

田忠翔, 孙虎林, 李志强, 等. 影响夏季北极航道航行的近地面气象要素时空变化特征分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(11): 12–30, doi:10.12284/hyxb2022133

Tian Zhongxiang, Sun Hulin, Li Zhiqiang, et al. Analysis on the characteristics of the temporal and spatial variation of near-surface meteorological parameters affecting the navigation in Arctic passage in summer[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(11): 12–30, doi:10.12284/hyxb2022133

影响夏季北极航道航行的近地面气象要素时空变化特征分析

田忠翔¹, 孙虎林^{1*}, 李志强¹, 宋晓姜¹, 孟上¹, 陈志昆¹, 李敏¹, 李丙瑞²

(1. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 2. 中国极地研究中心, 上海 200136)

摘要: 本文利用 ERA5 再分析数据和我国北极科学考察期间获取的走航气象观测数据, 分析了夏季影响船舶通航北极航道的关键近地面气象要素的时空变化特征。结果表明, 7–8 月的天气条件最适宜船舶在北极航道航行, 9 月低温、大风和大浪天气显著增多, 对船舶航行影响较大, 10 月的天气更加恶劣, 对船舶航行的挑战更大。低温天气主要出现在各航道的中段, 大风和大浪天气集中在航道两端的海域。除北极中心区和 10 月的挪威海和巴伦支海以外, 其余时间的海域出现大风和大浪天气的概率以增加趋势为主, 但具有较大的年际变化。根据现有北极航道气象观测数据分析发现, 东北航道能见度最差, 西北航道能见度最好, 中央航道居中。

关键词: 北极航道; 气温; 风速; 有效波高; 能见度

中图分类号: P732.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)11-0012-19

1 引言

北极海冰范围自 1979 至今呈现明显的减少趋势^[1-2], 其中夏季和秋季的减少速率最大^[3]。进入 21 世纪后, 北极海冰更是呈现快速减少的趋势^[4], 受北极偶极子(AD)和强气旋的影响, 海冰面积多次出现极小值^[5], 同时北极中央区也出现了海冰低密集度现象^[6]。北极海冰厚度和体积也呈减小趋势, 而且海冰体积的减小多归因于多年冰的减少^[7-8]。另外, 越来越多的研究发现北极海冰融化季节增长, 而冻结时间缩短, 尤其是北极边缘海区域^[9-12]。整个北极海冰的融化开始时间以 3 d/(10 a) 的速度提前, 冻结开始时间以 6 d/(10 a) 的速度延后^[13]。

海冰的快速减少和变薄为北极航道的开通提供了有利条件, 使得北极商业航行成为可能。北极航道

包括东北航道、西北航道和中央航道(图 1)。东北航道自白令海峡向西, 沿俄罗斯北部, 经过楚科奇海、东西伯利亚海、拉普捷夫海、喀拉海、巴伦支海和挪威海, 抵达挪威北角。东北航道的通航时间具有明显的年际变化^[14-16]。结合 1979–2018 年海冰密集度和海冰厚度研究发现, 对于普通商船来说, 21 世纪 10 年代的东北航道的通航窗口期位于 7 月下旬至 10 月下旬, 通航窗口长达(92±15) d, 而且呈现为(2.72±0.58) d/a 的增长趋势^[17]。西北航道西起白令海峡, 经波弗特海, 穿过加拿大群岛之间的海峡, 抵达格陵兰岛西侧的巴芬湾。2002–2013 年间, 西北航道全线开通的时间主要集中在 8 月中上旬至 10 月上旬, 且具有很强的年际变化^[14, 16]。进一步联合海冰厚度的分布变化, 发现 2010 年代普通商船的通航窗口期为 8 月上旬至 10 月中旬, 通航窗口期从 20 世纪 80 年代的(11±10) d

收稿日期: 2021-12-14; 修订日期: 2022-05-28。

基金项目: 国家重点研究计划课题(2018YFA0605902)。

作者简介: 田忠翔(1986—), 男, 山东省成武县人, 主要从事极地海冰和大气研究。E-mail: tianzx@nmefc.cn

* 通信作者: 孙虎林, 男, 高级工程师, 主要从事极地大气研究。E-mail: shl@nmefc.cn

延长到了 21 世纪 10 年代的 (77 ± 17) d, 并以 (2.15 ± 0.58) d/a 的速度增加^[17]。模拟结果显示, 如果 21 世纪中叶全球地面气温升高幅度达到 2°C , 西北航道的通航率可以达到 100%^[18]。中央航道为高纬航线, 东起白令海峡, 一直向北, 经高纬海域后, 到达斯瓦尔巴群岛, 可以抵达挪威北角或冰岛。2009–2016 年 6–9

月, 北极中央区的海冰发生了 6 次低密集度事件^[6], 使船舶穿越中央航道成为可能。基于 CMIP6 的多模式集合结果发现, 在不同的增暖情景下, 最近几十年, 所有类型船舶通航北极航道的的时间呈增加趋势, 而且在 SSP5–8.5 增暖情景下, PC6 级船可在 21 世纪 70 年代实现全年通航^[19–22]。

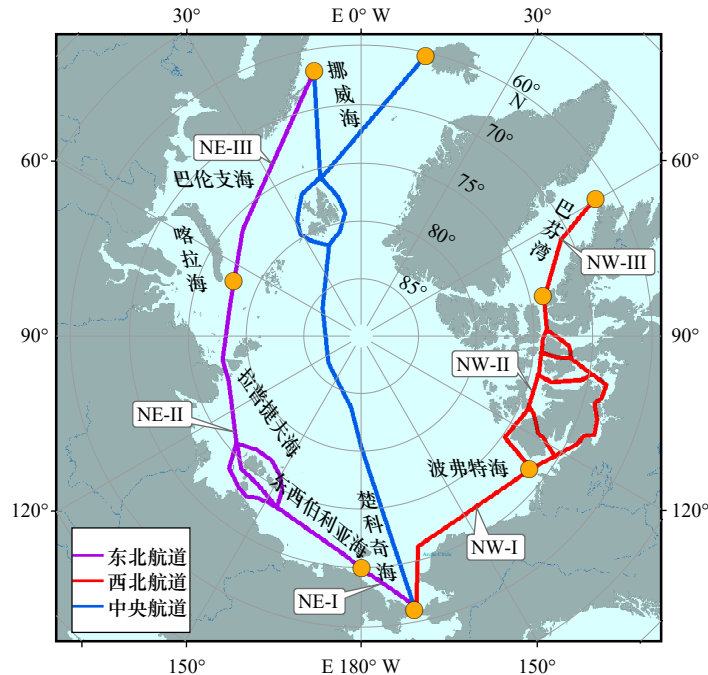


图 1 北极东北航道(紫色实线)、西北航道(红色实线)和中央航道(蓝色实线)

Fig. 1 Arctic northeast passage (purple solid line), northwest passage (red solid line) and trans-Arctic passage (blue solid line)

NE-I、NE-II 和 NE-III 分别为北极东北航道的 3 个航段, NW-I、NW-II 和 NW-III 分别为北极西北航道的 3 个航段, 橙色圆点表示相应航段的起止点

NE-I, NE-II and NE-III denote the three segments of the Arctic northeast passage, respectively. NW-I, NW-II and NW-III denote the three segments of the Arctic northwest passage, respectively. The orange dots denote the starting and ending locations of the corresponding segments of the three passages

北极海洋环境保护工作组(PAME)统计了 2013–2019 年北极航运总体变化趋势, 发现 2019 年进入北极区域的船舶总数比 2013 年增加了 25%, 总航行里程增加了 75%, 其中散货船的里程增加了 160%^[23]。在国家海洋环境预报中心的大力保障下, 我国中远海特运集团自 2013 年首次穿越东北航道, 至 2021 年共有 56 艘次穿越东北航道。这说明北极航道的商业航行处于快速兴盛时期, 另一方面, 这也对北极气象、海冰和海洋的观测、预报提出了更高的要求。北极航道的地理位置和环境比较特殊, 影响船舶航行的主要因素包括海冰、低温、大风和大浪, 以及频繁出现的海雾^[24]。目前, 利用海冰资料进行北极航道, 尤其是东北航道和西北航道适航性分析的报道较多^[14–22]。虽然海冰是制约北极航道通航的重要因素之一, 但随着北极海冰的快速减少, 其影响程度逐渐减小, 尤其

是对于 PC6 以上级别的船舶^[17]。但随着北极开阔水域的增多, 低温、强风、大浪和海雾等气象因子对船舶航行的影响程度却在逐渐增加, 因此, 北极航道区域的气象要素变化特征应该得到更多关注。北极海域的强风通常是由极地气旋引起的, 强风不仅会促使开阔水域形成大浪, 还会使海冰快速漂移, 给船舶航行安全带来巨大隐患。然而, 由于北极原位观测数据非常匮乏, 导致北极气旋的预报水平低于中纬度的预报水平^[25]。另外, 虽然全球的预报机构都可以使用全球通信系统(GTS)的观测数据, 但是不同的大气预报模式对观测数据的同化方案不同, 使不同预报系统的初始场产生差异, 最终导致气旋的预报水平不同^[26]。我国国家海洋环境预报中心于 2011 年基于 Polar WRF 极地中尺度数值大气模式和 3DVAR 资料同化方法建立了业务化北极数值天气预报系统, 最高水平

分辨率为 3.3 km^[27]。2021 年,国家海洋环境预报中心基于 MITgcm 冰-海耦合数值预报模式和 Polar WRF 极地中尺度数值大气模式建立了北极区域气-冰-海全耦合数值预报系统(ArcIOAM),显著提高了北极海冰和大气的预报能力^[28]。虽然我国的北极大气预报系统已经在北极科考船和商船的航行安全保障中发挥了重要作用^[27],但仍然具有一定的提高空间,尤其对于北极航道这种局地尺度的海域。与国外的极地数值预报相比,我国的数值预报系统面临的难题更多,主要包括精细化地形数据和高质量同化数据的获取。精细化地形数据对于航道区域的预报至关重要,尤其是在具有众多岛屿和海峡的西北航道。高质量的同化数据包括准确的卫星观测数据、船舶的实测数据、浮标数据、近岸的自动气象站数据以及探空数据等。这两个主要问题会大大限制我国北极数值天气预报水平的提高^[29-31]。

我国自 1999 年至 2022 年已经开展了 12 次北极科学考察,其中第 5 次北极科学考察返程和第 8 次北极科学考察去程期间穿越了中央航道,第 5 次北极科学考察去程时穿越了东北航道,第 8 次北极科学考察返程时穿越了西北航道(图 2),获取了宝贵的夏季北极航道区域气象观测数据。除了这两个航次,以及第 1、10 和 12 次北极科学考察,其余 7 次常规科学考察主要集中于北极太平洋扇区,其中 70°N 以北海域为中央航道在太平洋一侧的重要航段,积累了中央航道太平洋扇区的大量现场气象资料。因此,本文首次

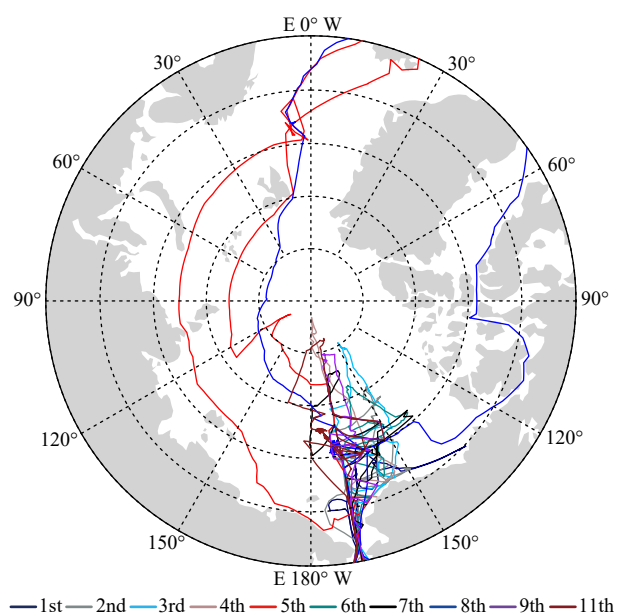


图 2 我国部分北极考察航次航迹
Fig. 2 Track maps of some of Chinese Arctic research expeditions

