

DOI:10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2023. 0112

WANG Weibo, ZHANG Junpeng, JIA Cun, et al. The change and influence of sea ice over Bering Sea: a review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(5):1475–1489. [王维波, 张俊鹏, 贾村, 等. 白令海海冰变化及其影响研究综述[J]. 冰川冻土, 2023, 45(5):1475–1489.]

白令海海冰变化及其影响研究综述

王维波^{1,2}, 张俊鹏^{1,2}, 贾村^{1,2}, 张小波³

(1. 自然资源部第三海洋研究所 海洋动力学研究室, 福建 厦门 361005; 2. 福建省海洋物理和地质过程重点实验室, 福建 厦门 361005; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 白令海是北冰洋的边缘海,其海冰变化与北极其他海域存在巨大差异。近10年来,白令海海冰面积发生显著减少,对区域水文、大气甚至生态系统造成巨大影响,甚至影响到中纬度乃至我国气候系统。基于卫星观测、模式模拟等多种手段,学术界对白令海海冰时空变化特征及其影响因子进行了大量的研究。本文阐述了白令海近期海冰变化,回顾了海冰变化的影响因子,总结了白令海海冰变化对水文、大气、生态系统以及中纬度气候系统的影响。通过对已有研究进行综合分析指出,受研究方法缺陷和观测数据缺失,以及探索因果关系机制的综合性研究较少的影响,对于驱动季节内白令海海冰变化机理认识仍然不足。进一步指出,需要加强对前期海冰对后期海冰影响、风场对海冰的拖拽作用、暖平流对海冰的影响尺度以及海冰面积变化尺度演变等方向的研究。

关键词: 白令海; 海冰变化; 影响因子; 生态系统响应

中图分类号: P731.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)05-1475-15

0 引言

白令海是一个半封闭海洋,东接阿拉斯加,西临西伯利亚,北面通过狭窄的白令海峡连接北冰洋,南向宽广的太平洋(图1)。由于南北海面高度差,白令海海水常年存在向北的流动^[1-6]。白令海一般在每年的11月开始结冰,主要形成于诺顿湾(Norton Bay)。在12月,海冰覆盖到白令海北部,阿纳德尔湾以及圣劳伦斯岛周边海域^[7-8]。白令海海冰通常在每年的3月达到最大,能够覆盖到整个白令海海域面积的1/4^[7,9]。海冰在北风的拖拽作用下向南输送。不过,南部白令海陆坡流携带大量的暖水阻碍了海冰向南拓展,导致白令海海冰外缘线呈“S”型分布特征^[9-10]。

白令海是生产力最高的海区之一,其大陆架区域被称为“绿带”(Green Belt),孕育着复杂多样的海洋生态系统^[11]。白令海季节性海冰对区域乃至北冰洋海洋环境、生态系统和气候都有重要的影响,

是海洋和气候研究领域的热点之一。近10年来,白令海海冰正加速减小^[12],造成了白令海水文特征和生态系统发生巨变,例如水体层化减弱,春季水华事件延后,大型甲壳类浮游动物丰度降低,冷池范围降低甚至消失、大型鱼类向北迁移等^[13-20]。同时,白令海海冰退缩可能是北半球中高纬度地区尤其是东亚和北美冬季寒潮频发、夏季热浪加剧、局地强雨雪天气事件增多^[21-28]等极端气候事件的一个重要因素。我国作为“近北极国家”,白令海海冰变化会作用于我国东北地区的气候环境,影响我国的粮食产量^[22]。了解白令海海冰变化及其影响机制,展望未来海冰变化的趋势,以及对东亚-北美气候系统的影响,是当前白令海海冰研究的重要方向。

以往大量的研究关注了白令海海冰的时空变化特征及其影响,不过相关研究仍然不足。由于观测资料缺乏,模式模拟的海冰变化与实际观测的相差较大;风场在季节内尺度无法解释海冰面积的扩

收稿日期: 2023-03-28; 修订日期: 2023-07-05

基金项目: 全球变化与海气相互作用II期项目(GASI-01-NPAC-STsum);福建省自然科学基金项目(2023J011380);山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金项目(201709)资助

作者简介: 王维波,助理研究员,主要从事极区海冰变化和海水光学研究. E-mail: wangwb@tio.org.cn

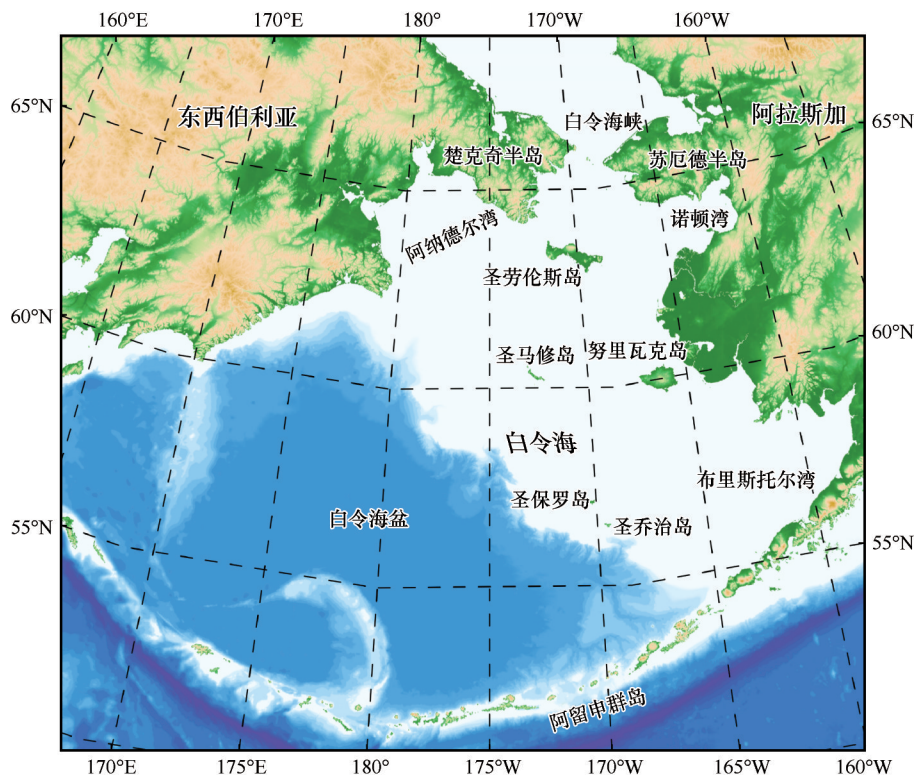


图1 白令海地理地形图及其部分地理名称

Fig. 1 Geography and place names of the Bering Sea

展;海洋强迫对局地海冰的影响认识有限;白令海海冰对中纬度地区气候的影响过程和强度仍然存在较大争议等。本文针对白令海海冰变化研究进行综述,主要包括白令海海冰的时空变化特征,海冰对局地大气、海洋以及生态系统的影响和对中纬度气候的影响三个方面总结近40年来白令海海冰变化的研究工作,并讨论目前研究的不足和对未来的展望。

1 白令海海冰变化特征

1.1 白令海冬季海冰面积变化以及趋势

白令海海冰为显著的季节性海冰,多为一年冰^[7]。在冬季,也存在少许的多年冰自楚克奇海穿过白令海海峡进入白令海^[5]。自1979年卫星监测海冰以来,44年的卫星遥感数据显示,白令海在不同的观测时间段,其海冰面积及其趋势表现不同。在20世纪后20年(表1),白令海海冰面积主要为增加趋势。1月海冰面积变化趋势最大,为 $4.98 \times 10^3 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。只在海冰结冰初期(11月)和融冰末期(5月)发生微弱减少。进入21世纪前20年,整个冬季白令海海冰面积均表现出显著的减少趋势,其中1月份减少趋势最显著,达到 $1.09 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。在

近10年来,白令海海冰面积正加速减少。除结冰初期(11月)之外,所有月份的减少趋势均远远大于2000—2020年。在4月份,海冰面积的减少趋势甚至达到 $5.20 \times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,意味着这10年损失了最大海冰面积的95%。

1979—2020年白令海月度海冰面积增量(ΔSIA ,本月海冰面积减去上个月海冰面积)在1月份达到最大,其平均值为 $19.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,在5月份最小,只有 $-26.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。近40年1月海冰面积增量正发生着显著的增大趋势,达到 $1.01 \times 10^3 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,为全年的极大值。同时,12月份海冰面积增量的趋势为全年的最小值,达到 $-2.13 \times 10^3 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,延迟结冰可能是其产生的根本原因。

近10年来,白令海海冰正经历着巨大变化。2012年,白令海冬季海冰面积达到有记录以来的最大值^[29-30],为 $8.43 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。海冰覆盖了整个白令海陆架区域,甚至延伸到白令海海盆区(图2)。仅仅过去5年后,白令海冬季海冰面积在2018年达到历史极小值^[12],仅为 $1.68 \times 10^5 \text{ km}^2$,是2012年海冰面积的19.9%,是历史平均水平的30.8%,仅在白令海北部海域存在海冰(图2)。科学家预测,最早在2030年白令海冬季将成为无冰海域^[25]。

表1 白令海在不同年限期间1—5月、11月和12月的平均海冰面积($\times 10^4 \text{ km}^2$)及其趋势($\times 10^4 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 1 The average values and trends of sea ice area in Bering Sea from January to May, and in November and December during the period of 1980—2000, 1990—2010, 2000—2020 and 2010—2020

月份	1980—2000年		1990—2010年		2000—2020年		2010—2020年	
	平均值	趋势	平均值	趋势	平均值	趋势	平均值	趋势
1月	41.243	0.498	42.059	0.047	36.980	-1.093*	32.055	-2.598*
2月	50.253	0.465	52.581	-0.109	46.230	-0.796	43.314	-3.556*
3月	53.608	0.123	54.484	0.040	48.874	-0.665	47.180	-4.610*
4月	45.099	0.068	45.948	0.410	40.547	-1.031	36.780	-5.206*
5月	18.067	-0.091	17.099	0.092	13.672	-0.504	11.730	-2.294*
11月	3.770	-0.118	2.938	-0.073	2.009	-0.119	1.368	-0.213
12月	21.526	0.221	20.498	-0.490	14.345	-0.543	11.535	-1.291

注: *代表达到95%置信度检验。
Note: * represents meeting the 95% confidence test.

