

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2025.06.007

北极海冰面积变化及东北航道适航性研究

蒋攀¹, 甘滨蕊^{1,2,3}, 杨胜发^{1,2,3*}

(1.重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400074;2.重庆交通大学 河海学院,重庆 400074;3.重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心,重庆 400074)

摘要: 为明晰北极冰情变化及适航性,研究基于 AMSR-E/AMSR2 (OUC2)和 FY-3D/MWRI (OUC3)两种逐日海冰密集度数据,采用目视解译与权重分析方法,分析 2003—2023 年北极海冰面积变化及东北航道适航性。结果表明:两种数据在海冰季节变化和通航关键区域方面表现一致,但 OUC2 数据因空间分辨率较高,识别出的海冰面积范围更广,解译出的可通航天数更高;北极海冰面积变化具有明显的季节循环性,4—9 月面积减少约 70%,10 月—次年 3 月面积增长约 95%,太阳辐射及其引起的气温、海温变化是主要驱动因素;影响东北航道通航的关键区域为维利基茨基海峡、北地群岛、新西伯利亚群岛和东西伯利亚海;2020 年之前,两个数据集显示的东北航道可通航天数呈波动上升趋势,但 2021—2023 年可通航天数均显著下降,其中 OUC2 数据从 105 天降至 37 天,OUC3 数据从 104 天降至 29 天,这主要由于大气环流状态发生变化,导致海冰运输到拉普捷夫海和东西伯利亚海区域堆积并堵塞航道,减少了可通航天数。

关键词: 东北航道;北极;海冰面积;适航性

中图分类号: P731.32;P727 **文献标识码:** A

文章编号: 1003-0239(2025)06-0055-10

0 引言

自 1979 年以来,北极变暖速度约为全球气候变暖速度的四倍,北极海冰正以前所未有的速度融化,北极航道全面通航的可能性日益增加^[1-2]。北极航道由于具备总航程与航行时间短、成本低、总体安全性高的优势,正逐渐成为全球航运业关注的重点^[3]。我国依托东北航道建设“冰上丝绸之路”,这不仅是中俄合作的重要亚欧航线,也是俄罗斯基于北方海航道打造的“蓝色经济通道”^[4]。近年来,东北航道的海冰面积演变特性与适航性成为研究重点。

海冰面积变化是影响航道通航的关键因素^[5]。自 20 世纪 80 年代以来,早期学者基于极地考察船的走航资料以及逐日海冰运动数据,开展了海冰运

动特性研究^[6-7]。随着遥感技术的发展,许多学者利用不同卫星监测反演的海冰密集度数据来研究海冰变化的规律及其成因。王蔓蔓^[8]利用海冰密集度产品评估了东北航道海冰的变化趋势,发现海冰范围和面积均呈减小趋势;刘国宪^[9]使用海冰密集度日数据研究了东北航道海冰及海冰密集度异常的年、季、月变化;而陆海鸣^[10]比较了 2020 年与 2021 年夏季的海冰状况,发现 2021 年东北航道的冰情出现了近 10 年未有的分布异常现象。东北航道适航性研究主要集中在通航窗口期和关键通航区域两个方面。马龙等^[11]对 2005—2014 年东北航道的通航起讫时间及通航期进行了系统分析,结果表明东北航道的平均通航期为 7 月中下旬—10 月中下旬,约为 90 天,通航关键水域包括东西伯利亚水域、拉普捷夫海水域等;顾小壮等^[12]对 2009—2018 年东北航

收稿日期: 2024-12-16。

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目青年基金(KJQN202300708);重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2023-A04,SLK2023B12)。

作者简介: 蒋攀(1999-),女,硕士,研究生,主要从事航道通航优化与智能化管理研究。E-mail: 2104186476@qq.com

*通信作者: 杨胜发(1970-),男,教授,博士,主要从事泥沙运动基础理论与航道治理研究。E-mail: ysf777@163.com

道的通航期进行了分析,结果显示虽然通航期存在较大波动,但整体呈现出延长趋势。

目前关于海冰面积变化及适航性的研究大多依赖单一数据产品,且时间序列均截止于2021年,未涵盖之后的冰情变化,无法全面反映最新的海冰动态和航道适航性。研究指出^[10,13],与2020年同期相比,2021年夏季海冰面积出现了异常增多现象,东北航道通航窗口期减少。但由于现有研究的时间序列未覆盖后续年份,出现该现象的原因及海冰面积变化的长期趋势尚不清楚。因此,未来研究需更新数据,以评估最新的海冰动态及适航性,探讨对东北航道开发利用的潜在影响。本研究基于AMSR-E/AMSR和FY-3D/MWRI两种逐日海冰密集度数据,采用目视解译方法和权重分析方法,研究了2003—2023年北极海冰面积变化及东北航道适航性,为未来北极航道的开发和利用提供了重要参考。