综合利用大气再分析数据和我国北极科学考察积累的大量现场气象数据,分析各航道影响船舶航行的近地面气象要素时空变化特征,一方面,从近地面气象要素角度对夏季北极航道的适航性进行分析评估,以期对船舶未来在北极航行提供一定的指导参考,另一方面,对实测数据的统计分析也可以为北极大气数值模式的验证和改进提供一定的支撑。

2 数据

2.1 走航气象观测数据

我国北极科学考察的走航气象观测主要包括走航连续观测和人工正点观测。走航连续观测依托船载自动气象站开展,观测的气象要素包括风向、风速、气压、气温、相对湿度和能见度等。人工正点观测是随船气象人员按照国标《海洋调查规范 第 3 部分:海洋气象调查》(GB/T 12763.3-2007)^[32]和有关规范、技术规程的要求,在每日世界时(UTC)00 时、06 时、12 时和 18 时中的 3~4 个时次进行整点气象观测,记录船载自动气象站在整点时刻获取的海平面气压、气温、露点温度、相对湿度、风向、风速等数据,并进行能见度、天气现象、云量云状、涌浪等的人工观测。

我国第 1~9 次北极科学考察依托“雪龙”号开展。“雪龙”号极地科考船在 2002 年安装了 Vaisala MILOS500 自动气象站,其主要传感器均为 Vaisala 公司生产,包括 HMP45D 温湿度传感器、PTB210 气压传感器和 WMS301 风向风速传感器,各传感器在 2005 年进行过更换。2013 年“雪龙”号船载自动气象站更换为基于美国坎贝尔公司 CR3000 数采器的天诺自动气象站,其主要传感器包括 Vaisala HMP155 温湿度传感器和 PTB110 气压传感器、美国 RM YOUNG 05108 机械风传感器和 Campbell CS120 能见度仪。第 11 次北极科学考察依托“雪龙 2”号开展,其安装有 Vaisala HMS(Helideck Monitoring System)自动气象站,主要传感器均为 Vaisala 公司生产,包括 HMP155 温湿度传感器、PTB330 气压传感器、WAA252 风速传感器、WAV252 风向传感器、WMT700 超声风传感器和 PWD22 能见度仪,各传感器安装时间为 2019 年 6 月。

Vaisala MILOS500、天诺 CR3000 和 Vaisala HMS 船载自动气象站各传感器的性能指标均符合 WMO CIMO 指南 VI^[33]和《海洋调查规范 第 3 部分:海洋气象调查》(GB/T 12763.3-2007)^[32]中对自动气象观测仪器准确度和性能的要求。早期针对 Vaisala MILOS500

自动气象站,每年会携带足够准确的标准仪器对主要传感器进行现场比对,后来随着对极地观测数据质量的进一步重视,更换为天诺 CR3000 自动气象站后每年都会对温湿度、气压、风向风速传感器进行拆除并送到专门机构进行标定。航次期间还会对自动气象站运行状况及故障情况进行较详细的记录,航次结束后会对出现故障的传感器进行检修或更换,以保证观测数据的准确性。

本研究过程中使用的观测数据主要为人工正点观测数据,为保证所使用的走航气象观测数据的真实准确,在数据处理阶段也进行了较为严格的质量控制,主要包括剔除超过气候极值的异常数据、数据时间连续性检查、数据时间变化性检查及数据记录格式错误更正等。

2.2 再分析数据

由于走航观测获取的数据时间跨度有限,为了获取影响北极航行的关键近地面气象要素在整个夏季的空间分布及其变化,本文使用了 ERA5 再分析数据中的 2 m 气温、10 m 风速和有效波高^[34]。ERA5 由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布,是其第五代再分析数据。ERA5 使用了比较先进的四维变分(4D-Var)同化技术,模式从地面至大气层顶 0.01 hPa 共分为 137 层,空间分辨率约为 31 km。ERA5 可以提供逐小时的再分析数据,大气和海洋参数的空间分辨率分别为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 和 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。本文使用的是 1979–2020 年 7–10 月的逐 6 h 数据。

3 结果分析

本文首先利用大气再分析数据分析了夏季影响船舶通航北极航道的关键近地面气象要素的气候态时空分布变化特征和重点海域的年度变化特征,然后基于我国北极科学考察获取的走航气象观测数据进行个例分析,获取特定年份的北极东北航道、西北航道和中央航道的常规地面气象要素特征。

3.1 气候态时空分布特征

根据 2 m 气温、10 m 风速和有效波高的空间分布,本文将东北航道分为 3 个航段(图 1),即白令海峡–楚科奇海(NE-I)、东西伯利亚海–拉普捷夫海–喀拉海(NE-II)和巴伦支海–挪威海(NE-III),将西北航道也分为 3 个航段(图 1),即白令海峡–波弗特海(NW-I)、加拿大群岛(NW-II)和巴芬湾(NW-III)。NE-II 航段可能存在浮冰和流冰,在该航段恶劣天气对船舶的影响可能更大,是东北航道中的关键航段。对于西北航道,NW-II 航段几乎常年有多年冰存在,

是最为关键的航段。

3.1.1 2 m 气温

北极海冰范围在 9 月份达到最小值,7–8 月处于快速融化期。图 3a、图 3d、图 3g 和图 3j 分别给出了 1979–2020 年 7–10 月平均 2 m 气温的分布形式。根据 2 m 气温的气候态月平均分布形式,8 月份北极气温最高,7 月份略低于 8 月份。为了进一步分析各月份低温天气的影响,本文定义低温天气概率为当月所有低温日的占比,并进行统计分析。由于海水的结冰温度约为 -1.8°C ,本文选取 -1.8°C 作为低温天气的阈值。只要当日有一个时次的 2 m 气温低于 -1.8°C ,则记该日为低温日。图 3b、图 3e、图 3h 和图 3k 分别给出了 1979–2020 年 7–10 月平均低温天气概率分布。图 3c、图 3f、图 3i 和图 3l 分别给出了 1979–2020 年 7–10 月低温天气概率变化趋势。

7–10 月,东北航道 3 个航段中,NE-III 航段气温最高,NE-I 航段次之,NE-II 航段最低。7–8 月,NE-II 航段的平均气温可以达到 0°C 以上,低温天气概率小于 10%。然而,9 月份该航段的平均气温在 $-2\sim 1^{\circ}\text{C}$,表现为俄罗斯沿岸海域的气温较高,可以达到 0°C 以上,而远离陆地的海域气温较低。此时的低温天气概率也有同样的分布形式,近岸为 10%~40%,远离陆地可达到 50%~70%。值得注意的是,维利基茨基海峡虽然邻近大陆,但该区域 9 月的平均气温已经下降到 $-3\sim -2^{\circ}\text{C}$,低温天气概率达到 60%。10 月,整个 NE-II 航段的平均气温下降至 -2°C 以下,最低可达 -10°C ,大部分海域低温天气概率达到 90% 以上。对于 NE-I 和 NE-III 航段的平均气温均表现为随纬度的降低而增加,7–9 月的平均气温均在 0°C 以上,而 10 月,仅北部小部分海域的平均气温在 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$ 。NE-I 和 NE-III 航段北部在 10 月份的低温天气概率最高达到 70%,其他月份的低温天气概率均在 30% 以下。在全球变暖的大背景下,整个东北航道 7–10 月的低温天气概率都呈显著的减小趋势,这与北极放大效应也是一致的。其中,9 月的 NE-II 航段和 10 月的 NE-I 航段的低温天气概率是全北极减小最快的海域,减小速率高达 25%/(10 a)。

西北航道平均气温的整体变化趋势与东北航道类似,即 NW-III 航段气温最高,NW-I 航段次之,NW-II 航段最低。NW-II 航段在 7–8 月的平均气温可以达到 $0\sim 2^{\circ}\text{C}$,低温天气概率为 0;9 月下降至 -3°C 左右,低温天气概率达到 60%~80%;10 月进一步下降至 -10°C 以下,低温天气概率达到 95% 以上。NW-I 航段表现为靠近陆地气温较高,7–8 月近岸的平均气温

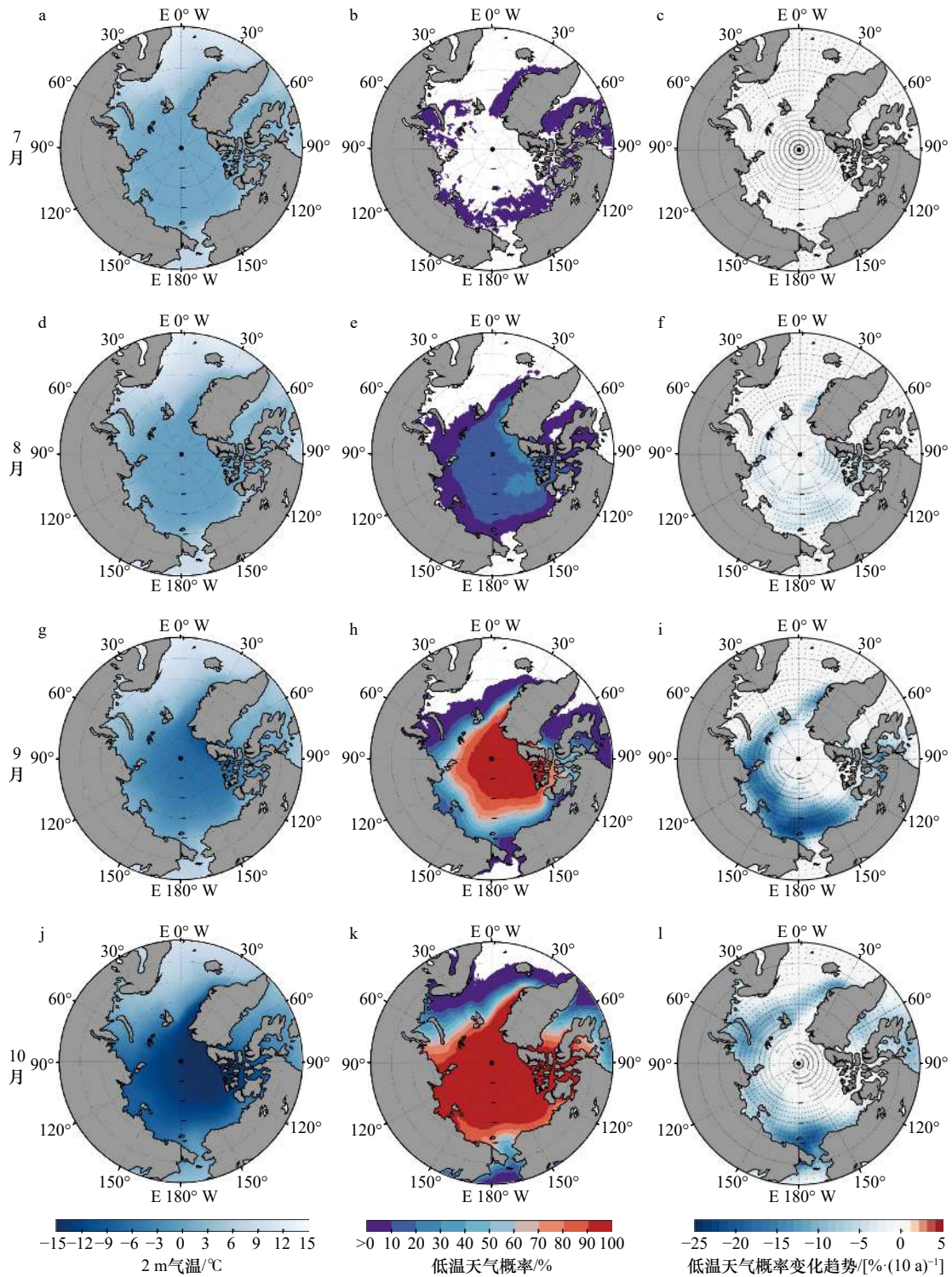


图3 1979–2020年7–10月平均2 m气温分布(a, d, g, j)、平均低温天气概率分布(b, e, h, k)和低温天气概率变化趋势(c, f, i, l)

Fig. 3 Spatial distribution of the average of 2 m air temperature (a, d, g, j), the average of the low temperature weather probability (b, e, h, k) and the tendency of the low temperature weather probability (c, f, i, l) in July to October from 1979 to 2020