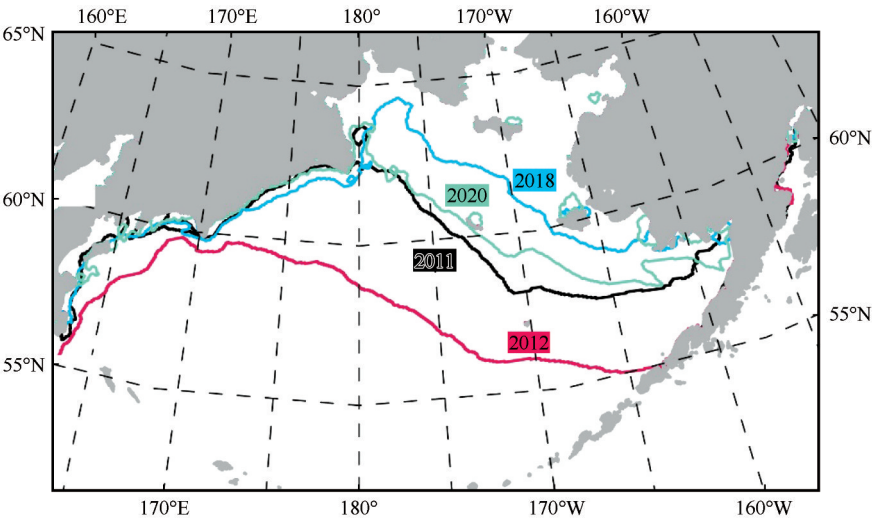


图2 2011年、2012年、2018年和2020年3月20日卫星观测获取的白令海海冰外缘线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sea ice edge in Bering Sea on March 20, 2011, 2012, 2018 and 2020

从时间序列上看,白令海最大海冰面积存在两个尺度变化特征:年际变化和年代际变化(图3)。1979—2000年间,白令海海冰范围主要表现为年际变化特征。在近20年来,白令海海冰转变为以年代际变化为主要特征^[8,31],具体表现为长时间的海冰面积正异常和夏季气温负异常(2006—2013年)与海冰面积负异常和夏季气温正异常(2002—2005年,2014—2020年)交替出现(图2和图3)^[13,29–30,32–33]。Wyllie-Echeverria 和 Wooster^[34]首次指出白令海陆架海域水文环境变化至少存在两个时间尺度:年际变化和多年际变化。Overland等^[32]研究了白令海大气和海洋环境的年代际变化特征。他们认为这种准十年的冷暖年变化可能与北极大范围增暖有关,不排除是随机出现而且不可预测。Yang等^[33]指出白令海海冰的十年变化始自2007年,是北太平洋环

流振荡(NPGO)和太平洋十年振荡(PDO)相位锁定产生的结果。Wang等^[8]指出白令海海冰的年代际变化可能起始于1994年,与向北的热量输送密切相关。从季节上看,海冰时间尺度演变过程始自1月的海冰面积增量。这种时间尺度演变过程也在一些水文和生态系统中出现,例如白令海东部陆架区春季表层水文和底层水温,冷池范围以及太平洋鳕鱼捕获量等(图3)。白令海海冰和气温的尺度演变特征与目前北极大范围海冰减少和“北极放大”是不一致的^[30,35–36]。

白令海海冰与鄂霍茨克海海冰存在显著的相关性。两个海域在季节内尺度上存在显著的反相关关系^[37–38]。Fang等^[39]指出在年际尺度上也存在显著的反相关关系。当白令海海冰面积为正异常时,鄂霍茨克海海冰为负异常。两个海域的反相关性

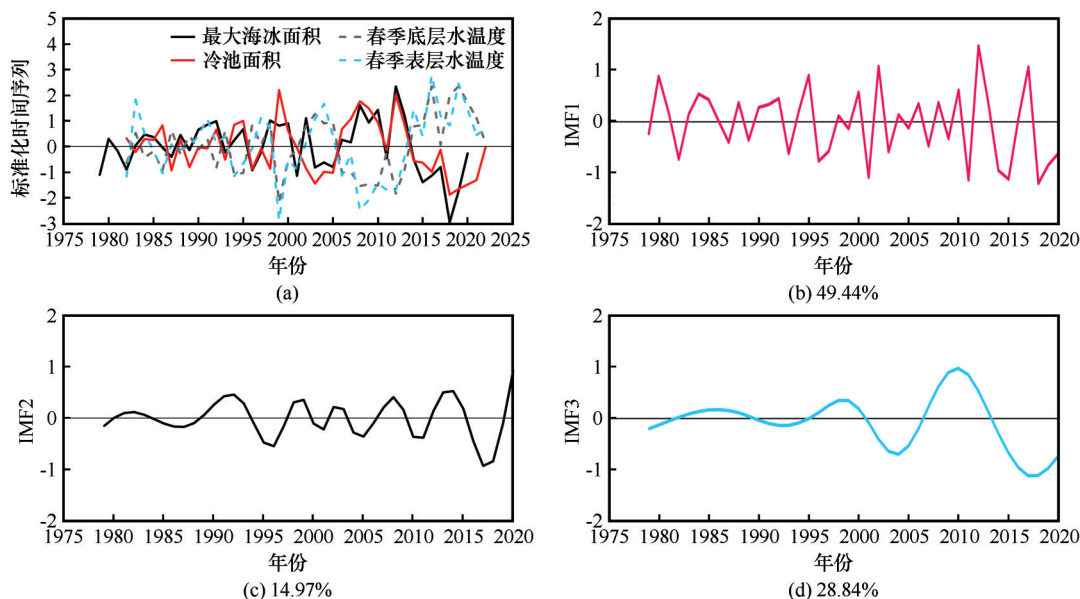


图3 标准化后白令海最大海冰面积的时间序列(黑实线)(a)及其经验模态分解后前3项序列IMF1(b)、IMF2(c)和IMF3(d): (a)中也包括标准化的冷池面积指数(红线)、白令海东部陆架区春季表层水平均温度(蓝虚线)和底层水平均温度(灰虚线)

Fig. 3 The standardization time series of the maximum sea ice area (a) in the Bering Sea and its first three Intrinsic Mode Function (IMF1~IMF3), (b), (c), (d) acquired by the Empirical Mode Decomposition approach. Panel (a) includes the standardized cold pool area index (red line), the spring average sea surface temperature (blue dotted line) and the bottom sea temperature (gray dotted line) of the eastern shelf area of the Bering Sea as well

关系与前一个月 500 hPa 西太平洋模态相关。也有研究认为北太平洋涛动-西太平洋模态(NPO-WP, 描述阿留申低压纬向移动的指数)是两个海区海冰发生“跷跷板”式变化特征的根本原因^[40]。不过,也有观测发现两个海区海冰有时候也呈同位相变化^[41-42]。通过 1979—2022 年 3 月海冰密集度数据提取白令海与鄂霍茨克海海冰的空间模态(图 4)。从中可以非常明显地分辨出第一模态为两个海区呈反位相变化关系,它的方差贡献率达到 0.31。而第二模态表现出两个海区呈同位相变化,其方差贡献率只有 0.17。可以认为白令海海冰与鄂霍茨克海海冰的空间模态以反位相特征为主。

白令海作为北冰洋的边缘海域,其海冰面积变化与北冰洋海冰面积存在巨大差别,甚至表现出完全相反的变化特征^[29-30, 43-45],例如,在 1979—2012 年间北冰洋的海冰面积表现出显著的减少趋势^[5, 44, 46-48],而白令海海冰面积和海冰覆盖范围在 1—4 月都展现出增大的趋势^[44]。在 2012 年,北冰洋夏季海冰面积达到历史极小值,而白令海冬季海冰面积达到历史极大值(图 1)^[12]。一些研究甚至指出,2007—2010 年北极海冰最小值和白令海东部海冰最大值的同时出现,表明北极夏季海冰最小值与随后白令海冬季/春季海冰最大值之间缺乏连续性