1 研究对象

东北航道是从挪威北角附近的欧洲西北部出发,经由欧亚大陆和西伯利亚北部沿岸,穿越白令海峡直达太平洋的航线^[14]。图1展示了东北航道按纬度范围划分的近岸、中纬、高纬3条航线及其途经区域^[15]。

为了更准确地反映船舶在东北航道的实际通航情况,研究依据航段的地理位置、各航段所覆盖的主要海域及其对航行活动的潜在影响,对东北航道进行了更加细致的划分^[16]。将东北航道划分为4个不同的航段^[17],以便更加精确地统计各航段的可通航天数和通航影响区域,每个航段的纬度分布范

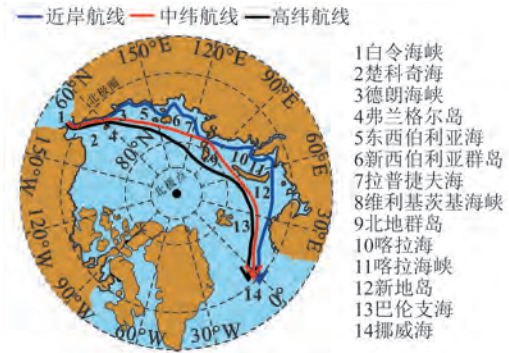


图1 东北航道航线图

Fig.1 Route map of the Arctic Northeast Passage

围见表1。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究采用的两种海冰密集度数据集均由中国海洋大学(Ocean University of China, OUC)提供,其海冰密集度产品简称为OUC数据集^[16]。两个数据集在产品数据列表中分别被称为北极海冰密集度(2)和北极海冰密集度(3),因此将AMSR-E/AMSR数据简称为OUC2, FY-3D/MWRI数据简称为OUC3,相关参数见表2^[18-19]。两种数据所统计的海冰密集度均大于15%,统计的海冰面积范围为55°N以北区域,包括北极圈(66.5°N以北)及其周边海域,延伸至北纬88°N。数据开发基于德国不来梅大学的北极辐射与湍流相互作用研究算法(Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study Sea Ice, ASI)发展而来的动态系点值算法(Dynamic Tie Point ASI, DT-ASI),该算法的优势在于能够使用动

表1 东北航道纬度划分

Tab.1 Latitude divisions of the Arctic Northeast Passage

区域	第一航段	第二航段	第三航段	第四航段
近岸	66°~70°N	70°~73°N	72°~73°N	67°~72°N
	180°~169°W	152°E~180°	30°~152°E	10°~30°E
中纬	66°~70°N	70°~75°N	75°~78°N	69°~75°N
	180°~169°W	152°E~180°	30°~152°E	10°~30°E
高纬	66°~70°N	70°~77°N	77°~82°N	69°~77°N
	180°~169°W	150°E~180°	40°~150°E	10°E~0°

表2 两种海冰密集度产品数据的基本信息

Tab.2 Detailed information of the two sea ice concentration datasets

数据集	数据源	时间跨度	空间分辨率/km	时间分辨率/d
OUC2*	AMSR-E	2002年6月1日—2011年10月4日	6.25	1
	AMSR2	2012年7月2日至今		
OUC3**	FY-3B	2010年11月19日—2019年8月18日	12.5	1
	FY-3D	2019年1月1日至今		

注: *OUC2: <https://coas.ouc.edu.cn/pogoc/2018/1210/c9717a231970/page.htm>; **OUC3: <http://coas.ouc.edu.cn/pogoc/2018/1210/c9717a231970/page.htm>

态系点值反映结合点随时间的变化情况,并且通过天气过滤器过滤云层诱导的虚假冰,保证云层对敞水值计算影响最小,使得纯水系点值更接近真实状况。通过每日系点值得到的反演方程在低密集度区增大了海冰密集度,在高密集冰区减小了海冰密集度,从而在一定程度上改善了微波数据的反演准确度,有效减少了气旋等天气系统所引起的云层和水汽对纯水系点值计算的影响^[18]。

2.2 研究方法

本文采用目视解译方法和权重占比分析方法研究北极海冰面积变化规律及东北航道适航性。目视解译分析方法先通过对遥感影像进行预处理后,依据图像中目标物的大小、形状、阴影、颜色、纹理、图案、位置及周围的地物系统进行分析,判断地物目标并赋予属性代码^[20-21]。通过交叉订正和波段组合处理亮温数据,再根据目标物的颜色进行海冰面积、范围和密集度识别,得到逐日海冰密集度分布图。

航道通航日期反映了航线经过水域的冰情,定义为海冰密集度不会影响船舶在该航线水域安全航行的起讫时间^[11]。将东北航道通航起始日定义为:在海冰覆盖范围内,当船舶在航线必经区域首次发现一条可完整通航的通路时,该日期为通航起始日;通航终止日定义为:在海冰覆盖范围内,当船舶在航线必经区域首次无法找到可完整通航的通路时,该日期为通航终止日。8月22日德朗海峡海冰未融化(见图2a),而8月23日德朗海峡开通后(见图2b),近岸航线可实现首次通航,该日为通航起始日;由于维利基茨基海峡结冰,导致东北航道所有航线均不可通航(见图2d),则9月23日为通航终止日。航道通航天数是指一年中航道可供船舶