低温天气概率分布图中的白色区域为低温概率等于0的区域, 低温天气概率变化趋势图中打点的区域为显著性超过95%的区域

The areas shaded with white in the maps of the low temperature weather probability represent zero low temperature weather probability. The areas with a significance of more than 95% in the maps of the tendency of the low temperature probability are dotted

可达2°C以上, 低温天气概率基本为0; 9月下降至-1~1°C, 低温天气概率最高达到40%; 10月下降至

-7~-4°C, 低温天气概率达到60%~90%。NW-III航段7–8月的平均气温为2~4°C, 低温天气概率基本

为 0; 9 月开始下降至 $0\sim 3^{\circ}\text{C}$, 最北部海域低温天气概率可达 30%; 10 月平均气温进一步下降至海水的冰点以下, 达到 $-7\sim -2^{\circ}\text{C}$, 同时, 低温天气概率达到 40%~100%, 表现为纬度越高, 低温天气概率越高的分布形式。与东北航道类似, 整个西北航道在夏季的低温天气概率也都表现为减小趋势。NW-I 航段的减小速率相对较大, 尤其在 9-10 月。NW-II 航段中, 仅部分海域在 9 月份的减小速率达到 15% 左右, 其余月份的减小速率较小。

中央航道作为一条高纬航线, 受海冰的影响更多。由于海冰的存在, 7-8 月平均气温维持在 0°C 左右。9 月平均气温下降至 -2°C , 海冰开始逐渐生长。10 月平均气温可下降至 -7°C 以下, 同时伴随着海冰的快速生长。中央航道的低温天气概率表现为 7 月最低, 为 0, 8 月开始增大, 达到 20% 左右, 9 月快速增加至 80% 以上, 10 月达到 100%。受海冰分布的影响, 仅 80°N 以南中央航道海域的低温天气概率表现为较强的减小趋势, 尤其在 9-10 月。

3.1.2 10 m 风速

图 4 给出了 1979-2020 年 7-10 月的平均 10 m 风速、平均大风天气概率和大风天气概率变化趋势的空间分布。如果某一日出现一次风力大于等于 6 级的大风过程(风速 $\geq 10.8\text{ m/s}$), 则记为大风日。大风日在当月的占比定义为大风天气概率。7-10 月的月平均风速均较小, 但仍能反映出北极航道两端航段风速较大、中间航段的风速较小的空间分布形式。

对于东北航道和西北航道, 大风天气概率分布形式与低温天气概率分布相反, 均表现为第 II 航段最小, 第 I 和第 III 航段最大。NE-II 航段的大风天气概率从 7 月的 5%~10% 逐渐增大, 8 月仅拉普捷夫海达到 15%, 9-10 月整个航段均达到 10%~20%, 其中拉普捷夫海和喀拉海分别高达 20% 和 30%。NE-I 和 NE-III 航段的大风天气概率随时间的变化与 NE-II 航段一致。7 月大风天气概率可达 10% 左右, 8 月增加至 10%~20%, 9 月继续增大至 30%, 10 月则可达到 50% 以上。NE-III 航段的大风天气概率还表现出较强的经向分布特征, 即纬度越低, 大风天气概率越大。这与半永久性天气系统冰岛低压的发展有关。太平洋一侧的阿留申低压的加强, 导致 NE-I 航段的大风天气概率自 8 月开始增大。7-9 月, 整个东北航道的大风天气概率均呈微弱地增加趋势。10 月, NE-I 和 NE-II 航段表现为显著的增加趋势, 而 NE-III 航段则表现为减小趋势。这种大风天气概率的变化形势可能与气旋活动的变化相关。

整个西北航道 7 月的大风天气概率均在 5% 以下, 之后逐渐增加。其中, NW-I 航段西部、NW-II 航段和 NW-III 航段在 10 月份的大风天气概率可分别达到 40%、15% 和 30%。除 8 月外, 西北航道其余月份的大风天气概率均表现为增加趋势, 尤其是 NW-I 和 NW-III 航段。

中央航道从太平洋一侧的 70°N 至斯瓦尔巴群岛附近的大风天气概率较低, 10 月达到最高, 均在 15% 以下。中央航道的低纬航段, 受低压系统影响较大, 大风天气概率可由 7 月的 5% 增大至 10 月的 50% 以上, 其中以北欧海的大风天气概率最大。7-9 月, 北极中心区的大风天气概率以减小趋势为主, 而中央航道的其他航段以增加趋势为主。10 月, 除了大西洋一侧的航段外, 其余航段的大风天气概率均以增加趋势为主, 尤其是楚科奇海。

3.1.3 有效波高

海浪是影响船舶航行的重要因素之一。图 5 给出了 1979-2020 年 7-10 月平均有效波高、平均大浪天气概率和大浪天气概率变化趋势的空间分布。有效波高主要受天气系统影响较大, 因此气候态月平均有效波高的空间分布形式与 10 m 风速比较一致。为了更好地分析各月大浪的影响, 本文对大浪概率进行了统计。大浪概率的定义与大风天气概率相似, 即日最大有效波高大于 2.5 m 的天数在当月的占比。

整体来看, 整个 60°N 以北海域的平均有效波高和大浪概率均表现为 7 月最小, 10 月最大。对于东北航道, NE-III 航段的平均有效波高和大浪概率最大, 尤其是挪威海, NE-I 航段次之, NE-II 航段最小。NE-II 航段 7 月平均有效波高为 0.5~1.0 m, 8 月局部海域增大至 1.5 m, 9-10 月增大至 1.0~1.5 m。该航段 7-8 月大浪概率基本为 0, 9-10 月略有增加, 但也在 5% 以下。也就是说, 海浪对该航段的影响较小。NE-I 航段平均有效波高由 7 月的 0.5~1.0 m, 增大至 8-9 月的 1.0~1.5 m, 10 月进一步增大至 1.5~2.0 m。该航段的大浪概率从 7-8 月的 0~10% 逐渐增大, 9 月达到 20%, 10 月进一步增大到 35%。NE-III 航段的平均有效波高和大浪概率都呈现为较强的经向分布形式, 南部海域(挪威海)较北部海域(巴伦支海)的平均有效波高偏高 0.5~1.0 m。巴伦支海 7-8 月的平均有效波高为 1.0~1.5 m, 大浪概率为 10% 左右, 9 月有效波高和大浪概率分布为 1.5~2.0 m 和 15%~35%, 10 月两者分别增大为 2.0~2.5 m 和 30%~60%。整个东北航道大浪概率变化趋势空间分布与大风天气概率变化趋势相似, 即 7-9 月, 整个东北航道的大浪

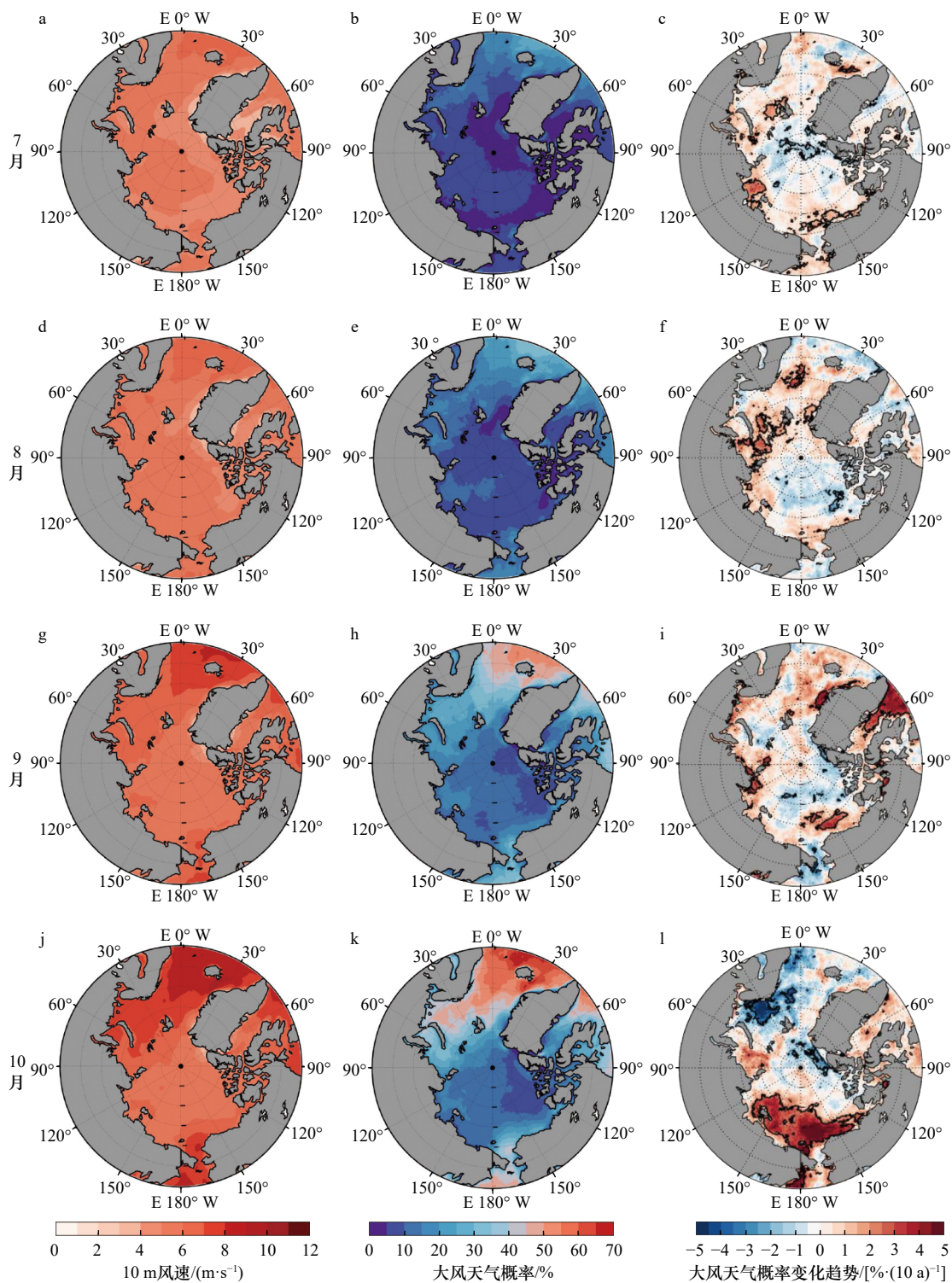


图 4 1979–2020 年 7–10 月平均 10 m 风速分布 (a, d, g, j)、平均大风天气概率分布 (b, e, h, k) 和大风天气概率变化趋势 (c, f, i, l)

Fig. 4 Spatial distribution of the average of 10 m wind speed (a, d, g, j), the average of the strong wind weather probability (b, e, h, k) and the tendency of the strong wind weather probability (c, f, i, l) in July to October from 1979 to 2020

大风天气概率变化趋势图中黑色实线内的区域为显著性超过 95% 的区域

The areas with a significance of more than 95% in the maps of the tendency of the low temperature weather probability are surrounded by solid black lines

概率均呈微弱地增加趋势, 10 月 NE-I 和 NE-II 航段表现为显著的增加趋势, 而 NE-III 航段则表现为减小趋势。

西北航道的 NW-II 航段位于加拿大群岛, 由众多海峡组成, 因此海浪较小, 整个夏季的平均有效波高基本都在 1.0 m 以下, 大浪概率基本为 0。NW-I 和

