37.
- [4] Boeke R C, Taylor P C. Seasonal energy exchange in sea ice retreat regions contributes to differences in projected Arctic warming[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 5017.
- [5] Nadai G, Nöthig E M, Fortier L, et al. Early snowmelt and sea ice breakup enhance algal export in the Beaufort Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 2021, 190: 102479.
- [6] Kwok R, Cunningham G F. Contribution of melt in the Beaufort Sea to the decline in Arctic multiyear sea ice coverage: 1993–2009[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20): L20501.
- [7] Wang Qiang, Wekerle C, Danilov S, et al. Arctic sea ice decline significantly contributed to the unprecedented liquid freshwater accumulation in the Beaufort gyre of the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(10): 4956–4964.
- [8] 胡晓芳,蔡敬标. 北极航道航行船舶操纵性设计需求分析[J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(3): 37–44.
Hu Xiaofang, Cai Jingbiao. Analysis on the requirement of maneuverability for ships navigating through Arctic passage[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(3): 37–44.
- [9] Galley R J, Key E, Barber D G, et al. Spatial and temporal variability of sea ice in the southern Beaufort Sea and Amundsen Gulf: 1980–2004[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C5): C05S95.
- [10] 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.
- [11] Galley R J, Babb D, Ogi M, et al. Replacement of multiyear sea ice and changes in the open water season duration in the Beaufort Sea since 2004[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(3): 1806–1823.
- [12] Kwok R, Rothrock D A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(15): L15501.
- [13] Galley R J, Else B G T, Prinsenberg S J, et al. Summer sea ice concentration, motion, and thickness near areas of proposed offshore oil and gas development in the Canadian Beaufort Sea–2009[J]. *Arctic*, 2013, 66(1): 105–116.
- [14] Stroeve J C, Serreze M C, Fetterer F, et al. Tracking the Arctic's shrinking ice cover: another extreme September minimum in 2004[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(4): L04501.
- [15] 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.

- [16] Hutchings J K, Rigor I G. Role of ice dynamics in anomalous ice conditions in the Beaufort Sea during 2006 and 2007[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C8): C00E04.
- [17] Maslanik J A, Serreze M C, Agnew T. On the record reduction in 1998 western Arctic sea-ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(13): 1905–1908.
- [18] 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.
- [19] Babb D G, Galley R J, Barber D G, et al. Physical processes contributing to an ice free Beaufort Sea during September 2012[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(1): 267–283.
- [20] Babb D G, Landy J C, Barber D G, et al. Winter sea ice export from the Beaufort Sea as a preconditioning mechanism for enhanced summer melt: a case study of 2016[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(9): 6575–6600.
- [21] Zhang Yongli, Wei Hao, Lu Youyu, et al. Dependence of Beaufort Sea low ice condition in the summer of 1998 on ice export in the prior winter[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(21): 9247–9259.
- [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] 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.
- [24] Steele M, Zhang Jinlun, Ermold W. Mechanisms of summertime upper Arctic Ocean warming and the effect on sea ice melt[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C11): C11004.
- [25] Simmonds I, Rudeva I. The great Arctic cyclone of August 2012[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(23): L23709.
- [26] 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.
- [27] Cavalieri D J, Parkinson C L, Gloersen P, et al. Sea ice concentrations from nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS passive microwave data, version 1[R]. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 1996.
- [28] Tschudi M, Meier W N, Stewart J S, et al. Polar pathfinder daily 25 km EASE-Grid sea ice motion vectors, version 4[R]. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2019.
- [29] Zhang Jinlun, Rothrock D A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(5): 845–861.
- [30] Schweiger A, Lindsay R, Zhang Jinlun, et al. Uncertainty in modeled Arctic sea ice volume[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C8): C00D06.
- [31] Laxon S W, Giles K A, Ridout A L, et al. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(4): 732–737.
- [32] 周璐, 徐世明, 曾刚. 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*, 2017, 41(1): 57–70.
Zhou Lu, Xu Shiming, Zeng Gang. Dynamic and thermodynamic analysis of arctic sea ice decrease since the 1990s based on PIOMAS simulations[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(1): 57–70.
- [33] 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.
- [34] Comiso J C, Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C2): C02S07.
- [35] Kwok R. Baffin Bay ice drift and export: 2002–2007[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): L19501.
- [36] Lindsay R, Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2014, 8: 4545–4580.
- [37] Comiso J C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(4): 1176–1193.
- [38] Petty A A, Hutchings J K, Richter-Menge J A, et al. Sea ice circulation around the Beaufort Gyre: the changing role of wind forcing and the sea ice state[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(5): 3278–3296.
- [39] Howell S E L, Brady M, Derksen C, et al. Recent changes in sea ice area flux through the Beaufort Sea during the summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(4): 2659–2672.
- [40] 赵进平, 史久新, 王召民, 等. 北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(9): 985–995.
Zhao Jinping, Shi Jiuxin, Wang Zhaomin, et al. Arctic amplification produced by sea ice retreat and its global climate effects[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(9): 985–995.
- [41] Stroeve J C, Markus T, Boisvert L, et al. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(4): 1216–1225.
- [42] 杨毅, 聂红涛, 董春明, 等. 基于海冰密集度的消退起始时间判别方法改进研究与应用[J]. *海洋学报*, 2021, 43(7): 152–161.
Yang Yi, Nie Hongtao, Dong Chunming, et al. Improved estimation method of retreat onset dates based on sea ice concentration[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(7): 152–161.

Cause of Beaufort Sea low ice condition in the summer of 2019

Wei Shuo¹, Zhang Yongli¹, Nie Hongtao¹, Wei Hao¹

(1. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The dramatic change of sea ice in the Beaufort Sea has an important impact on the regional ecosystem and economic activities. Based on the sea ice concentration released by the National Ice and Snow Center of the United States, the mechanism of extremely low summer sea ice in the Beaufort Sea in 2019 is discussed. The sea ice area in the melt season (May–September) of 2019 is 1.38×10^5 km², far lower than the average of 2.28×10^5 km² from 1998 to 2020. According to the statistics of the sea ice area in the preceding autumn (October–December 2018) and winter (January–April 2019) of 2019, there is no significant difference between the 2019 and the average results of 1998–2019, so it is not the main reason for the extremely low ice event. Combining the data of sea ice drift field, sea ice thickness, 10 m wind field, and net sea surface heat flux, it is found that the sea ice in May of 2019 decreased by 2.33×10^5 km², which is the largest of sea ice loss in May since 1998, accounting for 62% of the loss of sea ice area in the melt season. Different from the mechanism of extremely low summer sea ice area in 1998, 2008, 2012, and 2016, decreasing sea ice thickness and abnormally strong wind field in May 2019 contribute to the rapid sea ice export, resulting in the formation of open water in the south of Beaufort Sea on May 16, 2019. The abnormally high sea surface net heat flux makes the sea ice melt more, resulting in the abnormal phenomenon of sea ice in the summer of 2019. With the continuous thinning of sea ice thickness, the response of sea ice to wind field is stronger and stronger, and the time of sea ice retreat is advanced, the phenomenon of extremely low summer ice condition in the Beaufort Sea may appear more frequently.

Key words: Beaufort Sea; sea ice area; abnormal year; mechanism analysis