安全航行的天数,本研究依据海冰覆盖条件作为判断是否通航的标准,可将海冰密集度15%作为阈值,低于该阈值视为可通航,高于该阈值视为不可通航^[11,22]。本文采用的两种数据集均只统计了海冰密集度>15%的海冰,故可通过判断逐日海冰密集度分布与东北航道航线的相对位置来统计可通航天数和通航影响区域,如图2b中,近岸航线所有通航区域均不会受到海冰阻碍,则该日判定为可通航。

航道通航影响区域是指影响船舶起始通航和终止通航的区域。将影响通航起始区域定义为:当某个区域成为影响航线开通的唯一区域,并且在下一时刻,该区域的开通能让航线顺畅通行,则称该区域为通航起始影响区域;通航终止影响区域定义为:当某个区域成为导致航线关闭的唯一区域,并且在下一时刻,该区域的关闭会让航线无法通行,则称该区域为通航终止影响区域。德朗海峡是阻碍近岸航线通航的唯一区域(见图2a),其融冰可让

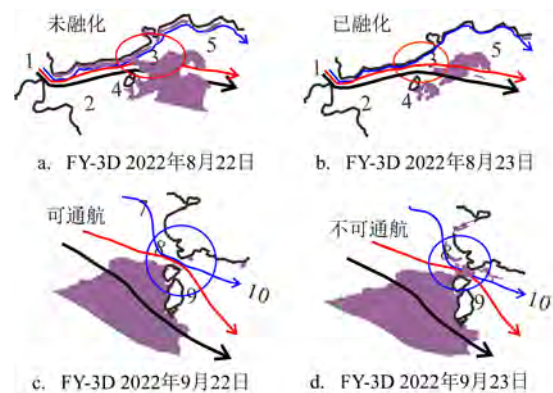


图2 东北航道通航示意图

Fig.2 Schematic map of navigability in the Arctic Northeast Passage

近岸航线成功开通(见图2b),因此将德朗海峡判定为通航起始影响区域。9月22日之前东北航道近岸航线和中纬航线均可通航(见图2c),而9月23日维利基茨基海峡的结冰导致东北航道所有航线均不可通航(见图2d),因此维利基茨基海峡被判定为通航终止影响区域。确定航道通航影响区域后,可采用权重占比法分析东北航道的通航关键区域。权重占比法是一种在数据分析中用于评估不同因素或指标对总体结果贡献程度的方法,该方法可以帮助识别各个因素在整体中所占的相对重要性^[23-24]。权重占比计算公式为:

$$\text{权重占比} = \frac{\text{单一因素的值}}{\text{所有因素值的总和}} \times 100\% \quad (1)$$

3 结果与分析

3.1 北极海冰面积变化

3.1.1 OUC2与OUC3海冰面积对比

图3展示了OUC2与OUC3的北极海冰面积最

大值和最小值对比结果。研究表明,OUC2数据识别出的海冰面积最大值普遍高于OUC3数据,其中,2018年,OUC2识别出的海冰面积最大值为 $15.45 \times 10^6 \text{ km}^2$,而OUC3为 $13.35 \times 10^6 \text{ km}^2$,最大差值为 $2.10 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。而OUC2数据识别出的海冰面积最小值普遍低于OUC3数据,其中,2013年,OUC2识别出的海冰面积最小值为 $3.41 \times 10^6 \text{ km}^2$,而OUC3为 $4.86 \times 10^6 \text{ km}^2$,最大差值为 $-1.45 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。综上所述,OUC2数据识别出的海冰面积范围相较于OUC3更广。

3.1.2 北极海冰面积季节变化规律

为了分析北极海冰面积的季节变化规律,本研究将前一年10—12月及次年1—3月的海冰面积视为一个数据周期,并对多年份和多个周期的数据进行对比分析。图4展示了OUC2与OUC3两种数据在北极海冰面积季节变化的对比结果。对比分析表明,海冰面积变化不仅在不同统计年份中表现出一致性,在不同数据集之间也具有 consistency。具体而言,海冰面积在3月达到最大值,9月达到最小值,其