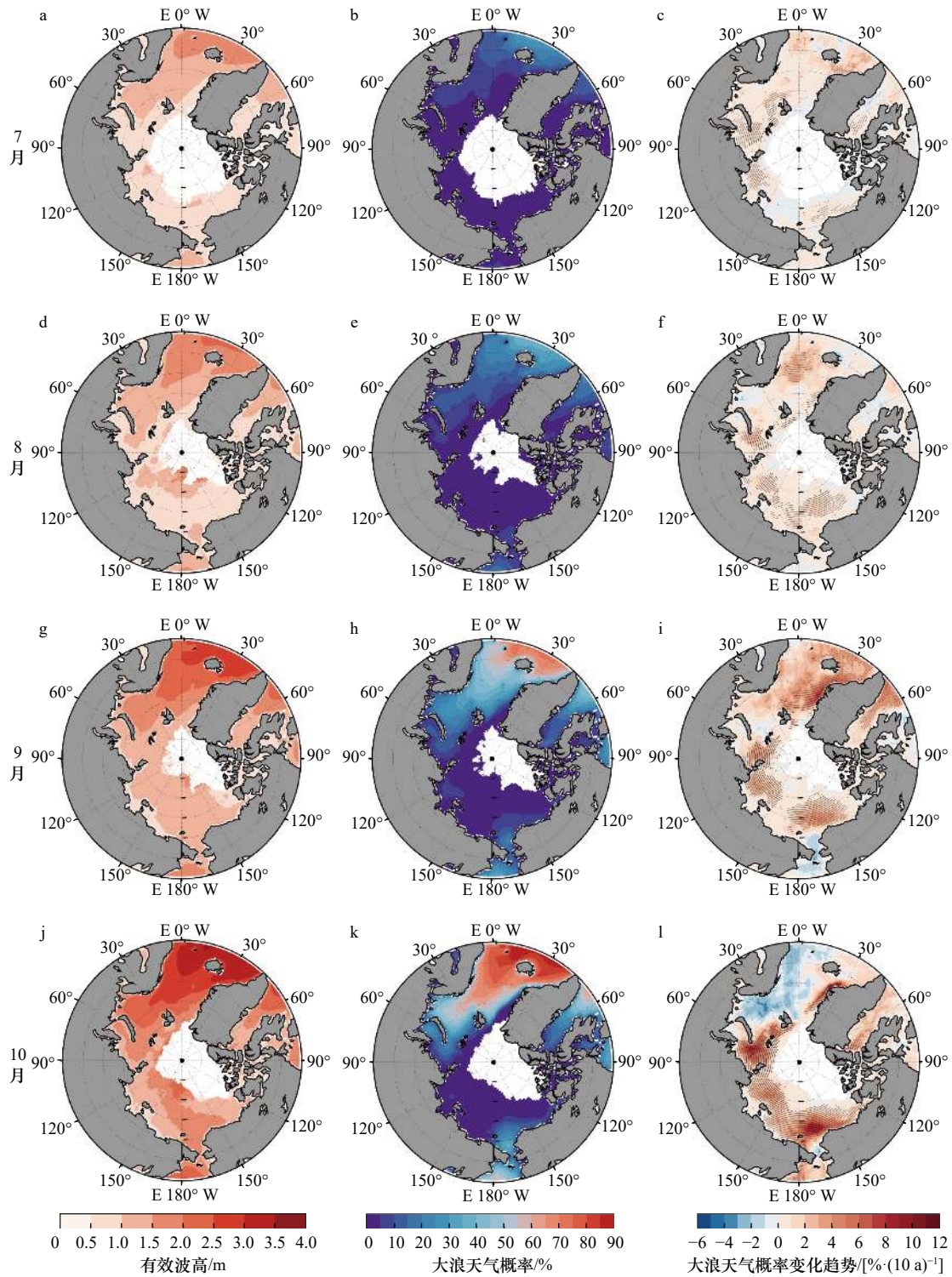


图5 1979-2020年7-10月平均有效波高空间分布(a, d, g, j)、平均大浪天气概率空间分布(b, e, h, k)和
 大浪天气概率变化趋势(c, f, i, l)

Fig. 5 Spatial distribution of the average of the significant wave height (a, d, g, j), the average of the huge wave weather probability (b, e, h, k) and the tendency of the huge wave weather probability (c, f, i, l) in July to October from 1979 to 2020

白色区域为海冰覆盖区域, 大浪天气概率变化趋势图中的打点区域为显著性超过95%的区域

The region covered by sea ice is shaded with white, the areas with a significance of more than 95% in the maps of the tendency of the low temperature probability are dotted

NW-III 航段在同时期的平均有效波高和大浪概率比较一致, 即7月为0.5~1.0 m和接近0, 8月局部海域增大至1.5 m和5%左右, 9月大部分海域达到1.0~1.5 m和10%左右, 10月约一半航段可达2.0 m左右

和 30%。7-10 月, 整个西北航道的大浪概率均表现为增加趋势, 尤其是 NW-I 和 NW-III 航段。

由于海冰具有一定的消浪作用, 中央航道高纬航段的大浪概率一直维持在 5% 以下。斯瓦尔巴群岛以南海域的平均有效波高分布与 NE-III 航段相一致, 大浪概率由 7 月的 0~15% 增大到 10 月的 50%~80%。白令海峡至斯瓦尔巴群岛之间航段海冰边缘区的平均有效波高变化趋势与 NE-II 航段比较一致, 由 7 月的 0.5~1.0 m 逐渐增大到 10 月的 1.5~2.5 m。7-9 月, 整个中央航道的大浪概率均呈微弱地增加趋势。10 月, 除了挪威海西部, 其余航段的大浪概率均以增加趋势为主, 尤其是楚科奇海。

3.2 重点区域年际变化特征

根据 3.1 节的统计分析, 我们划分出 4 个恶劣天气概率变化趋势一致且变化速率相对较大的重点海域(图 6), 进一步分析恶劣天气概率的年际变化。区域 A 为 3 个航道的起始航段, 区域 B 基本与 NE-II 航段一致, 区域 C 为巴伦支海和挪威海, 即 NE-III 航段和中央航道大西洋扇区的低纬航段, 区域 D 为巴芬湾, 即 NW-III 航段。需要注意的是, 本节统计的区域仅为图 6 所示各区域内的海洋, 不包含陆地。

图 7 至图 10 给出了 7-10 月 4 个重点海域的平均低温天气概率、大风天气概率和大浪概率距平的时间序列, 以及线性变化趋势。7 月, 整个北极的低温

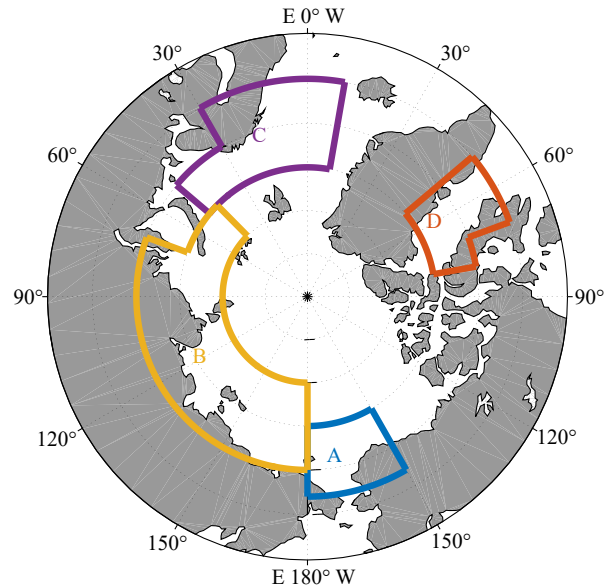


图 6 重点区域示意图

Fig. 6 Schematic diagram of key sea areas

天气概率基本为 0(图 3b), 因此 4 个重点海域平均低温天气概率的年际变化较小。区域 D 的低温天气概率年际变化最大, 2000 年以前以正距平为主, 2000 年之后以弱负距平为主, 说明该海域的低温天气呈微弱的减少趋势。这与全球变暖的趋势一致。大风天气概率具有较大的年际变化, 尤其在区域 A 和 C。4 个海域的大风天气概率均呈增加趋势, 但只有区域 A 和 B 的显著性超过 90%。由于 7 月的海冰范围较

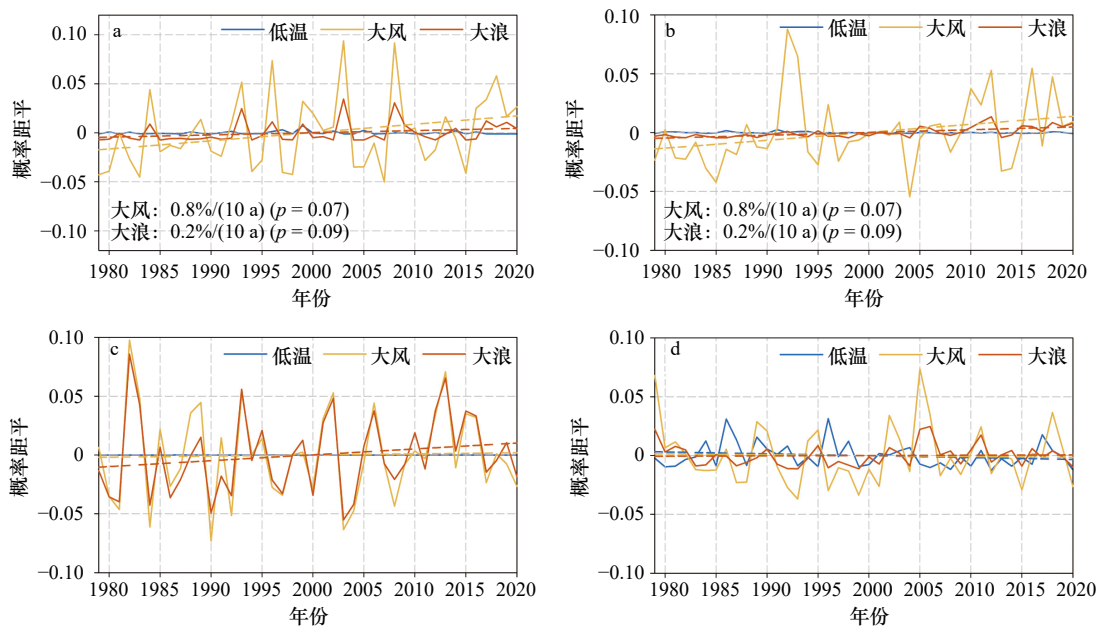


图 7 1979-2020 年区域 A(a)、B(b)、C(c) 和 D(d) 内 7 月平均低温天气概率、大风天气概率和大浪天气概率距平(实线)及线性变化趋势(虚线)。图中给出了显著性超过 90% 的线性拟合变化速率

Fig. 7 The anomaly (solid lines) and the tendency (dashed lines) of the average of the low temperature weather probability, strong wind weather probability and the huge wave weather probability within region A (a), B (b), C (c) and D (d) in July during 1979-2020. These tendencies with a significance of more than 90% are given

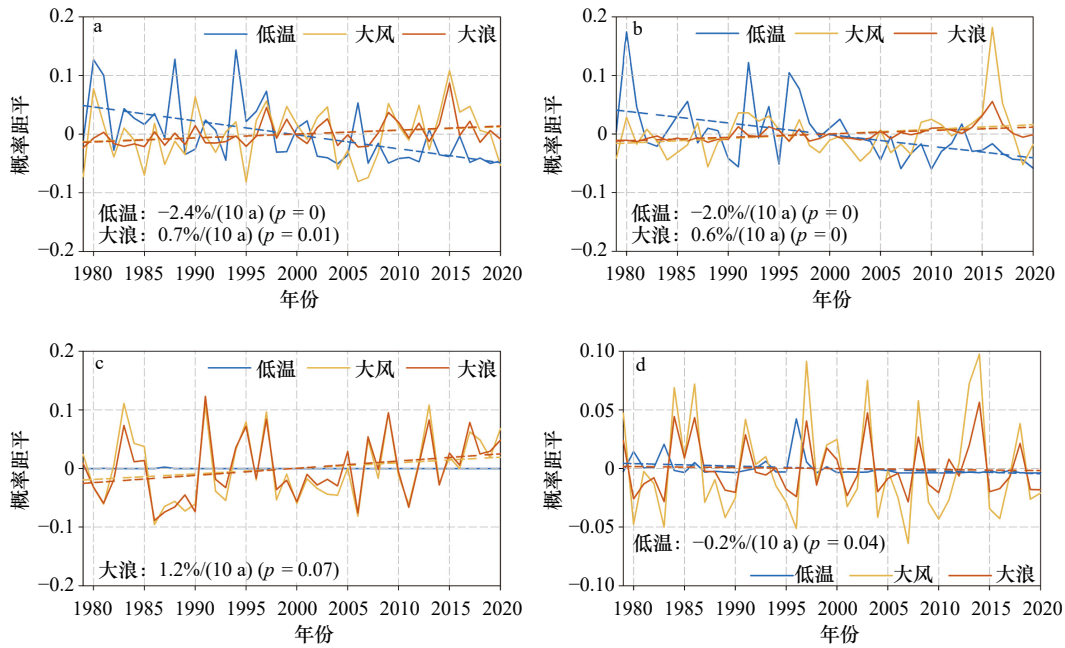


图 8 1979–2020 年区域 A(a)、B(b)、C(c)和 D(d)内 8 月平均低温天气概率、大风天气概率和大浪天气概率距平(实线)及变化趋势(虚线)。图中给出了显著性超过 90% 的线性拟合变化速率