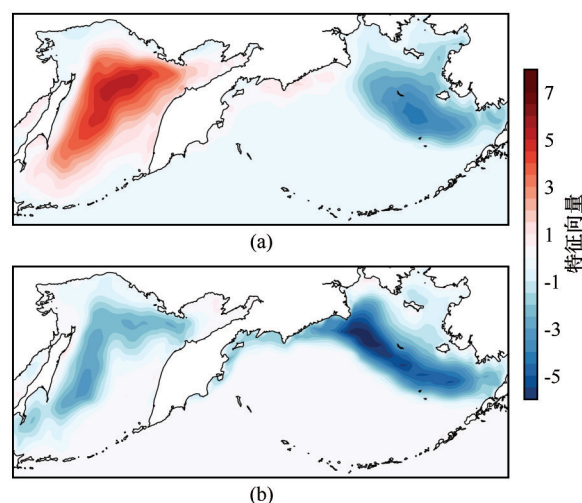


图4 1979—2022 年 3 月鄂霍茨克海和白令海海冰密集度的前两个空间模态:第一模态为两个海域海冰呈反位相变化,其方差贡献率为 0.31 (a);第二模态为两个海域海冰呈同位相变化,其方差贡献率为 0.17 (b)

Fig. 4 The first two spatial patterns of sea ice concentration in March. The regions of interest is the Sea of Okhotsk and Bering Sea. The EOF1 accounts for 0.31 (a) of variance, and the variance contribution of EOF2 is 0.17 (b)

或“脱钩”^[30, 35-36]。

此外,气候变暖也加剧了白令海海冰结冰日、融冰日以及融冰季长(相关定义参考文献[49])的变化。利用最新微波遥感反演数据计算 1979—

2021 年白令海融冰日、结冰日、融冰季长度及其趋势发现(图 5), 43 年平均融冰开始日期为 4 月 16 日, 结冰开始日期为 11 月 11 日。融冰季长度为 187 d。他们的趋势分别为每十年 -2.9 d、 5.7 d 和 8.6 d。

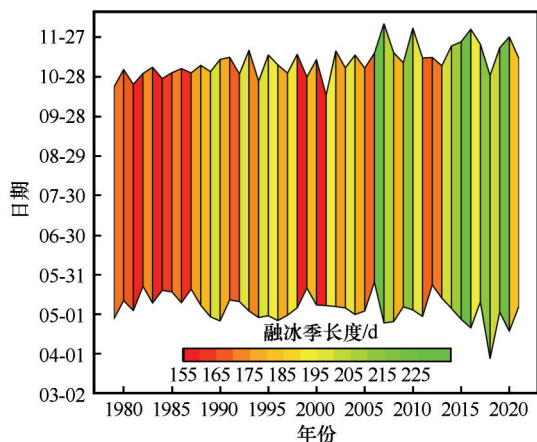


图 5 1979—2021 年白令海海冰融冰开始日 (Melt Onset, MO)、结冰开始日 (Freeze Onset, FO) 以及融冰期长度 (Melt Season Length, MSL) 的时间序列

Fig. 5 Time series of Melt Onset (MO), Freeze Onset (FO) and Melt Season Length (MSL) of sea ice in the Bering Sea from 1979 to 2021

1.2 白令海海冰的空间分布特征

白令海海冰在北风和东北风的作用下, 从 11 月至 3 月持续向南扩展。有的时候也在南部风暴的影

响下, 海冰又向北退却。利用经验模态分解方法提取 3 月份白令海海冰面积的空间分布特征, 得到前两个空间模态能够解释 52% 的海冰变化。它的第一模态 EOF1 (图 6) 主要表现为海冰在白令海大陆架南部发生剧烈变化, 与局地风场密切相关。第二模态 EOF2 主要表现为海冰在白令海东西方向上存在“跷跷板”式变化特征, 其产生的机制仍然不清楚。

1 月份海冰面积增量的前两个空间模态如图 7 所示。EOF1 和 EOF2 能够解释 1 月海冰面积增量中 60.58% 的方差^[8]。EOF1 主要展示了圣劳伦斯岛以南海域的海冰变化。而 EOF2 展示了圣劳伦斯岛周边海域, 包括其北部和阿纳德尔湾的海冰变化。从时间序列上看(图 8), PC1 展现了海冰多年变化特征。进一步利用经验模态分解可以发现(图 8), 它的 IMF1 表现出海冰年际变化特征, 能够解释 PC1 中 37.46% 的变化规律。IMF2 展示的是年代际变化特征, 它解释了 PC1 中 58.29% 的变化特征。我们认为, EOF1 的空间变化特征同时受年际变化信号和年代际信号的影响, 这与 Wang 等^[8]指出的 EOF1 与风场驱动北向热输送有关相一致。另外, PC2 主要表现的是年际变化特征, 它蕴含的多年变化信号较弱 (IMF2 只有 6.26% 方差贡献率), 这与它只受风场调控有关。

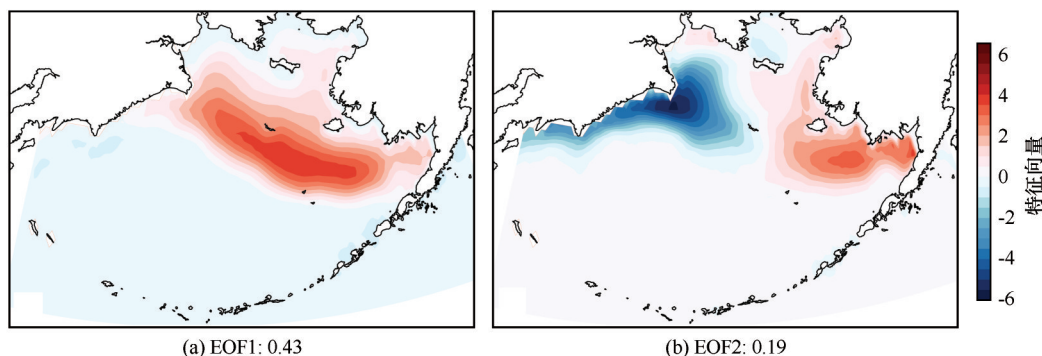


图 6 1979—2021 年 3 月白令海海冰面积前两个空间模态: EOF1 的方差贡献率为 0.43 (a); 而 EOF2 的方差贡献率 0.19 (b)

Fig. 6 The first two spatial patterns of the March SIA from 1979 to 2021. The variance contributions for EOF1 and EOF2 are 0.43 (a) and 0.19 (b), respectively

3 月份白令海 EOF1 海冰空间变化与图 7(a) 是一致的。另外, 12 月白令海海冰第一模态空间变化也与图 7(b) 一致的。这些相似的空间模态, 一方面是由于 1 月海冰面积增量是所有月份中最大的; 另一方面, 海冰推迟结冰产生前后月份空间模态特征一致。需要指出的是, 这种相似的空间模态, 他们的时间序列是不同的, 但其表现的时间变化特征是

相似的, 例如, 12 月白令海海冰 PC1 时间序列与 1 月海冰面积增量的 PC2 时间序列均为年际变化特征。这种相似性可能由共同的影响因子产生的。

1.3 白令海海冰变化的影响因子

自 20 世纪 70 年代以来, 人们普遍注意到白令海海冰面积异常与局地风场异常密切相关。最大海冰面积异常往往伴随着冬季白令海海域局地北

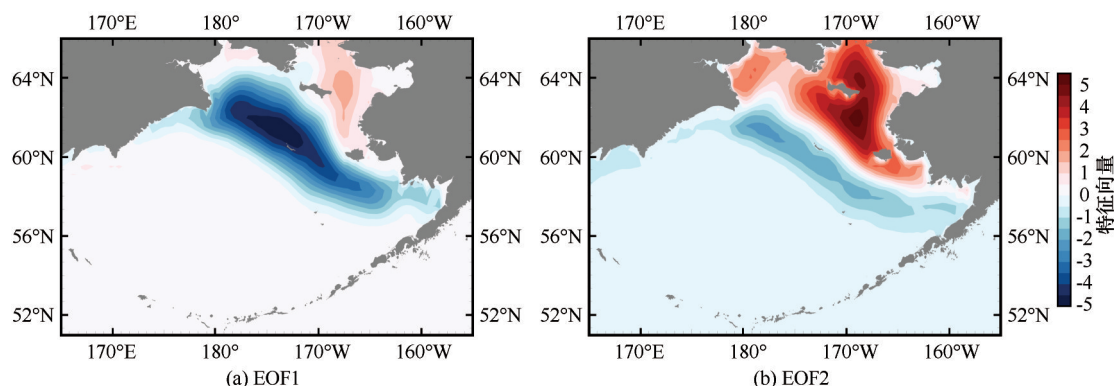
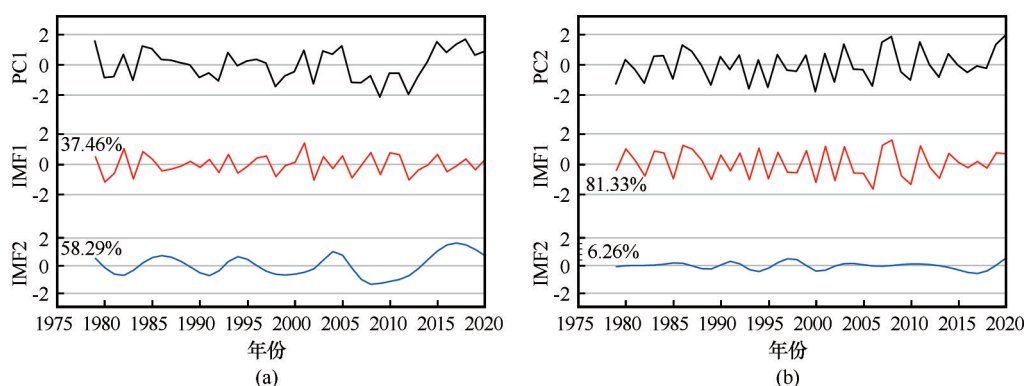
图7 1月海冰面积增量的EOF1 (a)和EOF2 (b)的空间分布^[8]Fig. 7 The spatial patterns of EOF1 (a) and EOF2 (b) of sea ice area increment in January^[8]