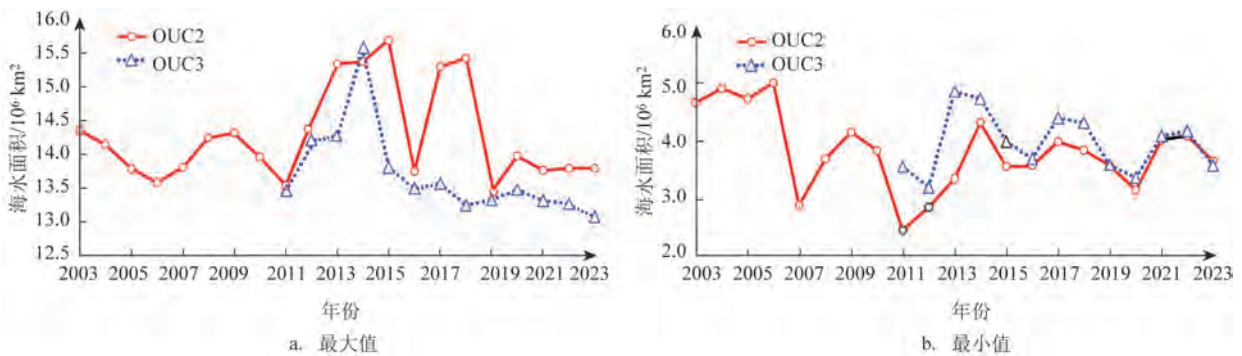


图3 OUC2与OUC3北极海冰面积对比

Fig.3 Comparison of the Arctic sea ice area between the OUC2 and OUC3 datasets

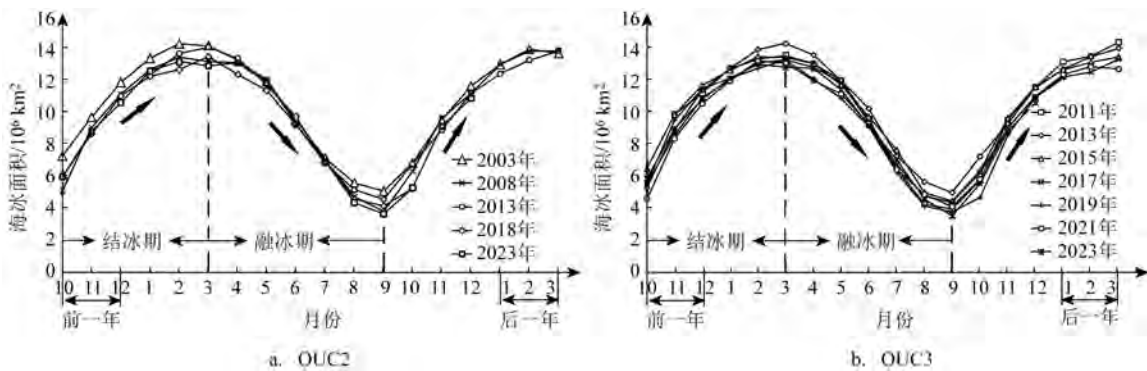


图4 北极海冰面积季节变化

Fig.4 Seasonal variations in the Arctic sea ice area

中,4—9月的海冰面积从 $13.15 \times 10^6 \text{ km}^2$ 逐渐减少至 $3.85 \times 10^6 \text{ km}^2$,减少约 70%,而 10 月—次年 3 月,海冰面积从 $6.75 \times 10^6 \text{ km}^2$ 逐渐增加至 $13.23 \times 10^6 \text{ km}^2$,增长约 95%。根据北极季节划分标准,北极海冰面积变化具有明显的季节循环性,即春夏季为融冰期,秋冬季为结冰期。

3.2 东北航道适航性分析

3.2.1 可通航天数变化趋势

根据 2.2 中对通航日期的定义,研究将每年 7—10 月的海冰面积分布图与航线途经区域进行逐日对比,并统计出两个数据集中 3 条航线的可通航总天数,结果见图 5a 和 5b。结果表明,2020 年之前,两个数据集的可通航天数变化趋势一致,均呈波动上升趋势,并在 2020 年达到峰值。然而,2021—2023 年,两个数据集的可通航天数均出现显著下降。具体而言,基于 OUC2 数据解译得到的可通航天数从峰值 105 天下降至 2023 年的最低 37 天;基于 OUC3

数据解译得到的可通航天数从峰值 104 天下降至 2023 年的最低 29 天。通过对比 3 条航线的可通航天数,发现近岸和中纬航线的变化趋势基本一致,而高纬航线普遍低于其他两条航线。图 5c 展示了 2011—2023 年两个数据集的可通航总天数对比。结果表明,OUC3 数据解译得到的可通航总天数总体低于 OUC2 数据,尤其在 2015 年,两者的差值达到 22 天(其余年份的平均差值为 7.25 天)。

3.2.2 通航关键区域

根据 2.2 中通航影响区域判定方法,研究将每年 7—10 月的海冰面积分布与航线途经区域进行逐日对比,确定通航影响区域,并计算每个影响区域在总体影响区域中的权重占比。图 6 展示了两种数据集通航影响区域的权重分布。通过对比权重值,发现基于 OUC2 数据解译得到的通航关键区域包括维利基茨基海峡、北地群岛、新西伯利亚群岛和东西伯利亚海;而 OUC3 数据解译得到的关键区域则为维利基茨基海峡、北地群岛和新西伯利亚群岛。综合分析表明,东北航道的整体通航关键区域为维利基茨基海峡、北地群岛、新西伯利亚群岛和东西伯利亚海。此外,对 2003—2023 年 7—10 月的通航影响区域进行了逐月统计,结果显示,两个数据集在 7—10 月的通航关键区域分别依次为东西伯利亚海、维利基茨基海峡、北地群岛和维利基茨基海峡。