Fig. 8 The anomaly (solid lines) and the tendency (dashed lines) of the average of the low temperature weather probability, strong wind weather probability and the huge wave weather probability within region A (a), B (b), C (c) and D (d) in August during 1979–2020. These tendencies with a significance of more than 90% are given

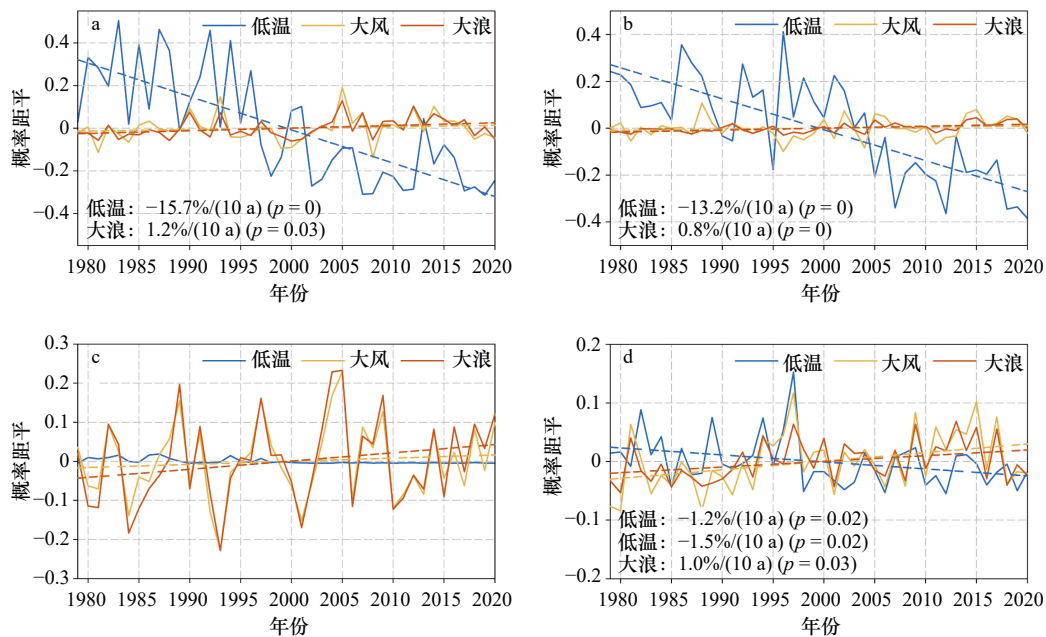


图 9 1979–2020 年区域 A(a)、B(b)、C(c)和 D(d)内 9 月平均低温天气概率、大风天气概率和大浪天气概率距平(实线)及变化趋势(虚线)。图中给出了显著性超过 90% 的线性拟合变化速率

Fig. 9 The anomaly (solid lines) and the tendency (dashed lines) of the average of the low temperature weather probability, strong wind weather probability and the huge wave weather probability within region A (a), B (b), C (c) and D (d) in September during 1979–2020. These tendencies with a significance of more than 90% are given

大, 只有开阔水域面积较大的区域 C 的大浪概率具有与大风天气概率相似的年际变化。然而, 其余 3 个海域的大浪概率年际变化较小, 且 2000 年之后以正距

平为主。这是因为海冰减少, 海冰外缘线北移, 开阔水域面积增加, 大浪过程增多。

8 月, 区域 A、B 和 D 的低温天气概率距平在

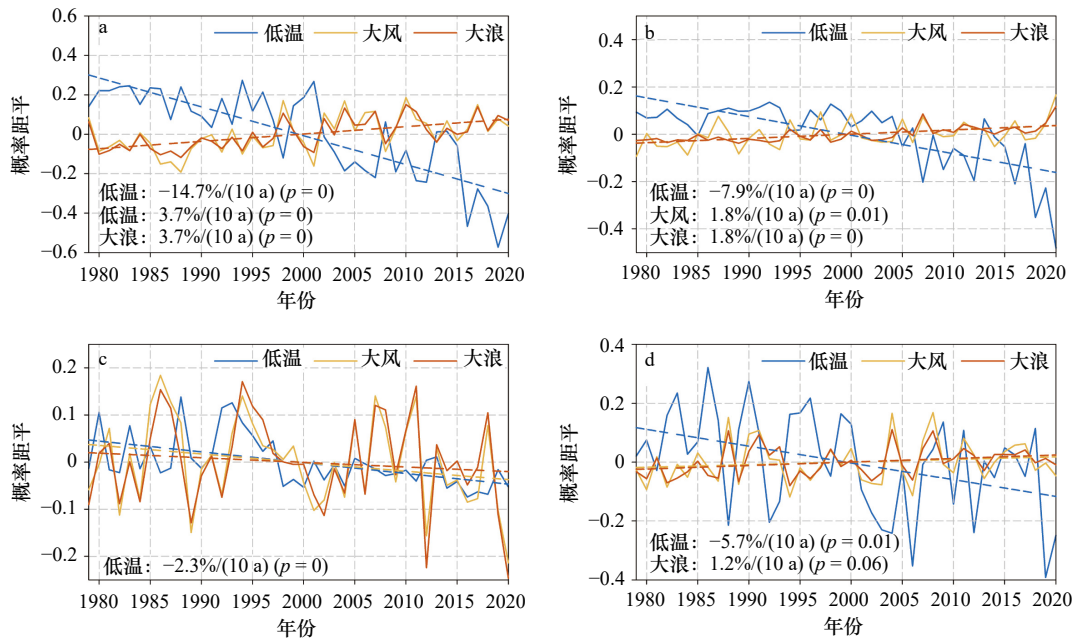


图 10 1979–2020 年海域 A(a)、B(b)、C(c)和 D(d)内 10 月平均低温天气概率、大风天气概率和大浪天气概率距平(实线)及变化趋势(虚线)。图中给出了显著性超过 90% 的线性拟合变化速率

Fig. 10 The anomaly (solid lines) and the tendency (dashed lines) of the average of the low temperature weather probability, strong wind weather probability and the huge wave weather probability within region A (a), B (b), C (c) and D (d) in October during 1979–2020. These tendencies with a significance of more than 90% are given

2000 年由正距平变为负距平,并表现为显著的减小趋势。一方面,这跟全球变暖的大背景有关,尤其在北极放大效应的作用下,2 m 气温呈增加趋势;另一方面,海冰的快速减少使得开阔水域面积增大,海表温度高于冰点,使近地面气温更容易维持在 -1.8°C 以上。区域 C 的 8 月平均低温天气概率基本为 0 (图 3e),几乎不存在年际变化。4 个海域的平均大风天气概率和大浪概率均呈微弱的增加趋势。其中,区域 C 和 D 的年际变化较大,区域 A 和 B 的年际变化较小。尤其区域 A 和 B 的大浪概率呈显著的增加趋势。海冰减少,开阔水域面积的增加,促进这两个区域的大浪过程增多。

与 8 月相似,区域 A、B 和 D 在 9 月的低温天气概率呈显著减小趋势,而且具有更大的减小速率。区域 C 的低温天气概率基本上一直保持为 0。这 4 个海域在 9 月基本都是开阔水域,大风天气概率与大浪概率的变化基本一致,都呈增加趋势,尤其是区域 A、B 和 D 的大浪概率增加趋势的显著性超过 95%。区域 A、B 和 D 的大风天气概率和大浪概率的年际变化较小。

10 月,4 个海域的低温天气概率都呈显著的减小趋势,其中,区域 A 的减小速率最大。10 月为北极海冰冻初期,这 4 个海域仍以开阔水域为主。因此,大风天气概率与大浪概率的变化基本一致。区域 A 和 B 的大风天气概率和大浪概率都呈显著的增大

趋势,2000 年后都以正距平为主。值得注意的是,区域 C 的大风天气概率和大浪概率都呈减小趋势,但不能通过显著性检验,这与该海域其他月份的变化趋势不同。大风过程通常是气旋引起的,而大浪过程与大风过程息息相关,因此区域 C 的这种变化可能与气旋过程的变化有关。

3.3 基于走航气象观测的个例分析

由于大气再分析数据中不包含能见度数据,无法分析北极夏季频发的海雾分布特征。因此,为了进一步获取更加全面的影响船只航行北极航道的近地面气象要素的分布特征,我们对我国历史北极科学考察航次获取的常规地面气象要素进行统计分析。

3.3.1 2012 年 7 月——东北航道

2012 年 7 月 21 日至 8 月 2 日(中国第 5 次北极科学考察去程),“雪龙”号去往冰岛期间穿越了东北航道,这里东北航道的范围为从穿过白令海峡后第一次抵达 70°N 至第一次抵达 20°E 之间的航段,图 11 为期间近地面气象要素走航观测结果。东北航道航行期间,平均海平面气压为 1 005.7 hPa,最低气压为 993.5 hPa,平均风速为 7.7 m/s,最大风速为 20 m/s。虽然 2012 年 7 月区域 B 的大风天气概率和大浪概率均为较大的正距平,但此次北极科学考察期间共出现 1 次浪高 ≥ 2.5 m 的大浪过程和 2 次 7 级或以上大风过程,风向以偏北至西北象居多,大风过程中风向

为西-西北和南-西南风。由于航线纬度相对较低,离岸较近,航程期间气温较高,相对湿度较低,平均温度为 2.1°C ,最低气温为 -2.5°C ,并出现1次超过 10°C

的高温天气,平均相对湿度为 89.3% ;期间海雾较为频发,多次出现能见度(V)不足 1 km 的浓雾过程,期间 $V \leq 1\text{ km}$ 的比例为 28.9% 。

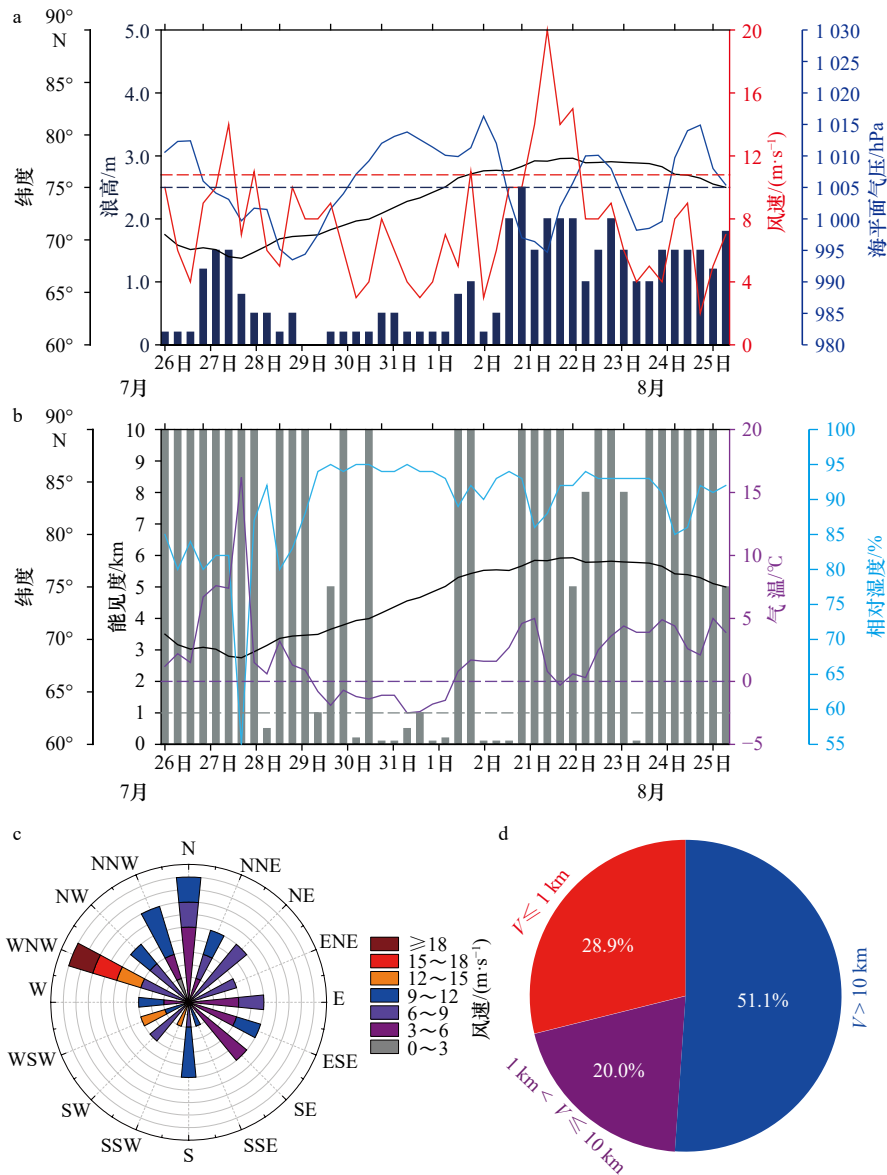


图 11 2012 年“雪龙”号穿越东北航道期间近地面气象要素走航观测结果

Fig. 11 The results of the near-surface meteorological parameters obtained during *Xuelong* vessel crossing the Arctic northeast passage in 2012