图8 PC1 (a)和PC2 (b)时间序列以及其经验模态分解后前2项时间序列

Fig. 8 The time series and its first two Intrinsic Mode Function (IMF1~IMF2) of PC1 (a) and PC2 (b)

风或东北风异常^[7,9,50-56]。也有研究认为提前1个月的1 000 hPa的局地风距平场影响着冬季、春季海冰(距平场)的变化,偏北或西北风异常增大海冰覆盖范围^[53]。在结冰初期(12月),海冰的年际变化是由11月异常风场驱动的向北的热量输送控制。相对于温度场异常,风场异常对12月海冰的影响更显著^[57]。白令海冬季风暴也能够影响白令海海冰变化^[7,58-59]。由于白令海冬季巨大的气压梯度导致局地风暴频发,每个月大概有3~5个风暴延阿留申群岛进入白令海布里斯托尔湾或阿拉斯加湾。相对风暴数量,风暴路径对白令海海冰范围影响更加明显^[59]。在冰面积较大的年份,阿留申低压往往位于白令海东南海域,减少了进入白令海的风暴数量;在冰面积较小的年份,大多数风暴向北移动至东西伯利亚沿岸一侧,导致海冰直接暴露在温暖潮湿的大气中。同时,巨大的风暴推动海冰向北堆积,关闭了冰间湖,从而减少了海冰产量^[58]。

阿留申低压是白令海冬季天气、气候变化重要的影响因素,通常位于阿留申群岛东侧[图9(a)]。它的气旋型风场有利于海冰向外扩展^[51,60-62]。描述

阿留申低气压总体强度的北太平洋指数(NPI)与白令海冰之间的相关系数并没有统计学意义^[58,63]。阿留申低压位置的变化比强度的变化对海冰范围的影响更重要^[63]。当阿留申低压中心偏东且加深的时候[图9(a)],低压范围大大增加,一方面引起白令海海冰向南扩展,另一方面可导致中纬度更多的热量输送到白令海东北部及北极其他地区^[60]。当阿留申低压中心偏向西[图9(c)],低压范围位于白令海西南部,在白令海东部产生异常南风,一方面驱动北太平洋暖而湿的空气向北输送进入白令海,不利于海冰生成,另一方面异常南风抑制了海冰拓展。在白令海海冰极大值年份,阿留申低压往往位于阿拉斯加湾以南[图9(b)]。白令海西北部受西伯利亚高压控制,在白令海上空存在异常的北风和东北风,能极大地促进白令海海冰的生成和向南拓展。

大尺度气候变化因子,例如太平洋十年涛动指数(PDO),太平洋-北美震荡指数(PNA),Hadley环流,南方涛动(ENSO)等,通过影响阿留申低压间接影响白令海海冰^[7,52]。PDO正(负)位相能加深(减

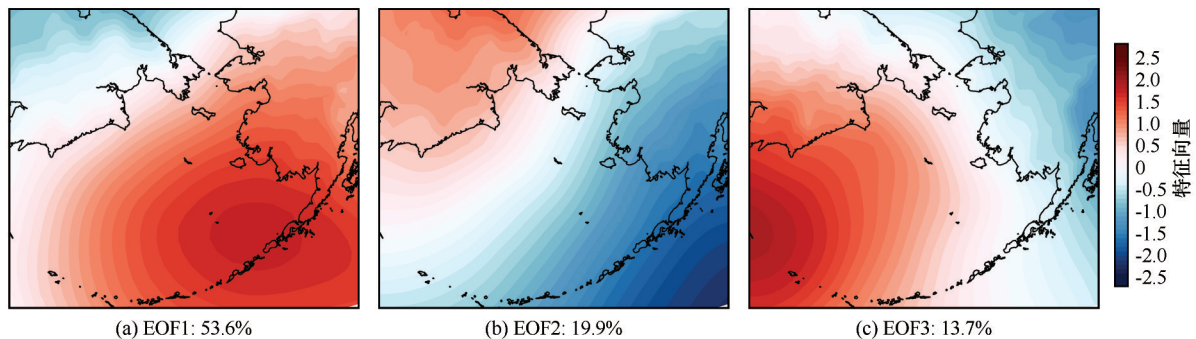


图9 利用EOF分析方法获得的冬季(12月—次年2月)海平面气压前三个主要模态: EOF1 (a), EOF2 (b)和 EOF3 (c)], 他们分别解释了 53.6%, 19.9% 和 13.7% 的方差。计算区域为 $50^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 220^{\circ}\text{W}$

Fig. 9 The first three spatial patterns [EOF1 (a), EOF2 (b) and EOF3 (c)] of the winter (from December to February) average sea level pressure. They explained the variances of 53.6%, 19.9%, and 13.7%, respectively.

The region of interest is $50^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 220^{\circ}\text{W}$

弱)阿留申低压,有(不)利于海冰向南扩展。正(负)的PNA指数意味着阿留申低压被加强(抑制)。在1956—1996年间,阿留申低压中心气压与PNA指数存在显著的负相关性^[64]。3—4月大尺度环流因子Hadley环流变化和白令海海冰异常变化也存在显著关联。当Hadley环流处于正(负)位相时,阿留申低压位置偏西(东),北太平洋东部盛行异常偏南(北)气流,白令海地区气温偏高(低)。这种大气环流条件和热力状况都不(有)利于白令海海冰的形成,因此白令海海冰面积减少(增加)^[24]。ENSO与阿留申低压间的关系研究始于20世纪60年代。在厄尔尼诺年冬季,阿留申低压中心较往年偏向东南,中心气压也较往年偏小2 hPa,有利于海冰向南输送。在拉尼娜年冬季,阿留申低压中心偏西,中心气压较往年偏高3 hPa,不利于海冰向南输送。Liu等^[65]给出了ENSO影响高纬度海冰变化的机制。他们指出,在El Niño (La Nina)年份,由于南北气温梯度增加(减小),加强(抑制)了东热带太平洋上空Hadley Cell,导致副热带急流向赤道方向(极向)转变,进而引起东北太平洋(东北美洲)风暴轴偏向赤道(北极)。风暴轴的改变影响局地Ferrel Cell。在El Niño (La Nina)年份,局地Ferrel Cell引起约 40°N 的表层大气向极(向赤道)输送,进而影响这个北极的气候系统^[66]。

通常将冬季白令海海冰产生过程类比为“输送带”(conveyor belt):海冰在北部冰间湖产生,在风场作用下向南输送,在南部海洋热量影响下发生消融^[50,67-69]。通过“输送带”机制可以基本解释白令海海冰南北变化特征。近10年的研究结果将“输送带”机制凝练成大气强迫和海洋强迫竞争关系:风

场强迫海冰向南输送,而海洋强迫抑制着海冰向南输送。研究指出大气和海洋强迫竞争决定了白令海海冰的面积大小^[43,50,69-70]。也有指出海冰在拓展过程中主要受大气强迫的作用,只在小的时间尺度上,受海洋强迫影响^[12]。最新的研究表明12月和1月海冰变化主要受提前1个月的海洋强迫调控^[8,57],海洋强迫对海冰面积的影响尺度可能比预期的更长。

由于冰边缘的冷却效应以及海冰生长/消融影响海洋的层结稳定性,因此很难在海洋热量输送和海冰范围之间建立因果关系,导致海洋强迫对海冰变化的影响研究相对偏少^[71-72]。已有研究尝试从模型中揭示大气与海洋强迫对白令海海冰面积的影响。Li等^[50]利用POP-CICE模拟1980—1989年白令海海冰变化,指出在整个白令海,季节性总海冰体积日变化率主要受热力学控制,而动力过程控制相对较少。Zhang等^[69]利用冰海耦合模型模拟了白令海1970—2008年海冰面积变化,指出白令海海冰面积的年际变化受风场驱动海冰向南输送和冰边缘热量锋共同控制。Zhang等^[73]指出动力和热力强迫对海冰的影响过程是相反的。Cheng等^[74]指出动力和热力强迫对冬季海冰生长率的影响在时空上是一致的。越来越多的证据表明,海洋强迫对白令海海冰面积年际变化的影响程度可能与大气强迫同等重要。Wang等^[8]研究发现1月海冰面积增加量并未与1月和12月北向风存在显著的相关关系,而是受12月大气调制的极向热量输送控制,从而产生年代际变化特征。海洋强迫对海冰影响的时间尺度等方面仍然需要深入研究。

随着观测手段的进步,尤其是光学遥感和微波

遥感海冰技术的大范围应用,人们也探讨了楚克奇海通过白令海峡向南的海冰输送^[5]、融冰日和结冰日变化、秋冬季海表面大气/海洋温度、Unimak 暖水输入等多种因子对白令海海冰的影响^[12,70]。这些因素在某些年份能够影响海冰,例如2013年的白令海峡向南的海冰输送,但不是白令海海冰变化的最重要控制因子。此外,前期海冰也可能通过大气和海洋反馈过程影响后期海冰的变化。最新的研究发现,虽然1月海冰面积增加量只占白令海最大海冰面积的36%,但是它的第一模态时间序列PC1与最大海冰面积的相关性达到-0.76^[8]。12月海冰面积与1月海冰面积增加量的第二模态的时间序列PC2的相关性达到-0.84^[57]。这些证据说明了海冰本身可能作为一个影响因子参与了对后期海冰的影响过程之中。针对这种前期海冰对后期海冰的影响机制的研究可能是未来海冰研究的重点方向之一。