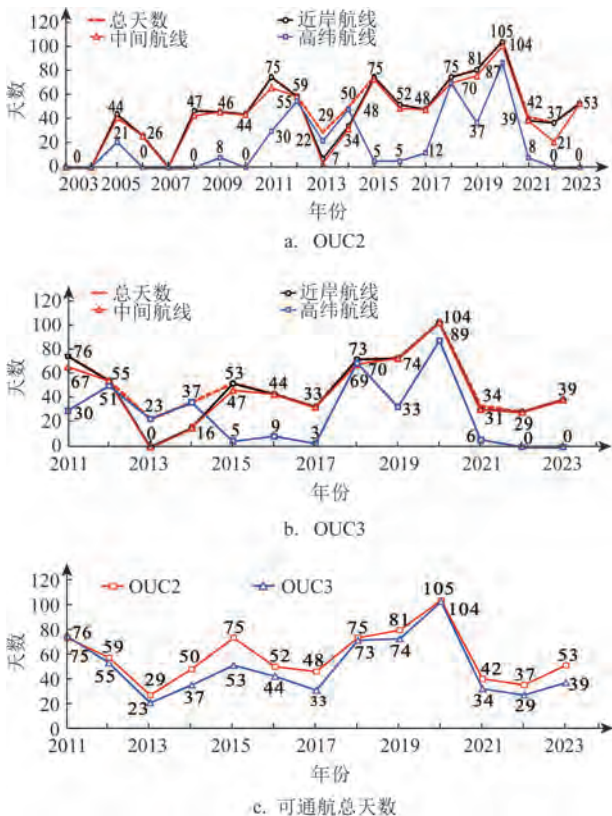


图 5 东北航道可通航天数变化
Fig.5 Variations in the number of navigable days in the Arctic Northeast Passage

4 讨论

两个数据集在海冰面积季节变化和通航关键区域方面均表现出一致性。然而,OUC2 数据识别出的海冰面积最大值普遍高于 OUC3 数据,且两者最大差值为 $2.10 \times 10^6 \text{ km}^2$;而 OUC2 数据识别出的海冰面积最小值普遍低于 OUC3 数据,两者最大差值为 $-1.45 \times 10^6 \text{ km}^2$,因此说明 OUC2 数据识别出的海冰面积范围相较于 OUC3 更广。此外,在适航性方面,基于 OUC3 数据解译得到的可通航天数总体低于 OUC2 数据,且两者最大差值为 22 天。

在遥感监测中,高空间分辨率能够提供更细致的地物信息,从而使得海冰和其他地物的识别更加敏锐;而低空间分辨率则由于每个像元代表更大的区域,容易发生多种地物的混合,导致识别的准确性降低^[25-26]。在本研究中,OUC2 数据的空间分辨率