- a. 海平面气压、风速、浪高及纬度时间序列; b. 气温、相对湿度、能见度及纬度时间序列; c. 风玫瑰图; d. 能见度(V)概率分布
a. The time series of sea level pressure, wind speed, wave height and the latitude; b. the time series of air temperature, relative humidity, visibility and the latitude; c. wind rose plot; d. the percentage distribution of different visibility (V)

3.3.2 2017 年 9 月——西北航道

2017 年 8 月 31 日至 9 月 10 日(中国第 8 次北极科学考察),“雪龙”号穿越了西北航道,西北航道的范围取为从巴芬湾的 70°N 至波弗特海的 75°N 的航段,图 12 为期间近地面气象要素走航观测结果。西北航道航行期间,平均海平面气压为 1009.9 hPa ,最低气

压为 995.0 hPa ,平均风速为 7.2 m/s ,最大风速为 16 m/s ,期间出现 1 次 7 级或以上大风过程,风向以西北风居多,大风过程中风向为西北和东-东北风,期间出现 2 次浪高 $\geq 2.5\text{ m}$ 的大浪过程。航线纬度相对较低,离岸较近,且航程期间先后受高压和较强气旋影响,气温变化幅度较大,平均温度为 0.8°C ,最低气温为

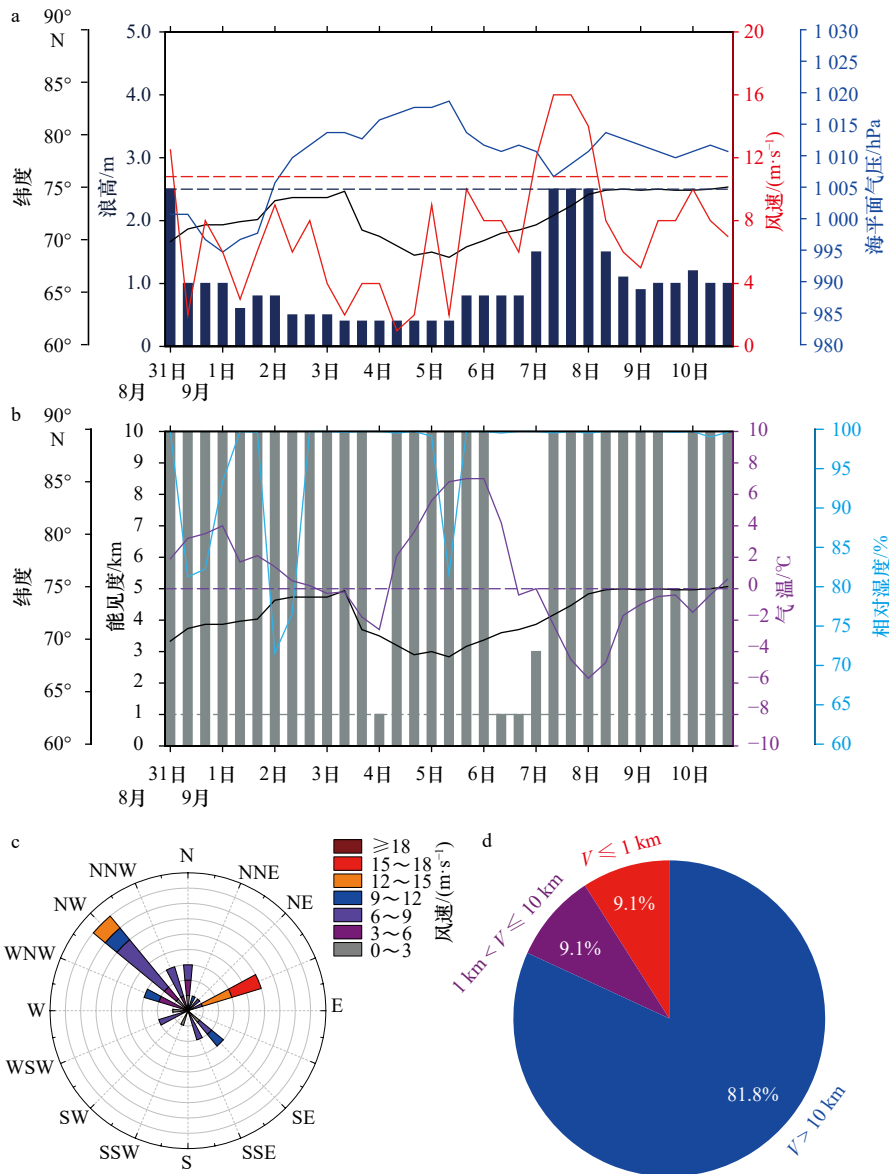


图 12 2017 年“雪龙”号穿越西北航道期间近地面气象要素走航观测结果

Fig. 12 The results of the near-surface meteorological parameters obtained during *Xuelong* vessel crossing the Arctic northwest passage in 2017

a. 海平面气压、风速、浪高及纬度时间序列; b. 气温、相对湿度、能见度及纬度时间序列; c. 风玫瑰图; d. 能见度(V)概率分布

a. The time series of sea level pressure, wind speed, wave height and the latitude; b. the time series of air temperature, relative humidity, visibility and the latitude; c. wind rose plot; d. the percentage distribution of different visibility (V)

-5.7°C, 最高气温为 6.8°C; 相对湿度较高, 平均相对湿度为 96.5%; 期间海雾过程较少, 能见度 $V \leq 1$ km 的比例为 9.1%。

3.3.3 中央航道

1) 2012 年 8-9 月和 2017 年 8 月——穿越中央航道

2012 年 8 月 25 日至 9 月 6 日(中国第 5 次北极科学考察返程), “雪龙”号从冰岛返回过程中穿越了中央航道, 图 13 为期间近地面气象要素走航观测结果。此次中央航道航行期间, 平均海平面气压为 1014.1 hPa, 最低气压为 1006.1 hPa, 平均风速为 6.7 m/s, 最大

风速为 14 m/s, 期间出现 1 次 7 级或以上大风过程, 风向以偏南至偏西象居多, 大风过程中风向为偏南风 and 北-东北风, 期间出现 1 次浪高 ≥ 2.5 m 的大浪过程。由于航线纬度相对较高, 航程期间气温较低, 平均温度为 -1.4°C, 最低气温为 -3.5°C, 平均相对湿度为 90.2%; 期间海雾较为频发, 多次出现能见度 (V) 不足 1 km 的浓雾过程, 期间 $V \leq 1$ km 的比例达到 22.4%。

2017 年 8 月 2 日至 8 月 18 日, “雪龙”号从浮冰区中穿越了中央航道, 图 14 为期间近地面气象要素走航观测结果。此次中央航道航行期间, 平均海平面气

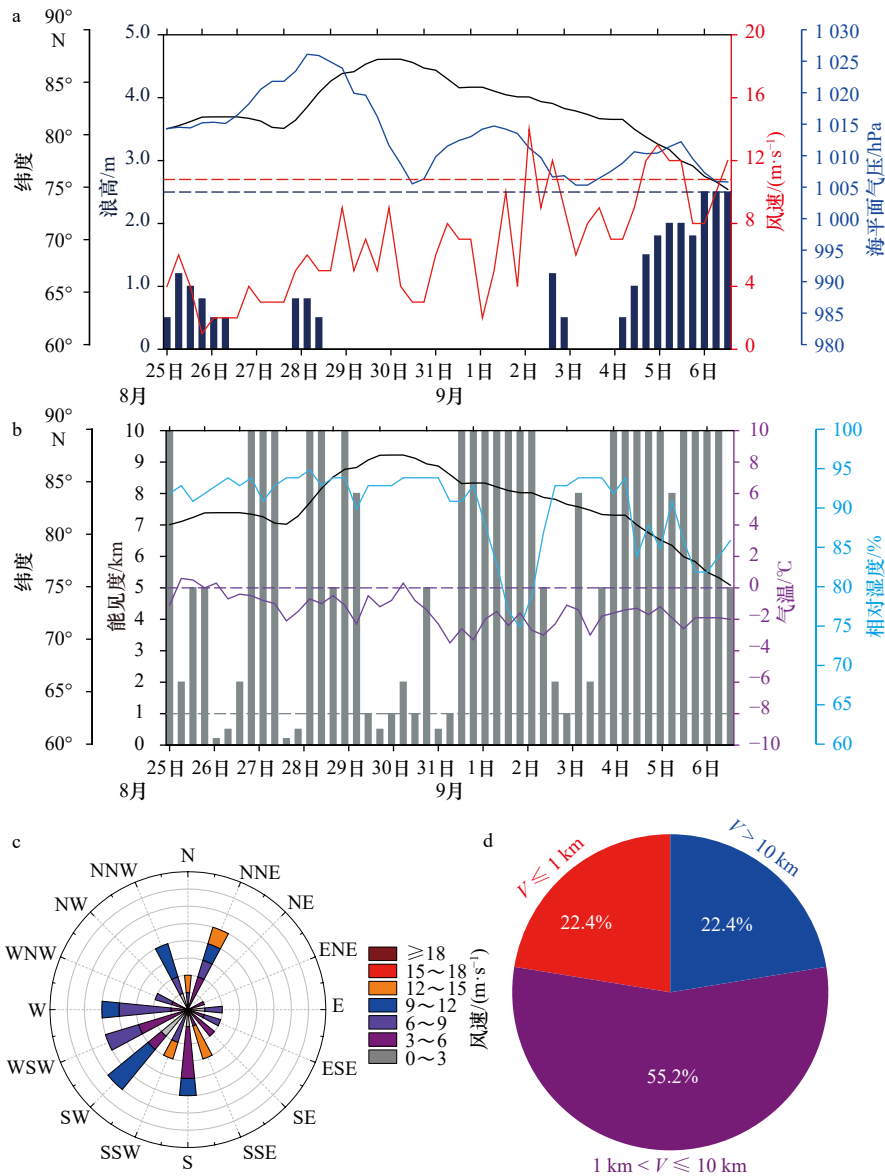


图 13 2012 年“雪龙”号穿越中央航道期间近地面气象要素走航观测结果

Fig. 13 The results of the near-surface meteorological parameters obtained during *Xuelong* vessel crossing the trans-Arctic northwest passage in 2012

a. 海平面气压、风速、浪高及纬度时间序列; b. 气温、相对湿度、能见度及纬度时间序列; c. 风玫瑰图; d. 能见度(V)概率分布

a. The time series of sea level pressure, wind speed, wave height and the latitude; b. the time series of air temperature, relative humidity, visibility and the latitude; c. wind rose plot; d. the percentage of distribution different visibility (V)