2 白令海海冰对海洋、大气以及局地生态系统的影响

海冰大面积消融能够引起局地海域反照率降低(图10),致使海水吸收太阳辐射增多,增加的热能又能够消融更多的海冰,从而产生了显著的正反馈作用。海水吸收的热量一方面导致海水升温,另一方面能够增加水汽和云量,造成向下长波辐射增加明显,加强大气温室效应,致使底层大气温度升温^[75-76],形成“北极放大”^[77-78]。夏季海冰大范围消融是北极放大的至关重要因素之一^[77-81]。最新的研究发现北极放大是由海冰损失启动的,而水蒸气、二氧化碳等其他反馈机制只能帮助维持和增强北极放大,或通过海冰融化直接促进北极放大^[79]。海冰面积减少产生的大气温度升高能够进一步使边界层稳定性减弱,逆温层减弱,大气厚度(500~1 000 hPa)增加,对流层底气压升高,经向温度梯度减弱,从而影响大尺度环流特征^[26,75-76,82]。

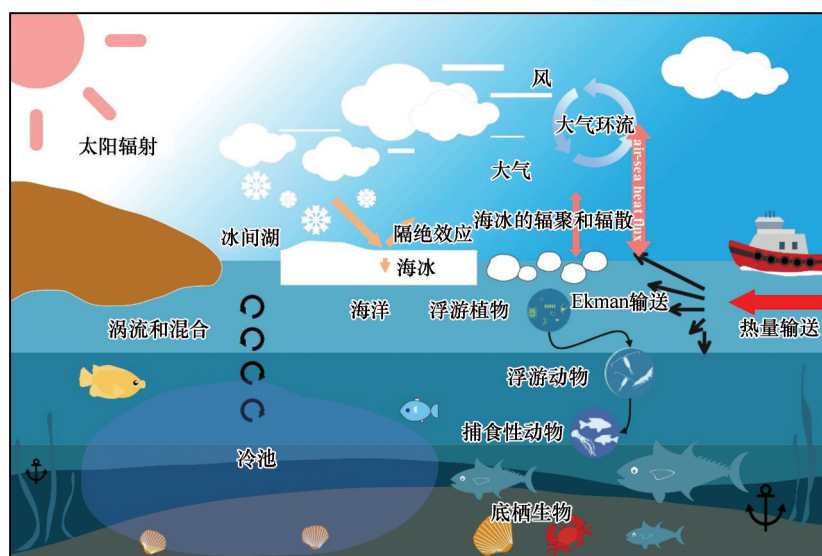


图10 白令海冰-气-海耦合以及对局地气候和生态系统的影响示意图

Fig. 10 schematic diagram of ice-air-sea coupling interaction in the Bering Sea and its impact on local climate and ecosystem

在海洋方面,白令海结冰过程形成的高浓度盐水有利于维持北冰洋盐跃层。经过计算发现维持北冰洋约10~40年更新时间需要1~2 Sv的盐水^[83-86]。Cavalieri等^[87]估计,白令海在内的北极所有冰间湖的盐水贡献约为0.9 Sv(0.7~1.2 Sv),其中白令海为北极盐跃层贡献了约6%的盐水,而为西北冰洋贡献了约10%的高密度盐水。近些年由于结冰面积的减少,通过白令海海峡向北输送至北冰洋的白令海海水正变得暖而淡^[88-89]。观测显示,

1990—2019年,白令海海峡向北水体输送是趋势增大的,达到 $(0.010 \pm 0.006) \text{ Sv} \cdot \text{a}^{-1}$,且年平均水温显著变暖 $[(0.05 \pm 0.02) ^\circ \text{C} \cdot \text{a}^{-1}]$ 。统计结果显示流入北冰洋的暖水($\geq 0 ^\circ \text{C}$)持续时间从5.5个月(20世纪90年代)增加到7个月以上(2017年)。由于白令海结冰面积减少,冬季白令海入流水在所有季节中盐度降低趋势最显著,达到 $0.03 \text{ psu} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由于盐度降低,使得太平洋冬季水(Pacific winter water)在北冰洋中的平均深度从100~150 m升至50~100 m^[88]。

通常情况下,白令海季节性海冰变化和冬季冰间湖冷却过程在陆架区形成低温的底层水(bottom water)^[29-30,32,90-91]。人们将底层水温度小于2℃的白令海陆架区称之为冷池(cold pool, CP)(图10)。由于春季表层暖水和海冰融化加深了海水层化,冷池可维持到整个夏季。研究发现冻结发生的析盐过程是产生CP的唯一途径,意味着CP的范围和分布在很大程度上受白令海冬季海冰范围的控制。已有观测发现,在重冰年份,CP能够延伸到布里斯托尔湾(Bristol Bay),而在轻冰年份,CP的拓展范围仅能够到达圣马修岛(St. Matthew Island)。近期的观测显示,2017年冬季白令海极端少冰导致2018年夏季白令海中东部陆架海域竟无法观察到CP的存在^[90]。由于低温的特征,CP的范围和分布对白令海生态系统结构影响巨大。底层水温度是决定白令海深海鱼类和一些中上层鱼类群落组成的主要气候因子。2017—2020年白令海冬季海冰面积极端减少事件,诸如石斑鳕(*Gadus Chalcogrammus*),太平洋鳕鱼(*Gadus macrocephalus*)、阿拉斯加鲱(*Pleuroctes Quadritu-berculatus*)等底栖鱼类在夏季月份发生向北迁徙,部分月份甚至会穿过白令海海峡到达楚克奇海,对白令海商业捕捞或生计捕捞活动造成巨大的影响^[13,19-20,92]。

白令海季节性海冰变化也对局地生态系统影响显著^[20,93-96]。在每年的5—6月,海冰大范围的消融和破裂导致进入海水的太阳辐射急剧增加,加之稳定分层的海水致使大量营养盐在表层汇集,最终形成季节性浮游植物水华。已有研究表明表层浮游植物爆发以及叶绿素a浓度的峰值与海冰消退起始日存在密切联系^[95-96]。随着近10年来海冰消融日的提前^[16,49,97],尽管海冰消融仍能使营养物质汇集在表层,但光照辐射不足以引发剧烈的水华现象,从而导致总体生产力降低。对于次级生产力浮游动物与春季浮游植物水华无密切联系,但是对水温比较敏感。海冰消融日的提前导致春季浮游植物水华产生在暖的开阔水中,充足的浮游植物导致浮游动物种群急剧增多,为幼虫和幼鱼提供了充足的食物,导致鱼类产量的增加。海冰消融日的退后导致春季浮游植物水华发生在冷的开阔水域。此时低温限制了浮游动物的生长,限制了幼虫/幼鱼的存活率,导致初级生产力直接进入底栖生态系统,极大促进了底栖生物的生长和繁殖^[96]。

3 白令海海冰对我国气候的影响

海冰通过调控大气动力和热力过程影响中低纬度地区气候变化^[26]。研究发现白令海海冰变化能够影响我国冬季风^[28,42],南部降水^[23,27]、东北部水汽聚集^[22]甚至东北粮食产量^[22,98-99]。由于海冰极端减少,造成东北亚地区在春末夏初形成极端低温,影响我国春耕播种^[23,98-99]。本文总结存在三条连接白令海与我国春夏季天气气候的大气动力途径:北太平洋涛动(NPO)、行星波和急流。北太平洋涛动观点认为冬季白令海海冰覆盖面积正异常加强了大气温度的经向梯度,进而加深阿留申低压,导致阿留申低压中心位置东移,并最终影响北太平洋涛动(NPO)。NPO通过海气相互作用影响北太平洋海表面温度,该过程能够持续到整个夏季。北太平洋正异常的SST减弱了极涡同时并加强西太平洋副热带高压,造成水汽在东北亚地区聚集^[22]。行星波观点认为白令海冬季海冰异常减少激发东传的罗斯贝波波列,在北大西洋中高纬度上空引起异常反气旋,并通过改变表面热通量形成三极形态的海表面温度异常场。三极形态的海表面温度异常场持续存在到夏季初,激发出新的罗斯贝波穿过整个欧亚大陆,在东北亚地区上加强了气旋式大气环流异常,导致东北亚春末夏初出现极端降温天气^[21]。急流观点认为冬季白令海海冰异常减少形成巨大的海气热通量加热了穿过白令海的“大气河”,暖空气向上运动,从而进一步加热上层大气,导致西风急流向北弯曲,从而在亚洲和美洲上空形成巨大的向南喷射通道,导致冷空气扩散到亚洲和北美南部地区^[100]。

东北亚地区气候的影响因子复杂多样,诸如蒙古高压、暖池、副热带高压甚至巴伦支-喀拉海海冰变化^[101-104],虽然白令海海冰变异与我国气候的联系已在观测中得到了证实,但是多种影响因子对东北亚地区气候影响的系统性研究仍不足。另外,从极端气候频次上看,1989—2012年中纬度地区的寒冷天气显著增多^[103,105-107],但在2012年之后中纬度地区的寒冷天气总体呈下降趋势^[108-109],这与白令海在2012年起海冰面积偏小并不一致。除了外部强迫因子,大气内部变异也是影响中纬度气候变化的重要因子,近些年来越来越多的研究支持大气内部变异主导中纬度气候变化^[110-111]。白令海海冰变化对我国气候的影响需要更细致的研究。