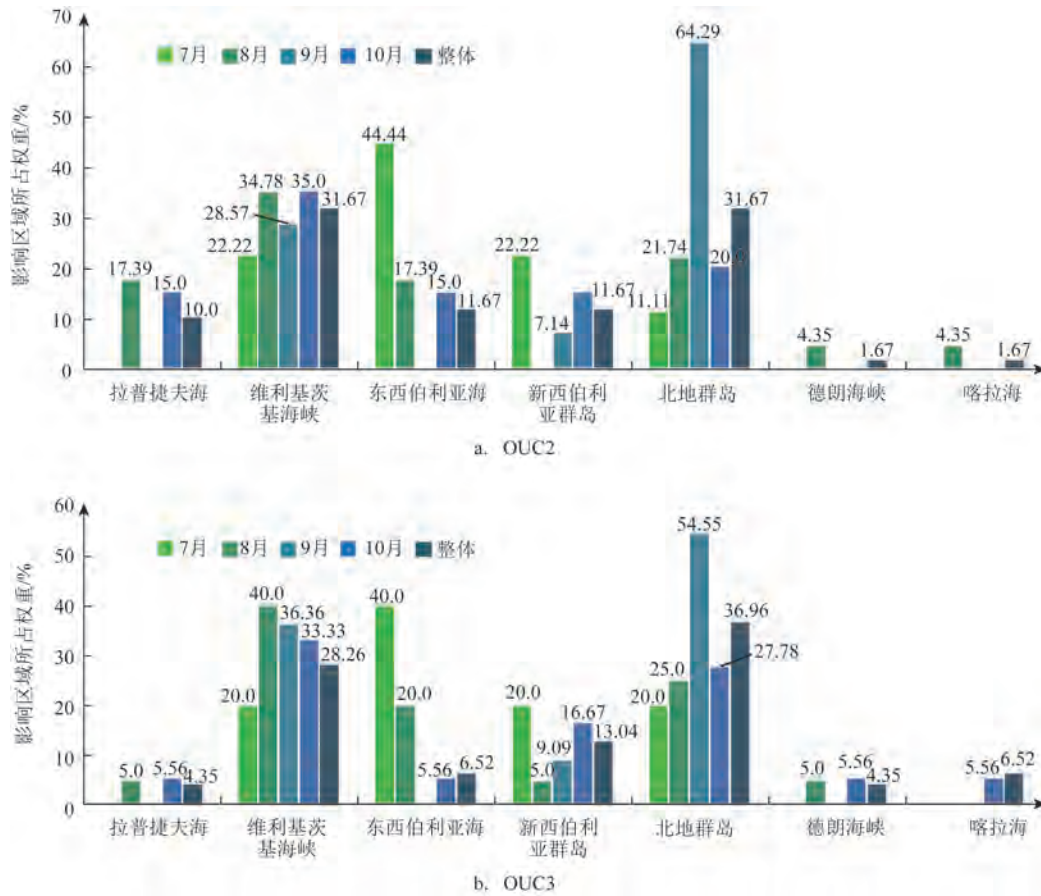


图6 东北航道通航影响区域权重图

Fig.6 Weight distribution map of critical navigation zones in the Arctic Northeast Passage

为6.25 km,而OUC3数据为12.5 km,因此OUC2数据的空间分辨率比OUC3数据更高。

由于具有较高的空间分辨率,OUC2数据在海冰识别方面表现更加敏锐,能够更精确地识别小尺度的海冰碎片和细节,提供更准确的海冰面积;而OUC3数据由于空间分辨率较低,难以识别小尺度的海冰碎片,导致海冰面积被低估。同时,OUC3数据的低分辨率容易受到混合像元影响,特别是在海冰边缘区域,可能将开阔水域与海冰混淆,原本是开阔水域却被识别成了海冰,从而误判为阻碍船舶通航,导致基于OUC3数据解译的可通航天数总体低于OUC2数据。因此,OUC2数据相较于OUC3数据在精度和可靠性上更为优越。尽管高空间分辨率的遥感数据在细节识别和精度上具有明显优势,但其数据量较大且覆盖范围有限,而低空间分辨率数据则适用于大范围监测,但在细节识别和精

度上却存在一定局限,因此,在选择参考数据时,应根据具体研究目标和区域特点权衡高分辨率与低分辨率数据的优劣。

北极海冰面积变化具有明显的季节循环性。4—9月海冰面积逐渐减少约70%,而10月—次年3月,海冰面积逐渐增长约95%。北极海冰的季节变化表现为春夏季为融冰期,秋冬季为结冰期。导致海冰季节性变化的原因既有直接因素,也有间接因素。北极海冰的季节性变化主要由太阳辐射驱动,其变化受大气反射、冰与海洋的吸收等多重因素影响,且展现出强烈的季节循环性^[27]。太阳辐射通过反照率反馈、季节变化以及云量变化等机制来影响北极海冰面积的持续变化^[28-29]。例如,近几十年来,北极海冰面积逐渐减少,改变了太阳辐射对大气-冰-海洋系统的作用力,降低了海冰表面的反照率,使更多的太阳辐射被海洋吸收。这种吸热效应导

致海洋表层温度上升,从而加速海冰融化,形成正反馈循环^[30]。太阳辐射强度随季节变化显著,夏季北极接收到的太阳辐射较强,促使海冰融化,而冬季辐射减弱,有助于海冰结冰^[31]。此外,太阳辐射是驱动大气、海洋和陆地表面变暖的主要因素。夏季辐射的增强通过加热地表使气温和海温上升,而冬季辐射的减弱则使气温和海温下降^[32]。气温和海温的升高通过间接机制进一步加速海冰融化,并形成正反馈循环,从而增强了海冰的季节性变化规律。具体而言,气温升高会延迟冬季海冰的形成,缩短冻结期,而海温升高则加速海冰的退缩,阻碍新冰形成^[33]。研究表明,2013—2019年,北极海冰面积的变化与气温和海表温度之间存在显著的负相关关系,且海冰变化对温度存在滞后效应^[34-36]。太阳辐射与海冰的相互作用复杂,影响着北极海冰的季节性变化,由太阳辐射引起的气温和海表温度变化也与海冰面积的增长和消融密切相关。了解这些因素的相互关系对于未来北极航道的开发具有重要意义。