压为 1 003.5 hPa, 最低气压为 991.0 hPa, 平均风速为 8.2 m/s, 最大风速为 15 m/s, 期间出现 1 次 7 级或以上大风过程, 风向以西-西北风居多, 大风过程中风向为西北风, 期间没有出现大浪过程。由于航线纬度相对较高, 航程期间气温较低, 平均温度为 -1.7°C , 最低气温为 -4.2°C , 并多次出现低于 -3°C 的低温天气, 平均相对湿度为 99.3%; 期间海雾过程较少, 能见度 $V \leq 1 \text{ km}$ 的比例仅为 6.1%。

2) 其余航次 7-9 月——中央航道-太平洋扇区
除第 1 次、第 5 次和第 8 次北极考察外, 其余

7 次常规考察区域大致相同, 均位于北极中央航道的太平洋扇区航段, 考察时间都集中于 7 月下旬至 9 月上旬(表 1), 在时间和空间上具有较好地一致性, 因此可以放在一起对气象要素进行统计分析。

图 15 为各常规航次 70°N 以北考察海域近地面气象要素统计结果。气压、风速和大风过程方面, 70°N 以北考察海域平均海平面气压的各航次平均值为 1 011.5 hPa, 各航次的最低气压平均值为 988.2 hPa, 各航次平均风速的平均值为 7.0 m/s, 各航次最大风速的平均值为 16.6 m/s, 平均每个航次出现 7.4 次超过

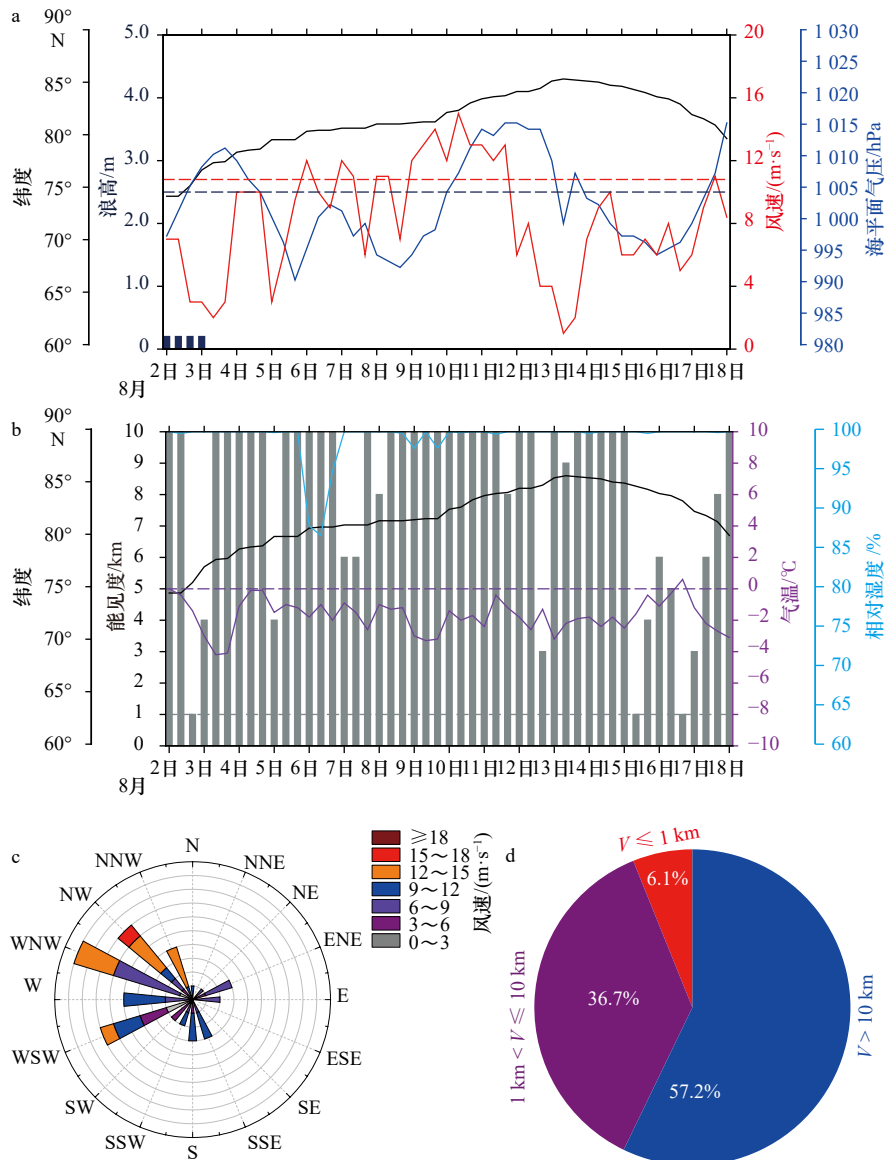


图 14 2017 年雪龙号穿越中央航道期间近地面气象要素走航观测结果

Fig. 14 The results of the near-surface meteorological parameters obtained during *Xuelong* vessel crossing the trans-Arctic northwest passage in 2017

a. 海平面气压、风速、浪高及纬度时间序列; b. 气温、相对湿度、能见度及纬度时间序列; c. 风玫瑰图; d. 能见度 (V) 概率分布

a. The time series of sea level pressure, wind speed, wave height and the latitude; b. the time series of air temperature, relative humidity, visibility and the latitude; c. wind rose plot; d. the percentage weather of distribution different visibility (V)

6 级和 2.6 次超过 7 级的大风过程。气压、风速和大风过程存在较为明显的年际变化。第 3 次北极考察 (2008 年) 期间, 海平面气压最高, 近地面风速最小, 大风过程最小。第 7 次北极考察 (2016 年) 期间, 海平面气压最低, 尤其最低海平面气压显著偏低, 近地面风速最大, 大风过程最多。区域 A 的大风天气概率在 2008 年和 2016 年 8 月分别为负距平和正距平 (图 8a), 与观测结果一致。

近地面气温、相对湿度和能见度方面, 70°N 以北考察海域各航次平均气温的平均值为 -0.67°C , 各航

次最低气温的平均值为 -5.0°C , 各航次平均相对湿度的平均值为 94.5%, 各航次能见度 $\leq 1\text{ km}$ 的比例平均为 18.3%, 说明浓雾总体出现较为频繁。温湿度和能见度的年际变化也比较明显, 第 4 次北极考察期间气温最高、相对湿度最低, 第 2 次北极考察期间气温最低, 第 9 次北极考察期间相对湿度最高, 第 2 次和第 4 次考察期间浓雾最为频繁, 第 6 次考察期间浓雾相对较少。

大风和低能见度是影响船舶在北冰洋航行的两个最主要气象因素, 为此对 7 次常规考察 70°N 以北

表 1 7 个常规航次 70°N 以北气象观测日期和人工观测次数

考察航次(年)	观测日期	人工观测次数
2(2003)	7月31日至9月10日	165
3(2008)	8月3日至9月8日	146
4(2010)	7月22日至8月30日	119
6(2014)	7月30日至9月8日	123
7(2016)	7月25日至9月2日	117
9(2018)	7月30日至9月6日	114
11(2020)	7月28日至9月11日	184

中央航道太平洋扇区海域的风向风速和能见度情况进行了统计。图 16a 为此区域实测风向风速数据的风玫瑰图, 中央航道太平洋扇区 70°N 以北海域平均

风速为 6.8 m/s, 最大风速为 19.0 m/s, 考察期间多次出现 8 级大风过程, 没有明显的主导风向, 总体以西至西北和南至西南的风居多, 多个方向都可以出现大于等于 15 m/s 的大风, 说明影响该海域天气系统复杂, 移动路径也较为多变。进一步对此考察海域的风向风速按照不同纬度进行了统计分析(图略), 发现不同纬度带内平均风速差别很小, 介于 6.5~6.9 m/s, 主导风向差别较多, 且 8 级大风过程主要出现在较低的 70°~75°N 区域内, 75°N 以北区域很少出现。图 8b 为此区域实测能见度数据的概率分布图, 能见度 $V \leq 1$ km 的比例为 18.6%, 海雾出现频率比西北航道高而比东北航道低, 可见此区域海雾出现也比较频繁, $1 \text{ km} < V \leq 10 \text{ km}$ 的比例约为 40.3%, 比西北航道和东北航道都高, 说明此区域轻雾或降雪出现也较为频繁。同样也按照不同纬度对能见度进行了进一步分析(图略), 发现不同纬度带内能见度概率分布差别不大, 相对而言 80°~85°N 区域内浓雾出现频率相对较低, 近极点

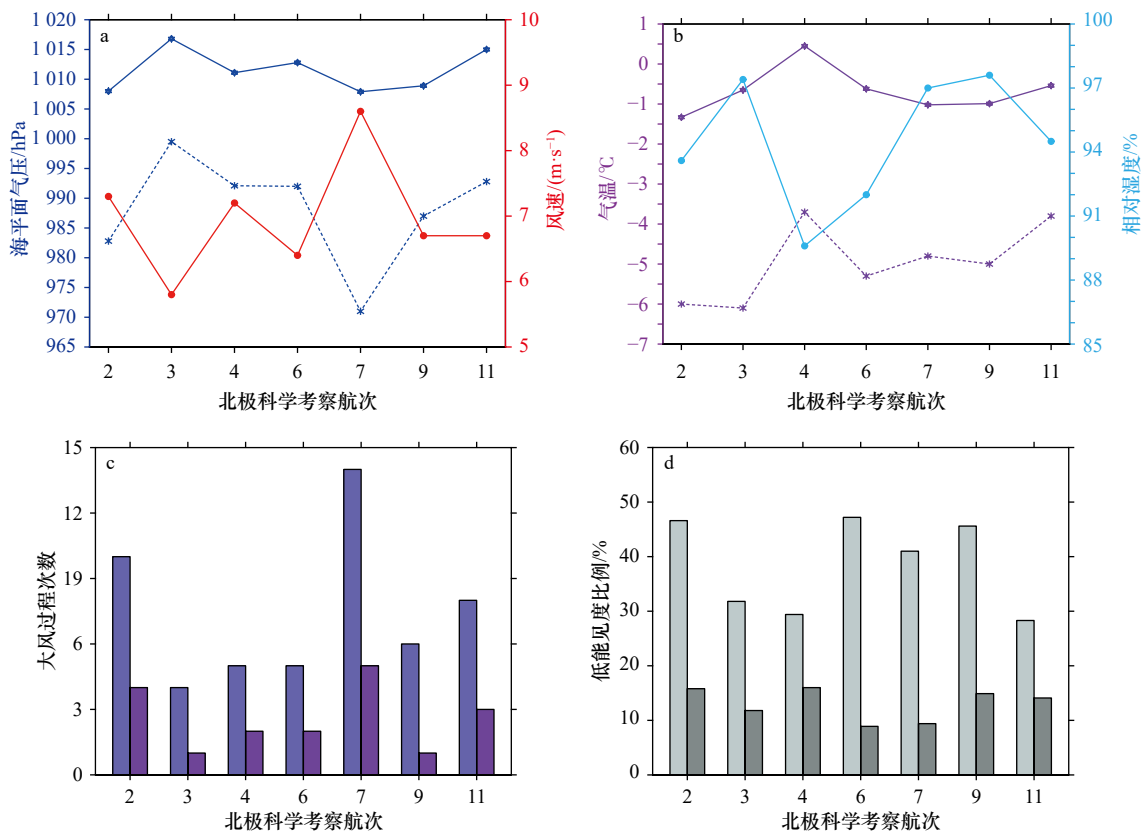


图 15 7 个常规航次 70°N 以北考察海域近地面气象要素统计

Fig. 15 Statistics of the near-surface meteorological parameters in the area north of 70°N during the seven conventional expeditions

- a. 平均海平面气压(蓝色实线)、最低海平面气压(蓝色虚线)和平均风速(红色实线); b. 平均气温(紫色实线)、最低气温(紫色虚线)和平均相对湿度(蓝色实线); c. 6级(淡紫色)和7级(深紫色)大风过程次数; d. 能见度在1~10 km比例(浅灰色)和能见度 ≤ 1 km比例(深灰色)
- a. The blue solid line, the blue dashed line and red solid line represent the mean sea level pressure, the minimum sea level pressure and the mean wind speed, respectively; b. the purple solid line, purple dashed line and blue solid line represent the mean air temperature, the minimum air temperature and the mean relative humidity, respectively; c. the light purple and dark purple bars represent the numbers of high wind processes with more than level 6 wind and more than level 7 wind, respectively; d. the light grey and dark grey bars represent the percentage of visibility between 1 km and 10 km and less than 1 km, respectively