4 研究展望

白令海海冰变化影响着白令海大气、海洋、生态系统甚至气候变化,揭示它的变化规律、机制机理以及对全球气候变化的响应和影响,对了解北极快速变化乃至我国气候变化的影响尤为重要。通过上述综述发现,大多数研究主要集中在白令海最大海冰面积,对季节内海冰变化及其机理研究较少^[8,50]。由于海水流速观测数据缺失,暖平流对白令海海冰变化的影响研究仍然不足。此外,针对不同影响因子之间内在关联机制的综合研究仍然需要加强。作者认为需要加深对以下四个方面的科学问题的认识。

4.1 前期海冰对后期海冰的影响过程

异常的海冰通过改变海气热通量改变着大气环流。受影响的大气环流又转而影响海冰范围。这种冰-气-海耦合相互作用形成了一种冰-气/海-冰的闭环影响过程。研究发现,近20年来,白令海12月海冰面积与1月海冰面积增量第一模态的时间序列存在显著的负相关关系,相关系数达到-0.8,与第二模态的时间序列也存在显著的负相关关系,相关系数接近-1,意味着前期海冰对后期海冰存在显著的影响过程。以往的研究大多集中关注冰-气/海或气/海-冰的影响过程。由于局地大气对海冰的响应过程较迅速且具有强的非线性,研究人员大多采用模型研究冰-气/海的影响过程,针对冰-气/海-冰影响过程的研究也就更少。这里的冰-气/海-冰影响过程至少包含三方面内容:年际影响、区域影响以及季节内影响过程,这些内容都需要进行更加深入的研究。

4.2 风场对海冰的拖拽作用

实际中海冰并非沿着风向向前运动,而是与风向呈 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的夹角^[55,112-113]。另外,非均匀风场也会产生海冰堆积,不利于海冰辐散。例如,在白令海冬季,海冰边缘区在风场的作用常出现几公里到近百公里长的冰指(icy finger)^[114]。因为在计算海冰面积时,常剔除小于15%海冰密集度,意味着这些风场作用形成的新增海冰范围无法被计算在内。虽然在长的时间尺度,风场作用可能会与海冰面积呈显著的正相关性。但是,在短的时间尺度,例如12月,北向风场大小与海冰范围无显著的相关性^[8]。在季节内尺度上,需要重新认识风场对海冰的拖拽作用对海冰面积的影响。

4.3 暖平流影响海冰变化的时间尺度

在大西洋扇区巴伦支-喀拉海(BKS),显著的海冰变化受大气强迫和海洋强迫共同决定。观测研究表明BKS海冰异常与北大西洋扇区的反气旋异常密切相关。同时变暖的大西洋水(AW)通过巴伦支海开口(BSO)也加速了BKS海冰的减少^[115-118]。最新的研究结果表明BKS冬季海冰变化主要由大气过程而非海洋过程驱动^[119]。在太平洋扇区,由于白令海陆坡流非常缓慢,冬季大气环流常被认为是该海域冬季海洋环境年际变化的主要驱动力。海冰的年际变化常被认为是大气环流变化异常导致的^[7,63,120]。Wang等^[8]研究结果首次证明了海洋驱动的热量输送对1月海冰变化起决定作用。

大西洋扇区和太平洋扇区是北极海冰变化最显著的两个地方^[31],它们都表现出海洋强迫和大气强迫对海冰的巨大影响。在不同的结冰时期大气过程和海洋过程对海冰变化的影响程度可能不同。冬季海冰面积是前期大气过程和海洋过程累积效应的结果。大气过程,例如风场,对海冰的影响能够长时期积累,从而最终在海冰面积最大值的时间序列中发现大气影响的痕迹。而海洋过程,例如北向热输送,由于影响区域的不重叠性,例如12月海冰受白令海陆架北部北向流热输送的影响,而1月份海冰受白令海陆架西南部北向流热输送的影响^[8],可能最终无法在海冰面积最大值的时间序列找寻海洋影响的痕迹。如何研究和发现暖平流影响海冰变化的时间尺度对北极气候变化显得尤为重要。

4.4 海冰变化的时间尺度演变

近期白令海海冰面积变化存在从年际向年代际演变的过程。白令海海冰变化的时间尺度演变是北极气候发生显著改变的背景下产生的,不过其与北冰洋海冰面积加速减少和“北极放大”又存在本质差别。从已有的研究,例如Overland等^[91]和Wang等^[8],似乎能够看出全球变暖是导致海冰变化发生时间尺度演变的根本原因,但其影响过程,我们仍然知之甚少。由于缺少系统性的冰-气/海-冰的耦合过程研究,导致我们仍然不清楚海冰变化时间尺度演变发生的根本原因。随着全球增暖的加剧,未来白令海海冰是否还存在从十年变化向年际变化转变的可能?海冰变化是白令海大多数气候变化甚至生态系统变化的驱动因子,弄清它的变化规律对理解白令海环境变化至关重要。

5 结论

本文总结了近40年来白令海海冰的变化过程, 认识到当前白令海海冰面积正以前所未有的速度加速减少。尤其是近10年来, 白令海冬季最大海冰面积多次跌破卫星观测记录的历史极值点。与此同时, 海冰结冰日推迟, 融冰日提前以及融冰季时长增长成为常态。在海冰快速变化的影响之下, 局地水文、大气甚至生态系统正以前所未有的方式发生变化, 带来的改变已影响到当地人民生产和生活, 甚至影响到中纬度地区气候变化。文中总结由于观测资料稀少, 模型模拟海冰变化差异非常明显, 加上多圈层相互影响, 对白令海海冰变化和机制的研究仍然存在很多不足和争议, 例如, 暖平流对海冰的抑制作用被严重低估, 风场对海冰的拖拽作用需要被重新认识, 以及前期海冰对后期海冰的影响研究较少。未来需要加强对白令海海冰变化的监测, 发展高性能模式, 重点从大气强迫和海洋强迫共同作用角度展开科学研究, 同时结合多种分析手段, 系统分析白令海海冰变化及其机理。

致谢: 感谢江嫒女士对本文提出的宝贵意见。

参考文献(References):

- [1] Coachman L K, Aagaard K. On the water exchange through Bering Strait[J]. *Limnology and Oceanography*, 1966, 11(1): 44-59.
- [2] Woodgate R A, Aagaard K. Revising the Bering Strait freshwater flux into the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(2): 1-4.
- [3] 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): 1-5.
- [4] Woodgate R A, Weingartner T J, Lindsay R. Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(24): 2-7.
- [5] Babb D G, Galley R J, Asplin M G, et al. Multiyear sea ice export through the Bering Strait during winter 2011—2012[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(10): 5489-5503.
- [6] Woodgate R, Stafford K, Prah F. A synthesis of year-round interdisciplinary mooring measurements in the Bering Strait (1990—2014) and the RUSALCA years (2004—2011)[J]. *Oceanography*, 2015, 28(3): 46-67.
- [7] Niebauer H J, Bond N A, Yakunin L P, et al. An update on the climatology and sea ice of the Bering Sea [M]//Loughlin T R, K Ohtani, eds. *Dynamics of the Bering Sea*. Alaska, Fairbanks: University of Alaska Sea Grant, 1999: 33-34.
- [8] Wang Weibo, Su Jie, Jing Chunsheng, et al. The inhibition of warm advection on the southward expansion of sea ice during early winter in the Bering Sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9(September): 1-14.
- [9] Niebauer H J. Variability in Bering Sea ice cover as affected by a regime shift in the North Pacific in the period 1947—1996 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C12): 27717-27737.
- [10] Stabeno P J, Schumacher J D. The physical oceanography of the Bering Sea [M]//Loughlin T R, K Ohtani, eds. *Dynamics of the Bering Sea*. Alaska, Fairbanks: University of Alaska Sea Grant, 1999: 1-28.
- [11] Springer A M, McRoy C P, Flint M V. The Bering Sea Green Belt: shelf-edge processes and ecosystem production[J]. *Fisheries Oceanography*, 1996, 5(3/4): 205-223.
- [12] Stabeno P J, Bell S W. Extreme conditions in the Bering Sea (2017—2018): record-breaking low sea-ice extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(15): 8952-8959.
- [13] Stevenson D E, Lauth R R. Bottom trawl surveys in the northern Bering Sea indicate recent shifts in the distribution of marine species[J]. *Polar Biology*, 2019, 42(2): 407-421.
- [14] Kearney K A, Alexander M, Aydin K, et al. Seasonal predictability of sea ice and bottom temperature across the eastern Bering Sea shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(11): 1-21.
- [15] Grebmeier J M. Shifting patterns of life in the Pacific Arctic and sub-Arctic Seas[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 63-78.
- [16] Grebmeier J, Frey K, Cooper L, et al. Trends in benthic macrofaunal populations, seasonal sea ice persistence, and bottom water temperatures in the Bering Strait region[J]. *Oceanography*, 2018, 31(2): 136-151.
- [17] Grebmeier J M, Overland J E, Moore S E, et al. A major ecosystem shift in the northern Bering Sea[J]. *Science*, 2006, 311(5766): 1461-1464.
- [18] Frey K E, Moore G W K, Cooper L W, et al. Divergent patterns of recent sea ice cover across the Bering, Chukchi, and Beaufort seas of the Pacific Arctic Region [J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 136: 32-49.
- [19] O'Leary C A, Defilippo L B, Thorson J T, et al. Understanding transboundary stocks' availability by combining multiple fisheries-independent surveys and oceanographic conditions in spatiotemporal models[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2022, 79(4): 1063-1074.
- [20] Huntington H P, Danielson S L, Wiese F K, et al. Evidence suggests potential transformation of the Pacific Arctic ecosystem is underway[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(4): 342-348.
- [21] Ma Shuangmei, Zhu Congwen. The cooling over Northeast Asia in June over the most recent decade: a possible response to declining Bering Sea sea ice in March [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(6): e2022GL097773.
- [22] Zhou Mengzi, Wang Huijun. Late winter sea ice in the Bering Sea: predictor for maize and rice production in Northeast China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53(5): 1183-1192.
- [23] Zhao Ping, Zhang Xiangdong, Zhou Xiuji, et al. The sea ice extent anomaly in the North Pacific and its impact on the East Asian summer monsoon rainfall[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(17): 3434-3447.
- [24] Zhou Botao, Wang Huijun. Relationship between Hadley circulation and sea ice extent in the Bering Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(3): 444-449.
- [25] Iida M, Sugimoto S, Suga T. Severe cold winter in North

- America linked to Bering Sea ice loss[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(18): 8069-8085.
- [26] Vihma T. Effects of Arctic Sea ice decline on weather and climate: a review [J]. *Surveys in Geophysics*, 2014, 35(5): 1175-1214.
- [27] Wu Bingyi, Zhang Renhe, Wang Bin, et al. On the association between spring Arctic Sea ice concentration and Chinese summer rainfall[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(9): 2-7.
- [28] Li Fei, Wang Huijun. Relationship between Bering Sea ice cover and East Asian winter monsoon year-to-year variations[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30(1): 48-56.
- [29] Stabeno P J, Kachel N B, Moore S E, et al. Comparison of warm and cold years on the southeastern Bering Sea shelf and some implications for the ecosystem [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 65/66/67/68/69/70: 31-45.
- [30] Stabeno P J, Farley E V, Kachel N B, et al. A comparison of the physics of the northern and southern shelves of the eastern Bering Sea and some implications for the ecosystem[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 65/66/67/68/69/70: 14-30.
- [31] Zhao Jinping, Wang Weibo. Accumulation sea ice concentration and its action on understanding Arctic Sea ice dramatic change (in Chinese) [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 712-722.
- [32] Overland J E, Wang Muyin, Wood K R, et al. Recent Bering Sea warm and cold events in a 95-year context[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 65/66/67/68/69/70: 6-13.
- [33] Yang Xiaoyi, Wang Guihua, Keenlyside N. The Arctic Sea ice extent change connected to Pacific decadal variability[J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(2): 693-708.
- [34] Wyllie-Echeverria T, Wooster W S. Year-to-year variations in Bering Sea ice cover and some consequences for fish distributions[J]. *Fisheries Oceanography*, 1998, 7(2): 159-170.
- [35] de la Vega C, Jeffreys R M, Tuerena R, et al. Temporal and spatial trends in marine carbon isotopes in the Arctic Ocean and implications for food web studies[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(12): 4116-4130.
- [36] Chen Meixiang, Xiao Kai, Wang Qiang, et al. Low-frequency sea level variability and impact of recent sea ice decline on the sea level trend in the Arctic Ocean from a high-resolution simulation[J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70: 787-802.
- [37] Honda M, Yamazaki K, Nakamura H, et al. Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(12): 3347-3358.
- [38] Cavalieri D J, Parkinson C L. On the relationship between atmospheric circulation and the fluctuations in the sea ice extents of the Bering and Okhotsk Seas[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C7): 7141-7162.
- [39] Fang Z, Wallace J M. North-Pacific sea ice and kuroshio sst variability and its relation to the winter monsoon[J]. *Polar meteorology and glaciology*, 1998, 12: 58-67.
- [40] Sugimoto S, Hanawa K. Decadal and interdecadal variations of the Aleutian Low activity and their relation to upper oceanic variations over the North Pacific[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2009, 87(4): 601-614.
- [41] 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.
- [42] Liu Jiping, Zhang Zhanhai, Horton R M, et al. Variability of North Pacific sea ice and East Asia-North Pacific winter climate [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(10): 1991-2001.
- [43] Brown Z W, Arrigo K R. Contrasting trends in sea ice and primary production in the Bering Sea and Arctic Ocean[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2012, 69(7): 1180-1193.
- [44] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979—2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881-889.
- [45] Wu Renguang, Chen Zhang. An interdecadal increase in the spring Bering Sea ice cover in 2007[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2016, 4(March): 1-9.
- [46] Parkinson C L, DiGirolamo N E. Sea ice extents continue to set new records: Arctic, Antarctic, and global results [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 267(September): 112753.
- [47] Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, et al. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978—1996 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C9): 20837-20856.
- [48] Comiso J C, Meier W N, Gersten R. Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: results from different techniques[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(8): 6883-6900.
- [49] Markus T, Stroeve J C, Miller J. Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(12): 1-14.
- [50] Li Linghan, Miller A J, McClean J L, et al. Processes driving sea ice variability in the Bering Sea in an eddy ocean/sea ice model: anomalies from the mean seasonal cycle[J]. *Ocean Dynamics*, 2014, 64(12): 1693-1717.
- [51] Niebauer H J. Multiyear sea ice variability in the eastern Bering Sea: an update[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C5): 2733-2742.
- [52] Niebauer H J. Effects of El Nino-Southern Oscillation and North Pacific weather patterns on interannual variability in the subarctic Bering Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1988, 93(C5): 5051-5068.
- [53] Sasaki Y N, Minobe S. Seasonally dependent interannual variability of sea ice in the Bering Sea and its relation to atmospheric fluctuations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(5): 1-11.
- [54] Danielson S L, Weingartner T J, Hedstrom K S, et al. Coupled wind-forced controls of the Bering-Chukchi shelf circulation and the Bering Strait throughflow: Ekman transport, continental shelf waves, and variations of the Pacific-Arctic Sea surface height gradient [J]. *Progress in Oceanography*, 2014, 125: 40-61.
- [55] Thorndike A S, Colony R. Sea ice motion in response to geostrophic winds[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87(C8): 5845-5852.
- [56] Bintanja R, Selten F M. Future increases in Arctic precipitation linked to local evaporation and sea-ice retreat [J]. *Nature*, 2014, 509(7501): 479-482.
- [57] Wang Weibo, Jing Chunsheng, and Guo Xiaogang. Early Freeze-up over the Bering Sea controlled by Aleutian low anomaly[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15, 2232.
- [58] Rodionov S N, Bond N A, Overland J E. The Aleutian Low, storm tracks, and winter climate variability in the Bering Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(23/24/25/26): 2560-2577.
- [59] Smetacek V, Nicol S. Polar ocean ecosystems in a changing world[J]. *Nature*, 2005, 437(7057): 362-368.