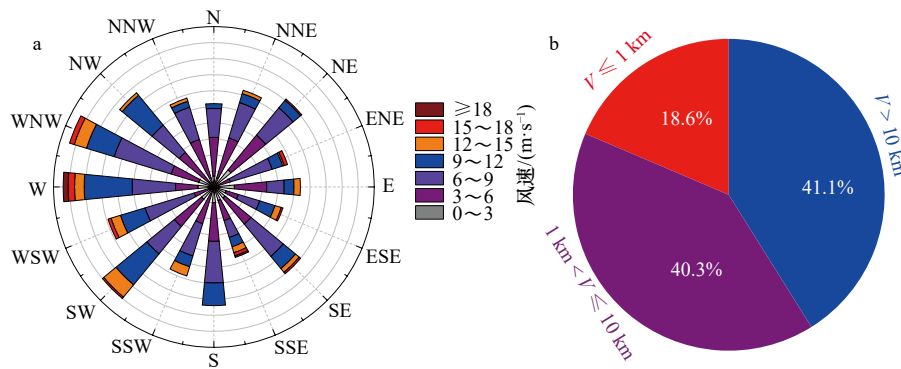


图 16 7 个常规航次 70°N 以北考察海域风玫瑰图(a)和能见度(V)概率分布(b)
Fig. 16 The wind rose (a) and the percentage distribution of different visibility (V) (b) in the area north of 70°N during the seven conventional expedition

的 85°~90°N 区域内良好能见度出现比例较高。

4 结论与展望

本文结合大气再分析数据和我国北极科学考察获取的走航气象观测数据,从不同时间尺度分析了影响北极东北航道、西北航道和中央航道通航的关键近地面气象要素——温度、风速、海浪和能见度的时空分布特征。一方面,本文获取的关键近地面气象要素时空变化分布特征,对未来船舶航行北极航道具有一定的指导意义;另一方面,利用实测数据开展个案分析,统计不同航道的近地面气象要素特征,也可为北极大气数值模式的验证和改进提供一定的支撑。

整体来看,7–8 月的天气条件对船舶航行北极航道影响最小,9–10 月低温、大风和大浪增多,对船舶航行的影响较大。低温天气主要发生在北极航道的中间航段,即东北航道的东西伯利亚海、拉普捷夫海和喀拉海,西北航道的加拿大群岛海域,以及中央航道的北冰洋。大风和大浪则主要发生在北极航道的两端,即东北航道太平洋扇区的白令海峡和楚科奇海、大西洋扇区的巴伦支海和挪威海,西北航道的波弗特海和巴芬湾,以及中央航道的楚科奇海和北欧海。

在全球变暖的大背景下,北极放大效应增强^[35],夏季北极航道的低温天气概率呈减小趋势,尤其在 9–10 月。也就是说,未来船舶在夏季通航北极航道时,低温天气的影响会越来越小。7–9 月,除北极中

心区的部分航段以外,其余北极航道海域的大风天气概率以增加趋势为主。10 月,挪威海、巴伦支海和北极中心区的大风天气概率表现为不显著的下降趋势,而其余航道海域以增加趋势为主。这可能与大气环流形式的变化和局地气旋活动的变化有关,需要进一步开展系统分析。大浪概率的变化趋势与大风天气概率相似,即除了 10 月的挪威海和巴伦支海以外,其余时间和其余开阔水域均以增加趋势为主。本文划分的 4 个重点海域的大浪概率在整个夏季也基本都呈显著增加趋势。这应该与北极海冰减少和大风过程增多有关。大气再分析和实测数据的分析都显示北极航道区域的低温、大风和大浪过程都具有较强的年际变化。

综合现有北极航道走航气象观测数据,对比发现东北航道大风和海雾均较频繁,西北航道能见度最好,中央航道的大风主要出现在纬度相对较低的海域,大风和海雾的发生频率居中,但轻雾或降雪较频繁。需要注意的是,我国仅在北极东北航道和西北航道各开展了 1 个航次的观测,开展走航气象观测的时间和获取的数据都非常有限。虽然对有限的数据进行分析具有一定的现实意义,但今后仍然需要积累更多的观测数据开展系统分析,以获取可靠性更强的结论。

致谢: 感谢中国历次北极科学考察队对走航气象观测工作的支持。

参考文献:

- [1] Simmonds I, Li Muyuan. Trends and variability in polar sea ice, global atmospheric circulations, and baroclinicity[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2021, 1504(1): 167–186.
- [2] 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.

- [3] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881–889.
- [4] Parkinson C L, DiGirolamo N E. New visualizations highlight new information on the contrasting Arctic and Antarctic sea-ice trends since the late 1970s[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 198–204.
- [5] Liang Xi, Li Xichen, Bi Haibo, et al. A comparison of factors that led to the extreme sea ice minima in the twenty-first century in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(4): 1249–1265.
- [6] 李理, 苏洁, 魏立新, 等. 北极中央区海冰低密集度现象研究[J]. *海洋学报*, 2018, 40(11): 33–45.
Li Cheng, Su Jie, Wei Lixin, et al. Exploration of anomalous low sea ice concentration phenomenon in the Central Arctic[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(11): 33–45.
- [7] 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.
- [8] Bi Haibo, Zhang Jinlun, Wang Yunhe, et al. Arctic sea ice volume changes in terms of age as revealed from satellite observations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(7): 2223–2237.
- [9] 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(C12): C12024.
- [10] Stroeve J, Barrett A, Serreze M, et al. Using records from submarine, aircraft and satellites to evaluate climate model simulations of Arctic sea ice thickness[J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(5): 1839–1854.
- [11] Stroeve J C, Crawford A D, Stammerjohn S. Using timing of ice retreat to predict timing of fall freeze-up in the Arctic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(12): 6332–6340.
- [12] Serreze M C, Crawford A D, Stroeve J C, et al. Variability, trends, and predictability of seasonal sea ice retreat and advance in the Chukchi Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(10): 7308–7325.
- [13] Stroeve J, Notz D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(10): 103001.
- [14] 李春花, 李明, 赵杰臣, 等. 近年北极东北和西北航道开通状况分析[J]. *海洋学报*, 2014, 36(10): 33–47.
Li Chunhua, Li Ming, Zhao Jiechen, et al. Navigable status analysis of Arctic northeast and northwest passage in recent years[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(10): 33–47.
- [15] 季青, 董江, 庞小平, 等. 北极东北航道夏季海冰冰情与适航性分析[J]. *船舶力学*, 2021, 25(8): 991–1000.
Ji Qing, Dong Jiang, Pang Xiaoping, et al. Analysis of sea ice conditions and navigability of Arctic northeast passage in summer[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2021, 25(8): 991–1000.
- [16] Zhou Xiangying, Min Chao, Yang Yijun, et al. Revisiting trans-arctic maritime navigability in 2011–2016 from the perspective of sea ice thickness[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(14): 2766.
- [17] Cao Yunfeng, Liang Shunlin, Sun Laixiang, et al. Trans-Arctic shipping routes expanding faster than the model projections[J]. *Global Environmental Change*, 2022, 73: 102488.
- [18] Mudryk L R, Dawson J, Howell S E L, et al. Impact of 1, 2 and 4 °C of global warming on ship navigation in the Canadian Arctic[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(8): 673–679.
- [19] Chen Jinlei, Kang Shichang, Chen Changsheng, et al. Changes in sea ice and future accessibility along the Arctic northeast passage[J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 195: 103319.
- [20] Wei Ting, Yan Qing, Qi Wei, et al. Projections of Arctic sea ice conditions and shipping routes in the twenty-first century using CMIP6 forcing scenarios[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104079.
- [21] Li Xueke, Stephenson S R, Lynch A H, et al. Arctic shipping guidance from the CMIP6 ensemble on operational and infrastructural timescales[J]. *Climatic Change*, 2021, 167(1/2): 23.
- [22] Min Chao, Yang Qinghua, Chen Dake, et al. The emerging Arctic shipping corridors[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(10): e2022GL099157.
- [23] 闵超, 杨清华. 北极海洋环境保护工作组(PAME)北极航运状况报告介绍[J]. *极地研究*, 2020, 32(2): 279–280.
Min Chao, Yang Qinghua. Introduction to the arctic shipping status report of the protection of the Arctic Marine Environment Working Group (PAME)[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2020, 32(2): 279–280.
- [24] 解思梅, 薛振和, 曲绍厚, 等. 北冰洋夏季的海雾[J]. *海洋学报*, 2001, 23(6): 40–50.
Xie Simei, Xue Zhenhe, Qu Shaohou, et al. Summer Arctic sea fog[J]. *Haiyang Xuebao*, 2001, 23(6): 40–50.
- [25] Yamagami A, Matsueda M, Tanaka H L. Medium-range forecast skill for extraordinary Arctic cyclones in summer of 2008–2016[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(9): 4429–4437.
- [26] Inoue J. Review of forecast skills for weather and sea ice in supporting Arctic navigation[J]. *Polar Science*, 2021, 27: 100523.
- [27] 孙启振, 丁卓铭, 沈辉, 等. 我国极地数值天气预报系统的初步建立与应用[J]. *海洋预报*, 2017, 34(4): 1–10.
Sun Qizhen, Ding Zhuoming, Shen Hui, et al. Polar numerical weather prediction system: preliminary establishment and application[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(4): 1–10.
- [28] Ren Shihe, Liang Xi, Sun Qizhen, et al. A fully coupled Arctic sea-ice–ocean–atmosphere model (ArcIOAM v1.0) based on C-Coupler2: model description and preliminary results[J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(2): 1101–1124.
- [29] Randriamampianina R, Bormann N, Koltzow M A Ø, et al. Relative impact of observations on a regional Arctic numerical weather pre-

- diction system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2021, 147(737): 2212–2232.
- [30] Lawrence H, Bormann N, Sandu I, et al. Use and impact of Arctic observations in the ECMWF numerical weather prediction system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, 145(725): 3432–3454.
- [31] Gascard J C, Riemann-Campe K, Gerdes R, et al. Future sea ice conditions and weather forecasts in the Arctic: implications for Arctic shipping[J]. *Ambio*, 2017, 46(3): 355–367.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.3–2007, 海洋调查规范 第3部分: 海洋气象观测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.3–2007, Specifications for oceanographic survey-Part 3: Marine meteorological observations[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [33] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 126.
China Meteorological Administration. Specifications for Surface Meteorological Observation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 126.
- [34] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999–2049.
- [35] Chylek P, Folland C, Klett J D, et al. Annual mean Arctic amplification 1970–2020: Observed and simulated by CMIP6 climate models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022: e2022GL099371.

Analysis on the characteristics of the temporal and spatial variation of near-surface meteorological parameters affecting the navigation in Arctic passage in summer

Tian Zhongxiang¹, Sun Hulin¹, Li Zhiqiang¹, Song Xiaojiang¹,
Meng Shang¹, Chen Zhikun¹, Li Min¹, Li Bingrui²

(1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 2. Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China)

Abstract: Based on the ERA5 reanalysis data and the meteorological observation data obtained during Chinese Arctic Research Expeditions, the temporal and spatial variation characteristics of the key near-surface meteorological parameters that influence ship navigation in the Arctic passages in summer are analyzed. The results show that the weather conditions in July and August are the most suitable for ship navigation in the Arctic passages. The low temperature, strong wind and huge wave weather increase significantly in September, which impacts ship navigation greatly. The weather in October is even worse, posing a quit challenge to ship navigation. Low temperature mainly occurs in the middle of each passage, and strong wind and huge wave are concentrated in the areas at both ends of the passages. Both the strong wind probability and huge wave probability show a decreasing tendency in the entire Arctic passages in summer with large interannual changes except for the Norwegian Sea and Barents Sea in October and the central Arctic in summer. According to the observation data, it is found that the northeast passage has the poorest visibility, the northwest passage has the best visibility, and the trans-Arctic passage has moderate visibility.

Key words: Arctic passage; temperature; wind speed; significant wave height; visibility