- [60] Niebauer H J. Sea ice and temperature variability in the eastern Bering Sea and the relation to atmospheric fluctuations [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1980, 85 (C12): 7507-7515.
- [61] Luchin V, Menovshchikov V A, Lavrentiev V M, et al. Thermohaline structure and water masses in the Bering Sea [M]// Loughlin T R, K Ohtani, eds. *Dynamics of the Bering Sea*. Alaska, Fairbanks: University of Alaska Sea Grant, 1999(1942): 61-92.
- [62] Luchin V A, Semiletov I P, Weller G E. Changes in the Bering Sea region: Atmosphere-Ice-Water system in the second half of the twentieth century [J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 55 (1/2): 23-44.
- [63] Rodionov S N, Overland J E, Bond N A. The aleutian low and winter climatic conditions in the Bering Sea. Part I: classification [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(1): 160-177.
- [64] Overland J, Adams J, Bond N. Decadal variability of the aleutian low and its relation to high-latitude circulation [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(5): 1542-1548.
- [65] Liu Jiping, Curry J A, Hu Yongyun. Recent Arctic Sea ice variability: connections to the Arctic oscillation and the ENSO [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9): 2-5.
- [66] Liu Jiping, Yuan Xiaojun, Rind D, et al. Mechanism study of the ENSO and southern high latitude climate teleconnections [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(14): 8-11.
- [67] Pease C H. Eastern Bering Sea ice processes [J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(12): 2015-2023.
- [68] Overland J, Pease C. Cyclone climatology of the Bering Sea and its relation to sea ice extent [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(1): 5-13.
- [69] Zhang Jinlun, Woodgate R, Moritz R. Sea ice response to atmospheric and oceanic forcing in the Bering Sea [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(8): 1729-1747.
- [70] Stabeno P J, Bond N A, Salo S A. On the recent warming of the southeastern Bering Sea shelf [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(23/24/25/26): 2599-2618.
- [71] 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(15).
- [72] Bitz C M, Holland M M, Hunke E C, et al. Maintenance of the sea-ice edge [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(15): 2903-2921.
- [73] Zhang Jinlun, Rothrock D, Steele M. Recent changes in Arctic Sea ice: the interplay between ice dynamics and thermodynamics [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(17): 3099-3114.
- [74] Cheng Wei, Curchitser E, Ladd C, et al. Influences of sea ice on the Eastern Bering Sea: NCAR CESM simulations and comparison with observations [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2014, 109: 27-38.
- [75] Francis J A, Chan Weihang, Leathers D J, et al. Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic Sea ice extent [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7): 1-5.
- [76] Overland J E, Wang Muyin. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic Sea ice [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2010, 62(1): 1-9.
- [77] Rantanen M, Karpechko A Y, Lipponen A, et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 [J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 1-10.
- [78] Kim K Y, Hamlington B D, Na Hanna, et al. Mechanism of seasonal Arctic Sea ice evolution and Arctic amplification [J]. *Cryosphere*, 2016, 10(5): 2191-2202.
- [79] Dai Aiguo, Luo Dehai, Song Miron, et al. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂ [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-13.
- [80] Previdi M, Smith K L, Polvani L M. Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(9): 093003.
- [81] Cao Yunfeng, Liang Shunlin. Recent advances in driving mechanisms of the Arctic amplification: a review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(26): 2757-2771.
- [82] Dethloff K, Rinke A, Benkel A, et al. A dynamical link between the Arctic and the global climate system [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(3): L03703.
- [83] Aagaard K, Coachman L K, Carmack E. On the halocline of the Arctic Ocean [J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1981, 28(6): 529-545.
- [84] Björk G. A one-dimensional time-dependent model for the vertical stratification of the upper Arctic Ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19(1): 52-67.
- [85] Björk G. The vertical distribution of nutrients and oxygen 18 in the upper Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1990, 95(C9): 16025-16036.
- [86] Wallace D W R, Moore R M, Jones E P. Ventilation of the Arctic Ocean cold halocline: rates of diapycnal and isopycnal transport, oxygen utilization and primary production inferred using chlorofluoromethane distributions [J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1987, 34(12): 1957-1979.
- [87] Cavalieri D J, Martin S. The contribution of Alaskan, Siberian, and Canadian coastal polynyas to the cold halocline layer of the Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C9): 18343-18362.
- [88] A Woodgate R, Peralta-Ferriz C. Warming and freshening of the Pacific inflow to the Arctic from 1990—2019 implying dramatic shoaling in Pacific winter water ventilation of the Arctic water column [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(9): e2021GL092528.
- [89] Woodgate R A. Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data [J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 160: 124-154.
- [90] Clement Kinney J, Maslowski W, Osinski R, et al. On the variability of the Bering Sea Cold Pool and implications for the biophysical environment [J]. *PLoS One*, 2022, 17(4): 1-25.
- [91] Overland J E, Francis J A, Hanna E, et al. The recent shift in early summer Arctic atmospheric circulation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(July): 1-6.
- [92] Siddon E. Ecosystem status report 2021 eastern Bering Sea [R]. *Stock Assessment and Fishery Evaluation Report*, Alaska: North Pacific Fishery Management Council 2021 (December): 1-249.
- [93] Hunt G L, Yasumiishi E M, Eisner L B, et al. Climate warming and the loss of sea ice: the impact of sea-ice variability on the southeastern Bering Sea pelagic ecosystem [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2022, 79(3): 937-953.
- [94] Hunt Jr G L, Stabeno P, Walters G, et al. Climate change and control of the southeastern Bering Sea pelagic ecosystem [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*,

- 2002, 49(26): 5821-5853.
- [95] Brodeur R D, Decker M B, Ciannelli L, et al. Rise and fall of jellyfish in the eastern Bering Sea in relation to climate regime shifts[J]. *Progress in Oceanography*, 2008, 77(2/3): 103-111.
- [96] Hunt G L, Coyle K O, Eisner L B, et al. Climate impacts on eastern Bering Sea foodwebs: a synthesis of new data and an assessment of the Oscillating Control Hypothesis[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2011, 68(6): 1230-1243.
- [97] Grebmeier J M, Bluhm B A, Cooper L W, et al. Ecosystem characteristics and processes facilitating persistent macrobenthic biomass hotspots and associated benthivory in the Pacific Arctic [J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 136: 92-114.
- [98] Tian Yurun, Gao Yongqi, Guo Dong. The relationship between melt season sea ice over the Bering Sea and summer precipitation over mid-latitude East Asia[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(6): 918-930.
- [99] Tang Qihong, Zhang Xuejun, Francis J A. Extreme summer weather in northern mid-latitudes linked to a vanishing cryosphere[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(1): 45-50.
- [100] Tachibana Y, Komatsu K K, Alexeev V A, et al. Warm hole in Pacific Arctic Sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017-18[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 5567.
- [101] Li Xinxin, Wu Zhiwei, Li Yanjie. A link of China warming hiatus with the winter sea ice loss in Barents-Kara Seas[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(5): 2625-2642.
- [102] Sun Yue, Chen Haishan, Zhu Siguang, et al. Influence of the Eurasian spring snowmelt on summer land surface warming over Northeast Asia and its associated mechanism[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(12): 4851-4869.
- [103] Hong Xiaowei, Lu Riyu, Li Shuanglin. Amplified summer warming in Europe-West Asia and Northeast Asia after the mid-1990s [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(9): 094007.
- [104] Zhu Congwen, Wang Bin, Qian Weihong, et al. Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: a possible response to global warming [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(9): L09701.
- [105] Song Yanling, Linderholm H W, Yi Luo, et al. Climatic causes of maize production loss under global warming in Northeast China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7829.
- [106] Dong Buwen, Sutton R T, Chen Wei, et al. Abrupt summer warming and changes in temperature extremes over Northeast Asia since the mid-1990s: drivers and physical processes [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(9): 1005-1023.
- [107] Chen Wei, Lu Riyu. A decadal shift of summer surface air temperature over Northeast Asia around the mid-1990s [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(4): 735-742.
- [108] Blackport R, Screen J A. Weakened evidence for mid-latitude impacts of Arctic warming[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(12): 1065-1066.
- [109] Cai Ziyi, You Qinglong, Chen Deliang, et al. Review of changes and impacts of the cryosphere under the background of rapid Arctic warming[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(3): 902-916. [蔡子怡, 游庆龙, 陈德亮, 等. 北极快速增暖背景下冰冻圈变化及其影响研究综述[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(3): 902-916.]
- [110] Dodd E M A, Merchant C J, Rayner N A, et al. An investigation into the impact of using various techniques to estimate Arctic surface air temperature anomalies [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(5): 1743-1763.
- [111] Sun Lantao, Perlwitz J, Hoerling M. What caused the recent "Warm Arctic, Cold Continents" trend pattern in winter temperatures? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(10): 5345-5352.
- [112] Reynolds M, Pease C H, Overland J E. Ice drift and regional meteorology in the southern Bering Sea: results from MIZEX West[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1985, 90(C6): 11967-11981.
- [113] Colony R, Thorndike A S. An estimate of the mean field of Arctic Sea ice motion [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1984, 89(C6): 10623-10629.
- [114] Wang Weibo, Su Jie. Sea ice edge automatic retrieval based on morphology [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2015, 19(6): 983-997.
- [115] Luo Binhe, Luo Dehai, Ge Yao, et al. Origins of Barents-Kara Sea-ice interannual variability modulated by the Atlantic pathway of El Niño-Southern Oscillation [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1-13.
- [116] Desbruyères D, Chafik L, Maze G. A shift in the ocean circulation has warmed the subpolar North Atlantic Ocean since 2016 [J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 1-9.
- [117] Årthun M, Eldevik T, Smedsrud L H, et al. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(13): 4736-4743.
- [118] Docquier D, Fuentes-Franco R, Koenigk T, et al. Sea ice-Ocean interactions in the Barents Sea modeled at different resolutions[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8(May): 1-21.
- [119] Liu Zhongfang, Risi C, Codron F, et al. Atmospheric forcing dominates winter Barents-Kara sea ice variability on interannual to decadal time scales [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(36): 1-7.
- [120] Stabeno P J, Bond N A, Kachel N B, et al. On the temporal variability of the physical environment over the south-eastern Bering Sea [J]. *Fisheries Oceanography*, 2001, 10(1): 81-98.

The change and influence of sea ice over Bering Sea : a review

WANG Weibo^{1,2}, ZHANG Junpeng^{1,2}, JIA Cun^{1,2}, ZHANG Xiaobo³

(1. Ocean Dynamic Laboratory, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, Fujian, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005, Fujian, China;

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, Guangdong, China)

Abstract: The Bering Sea is a marginal sea of the Arctic Ocean, and its sea ice changes differ considerably from other marginal seas. The sea ice area (SIA) in the Bering Sea has shrunk significantly over the last decade, affecting regional hydrology, the atmosphere, and even the ecosystem, as well as the mid-latitude and our national climate systems. Lots of efforts have been conducted in the temporal and spatial characteristics of sea ice based on satellite observation, simulation, diagnostic analyses, and so on. The recent changes in sea ice in the Bering Sea are proposed, as well as the impact factors of sea ice changes. Simultaneously, the effects of Bering Sea ice changes on hydrology, atmosphere, ecosystems, and the mid-latitude climate system are summarized. According to a comprehensive review of current studies, the understanding of the mechanism of sea ice change on an intraseasonal time scale is still insufficient due to the limitation of current study approaches and observation data on seawater current, as well as a lack of systematic analysis to explore the causal relationship. It is also stated that more research on the impact of early sea ice on later sea ice, the drag effect of wind field on sea ice, the time scale of the effect of warm advection on sea ice, and the time-scale evolution of sea ice change is required.

Key words: Bering Sea; sea ice change; impact factors; ecosystem response

(责任编辑：杨清华)