2020年之前,东北航道可通航天数呈波动上升趋势,并在2020年达到峰值。然而,2021—2023年,两个数据集的可通航天数均出现显著下降。具体而言,基于OUC2数据解译出的可通航天数从峰值105天下降至最低37天,基于OUC3数据解译出的可通航天数从峰值104天下降至最低29天。2021—2023年,东北航道通航性差主要受到拉普捷夫海和东西伯利亚海区域的海冰影响,大气环流状态的变化使海冰输运至该区域并堆积,从而堵塞航道,导致可通航天数的减少。研究表明,北极地区大气与海洋环流各因素的协同变化对北极海冰的消融具有重要影响^[37]。此外,局地大气环流变化的内部变率对预测2016—2045年海冰范围变化的不确定性的贡献率为12%~17%,这表明大气环流对海冰范围贡献的定量估计有显著影响^[38]。大尺度环流异常还会通过大气-海冰-海洋之间的相互作用对北极海冰厚度变化产生影响^[39]。环流状态变化是通过动力学和热力学过程对北极海冰密集度产生的影响^[40],其热力学过程表现在北极偶极子型大气环流(Arctic Dipole, AD)、北极涛动(Arctic Oscillation, AO)和北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)3种北极大气环流型能够引起瞬变热量输送

的协同变化,进而影响夏季北极海冰的变化。当巴芬湾西部和格陵兰岛东部均输出热量时,将有利于波弗特海南部、喀拉海的海冰融化,而拉普捷夫海的海冰反而会增多^[41]。Liang等^[42-43]通过量化拉普捷夫海与东西伯利亚海的海冰融化开始时间差异,探讨了大尺度大气环流指数与海冰变化的关系,发现它们之间具有密切联系。动力学方面,海冰厚度变化主要由风和海流的共同驱动,两者影响海冰的输运和形变。桂大伟^[44]对海冰输运的时空变化及其与大气环流之间的关系进行了研究,发现北冰洋各海域间的海冰输运面积呈总体增加趋势;他还量化了东北航道及以北区域的海冰运动特征^[45],指出海冰北向漂移对东北航道的通航有显著影响,尤其是东西伯利亚海、拉普捷夫海和喀拉海区域的海冰面积变化与航道适航期密切相关。因此,明确环流状态变化对北极海冰输运及其分布的影响,对研究东北航道的适航性具有重要意义,为未来北极东北航道的开发和利用提供了宝贵的参考。然而,北极东北航道的开发仍面临许多挑战,包括海冰条件复杂、气候异常、环境保护以及航行安全性等问题,这些因素需要在综合考虑后加以解决。

5 结论

研究基于AMSR-E/AMSR2(OUC2)和FY-3D/MWRI(OUC3)两种逐日海冰密集度数据,采用目视解译和权重分析方法,分析了2003—2023年北极海冰面积变化及东北航道适航性。结论如下:

①两种数据在海冰面积季节变化和通航关键区域方面均表现出一致性。但是,由于OUC2数据的空间分辨率高于OUC3数据,导致OUC2识别出的海冰面积范围相较于OUC3更广,基于OUC2数据解译出的可通航天数总体上高于OUC3数据,因此,OUC2数据在精度和可靠性方面优于OUC3数据。

②北极海冰面积变化具有明显的季节循环性。4—9月海冰面积逐渐减少约70%,而10月—次年3月,海冰面积逐渐增长约95%。海冰季节性变化主要受太阳辐射驱动,由太阳辐射引起的气温和海表温度变化通过间接作用机制使其特征更加显著。

③影响东北航道整体通航能力的关键区域为

维利基茨基海峡、北地群岛、新西伯利亚群岛和东西伯利亚海,7—10月东北航道逐月通航关键区域依次为东西伯利亚海、维利基茨基海峡、北地群岛和维利基茨基海峡。

④2020年之前,东北航道可通航天数呈波动上升趋势,并在2020年达到峰值;而2021—2023年,两个数据集显示的可通航天数均出现显著下降(OUC2数据从105天降至37天,OUC3数据从104天降至29天)。东北航道通航性下降主要由大气环流状态变化引起,其导致海冰输运到拉普捷夫海和东西伯利亚海区域堆积并堵塞航道,减少了可通航天数。

参考文献:

- [1] 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): 168.
- [2] 彭振武, 王云闯. 北极航道通航的重要意义及对我国的影响[J]. *水运工程*, 2014(7): 86-89.
PENG Z W, WANG Y C. Significance and domestic impact of navigable Arctic channel[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2014 (7): 86-89.
- [3] 国际船舶网. 深度: 北极航道的优与劣[EB/OL]. 航运交易公报. (2017 - 6 - 6). https://www.eworldship.com/html/2017/ship_inside_and_outside_0606/128794.html.
International Ship Network. Depth: advantages and disadvantages of the Arctic passage[EB/OL]. *Shipping Transactions Bulletin*. (2017 - 6 - 6). https://www.eworldship.com/html/2017/ship_inside_and_outside_0606/128794.html.
- [4] 胡麦秀, 冀丙蕾. 依托北极东北航道建设“冰上丝绸之路”研究综述[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(2): 12-18.
HU M X, JI B L. A summary of studies on the 'ice silk road' based on the construction of the Arctic northeast passage[J]. *Ocean Development and Management*, 2020, 37(2): 12-18.
- [5] 李振华. 基于冰情分析的北极东北航道通航条件研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
LI Z H. Research on the navigability of the Arctic northeast passage based on sea ice conditions[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [6] 左正道, 高郭平, 程灵巧, 等. 1979—2012年北极海冰运动学特征初步分析[J]. *海洋学报*, 2016, 38(5): 57-69.
ZUO Z D, GAO G P, CHENG L Q, et al. Preliminary analysis of kinematic characteristics of Arctic sea ice from 1979 to 2012[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(5): 57-69.
- [7] 郝光华, 赵杰臣, 李春花, 等. 2017年夏季北极中央航道海冰观测特征及海冰密集度遥感产品评估[J]. *海洋学报*, 2018, 40(11): 54-63.
HAO G H, ZHAO J C, LI C H, et al. The sea ice observations and assessment of satellite sea - ice concentration along the Central arctic passage in summer 2017[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(11): 54-63.
- [8] 王蔓蔓. 1979—2017年北极航道冰情变化研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
WANG M M. Research on sea ice condition of Arctic passage in 1979—2017[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [9] 刘国宠. 北极东北航道海冰时空变化分析与通航期预测[D]. 青岛: 山东科技大学, 2022.
LIU G C. Spatio - temporal variation analysis and navigation period prediction of sea ice in the northeast passage of the Arctic [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2022.
- [10] 陆海鸣. 2021年商船北极东北航道航行回顾及思考[J]. *世界海运*, 2022, 45(1): 1-5.
LU H M. Review and Reflection on the 2021 merchant ship navigation in the northeast passage of the Arctic[J]. *World Shipping*, 2022, 45(1): 1-5.
- [11] 马龙, 王加跃, 刘星河, 等. 北极东北航道通航窗口研究[J]. *海洋预报*, 2018, 35(1): 52-59.
MA L, WANG J Y, LIU X H, et al. Research in navigable windows of the northwest passage[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35 (1): 52-59.
- [12] 顾小壮, 王星东, 王真真. 基于逐日海冰密集度的北极东北航道通航性分析[J]. *河南科技*, 2019, 38(13): 134-135.
GU X Z, WANG X D, WANG Z Z. Navigability analysis of northeast Arctic channel based on day-to-day sea ice density[J]. *Henan Science and Technology*, 2019, 38(13): 134-135.
- [13] PANG X P, ZHANG C L, JI Q, et al. Analysis of sea ice conditions and navigability in the Arctic northeast passage during the summer from 2002—2021[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2023, 26(3): 465-479.
- [14] 张丽. 北方海航道法律地位研究[D]. 重庆: 西南政法大学, 2018.
ZHANG L. The study of the legal status of the northern sea route [D]. Chongqing: Southwest University of Political Science and Law, 2018.
- [15] 王洛, 赵越, 刘建民, 等. 中国船舶首航东北航道及其展望[J]. *极地研究*, 2014, 26(2): 276-284.
WANG L, ZHAO Y, LIU J M, et al. China's first trans-arctic voyage and related expectations[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(2): 276-284.
- [16] 黄睿, 王常颖, 李劲华, 等. 三种海冰密集度产品的北极海冰监测能力比较分析[J]. *极地研究*, 2022, 34(4): 471-484.
HUANG R, WANG C Y, LI J H, et al. Comparative analyses of Arctic sea ice monitoring capability of three sea ice concentration products[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2022, 34(4): 471-

- 484.
- [17] 尹鹏, 王常颖, 杨俊钢. 长时间序列北极海冰密集度遥感数据的比较评估[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 734-744.
YIN P, WANG C Y, YANG J G. Comparison and assessment of long-time series sea ice concentration remote sensing datasets in the Arctic[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 734-744.
- [18] HAO G H, SU J. A study on the dynamic tie points ASI algorithm in the Arctic Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(11): 126-135.
- [19] HAO H R, SU J, SHI Q, et al. Arctic sea ice concentration retrieval using the DT-ASI algorithm based on FY-3B/MWRI data [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2021, 40(11): 176-188.
- [20] 梅安新. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
MEI A X. An introduction to remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [21] 张安定. 遥感原理与应用题解[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHANG A D. Principle and application of remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [22] 黄季夏, 张天媛, 曹云锋, 等. 北极海冰消融情景下东北航道通航性能演变分析[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1051-1064.
HUANG J X, ZHANG T Y, CAO Y F, et al. The evolution of navigation performance of northeast passage under the scenario of Arctic sea ice melting[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1051-1064.
- [23] 李航. 统计学习方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
LI H. Statistical learning methods[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2012.
- [24] 雷国本. 决策理论与方法[M]. 成都: 天地出版社, 2006.
LEI G B. Decision-making theory and method[M]. Chengdu: Tiandi Press, 2006.
- [25] 张婷婷. 遥感技术概论[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011.
ZHANG T T. Introduction to remote sensing technology[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2011.
- [26] 苏远超, 许若晴, 高连如, 等. 基于深度学习的高光谱遥感图像混合像元分解研究综述[J]. 遥感学报, 2024, 28(1): 1-19.
SU Y C, XU R Q, GAO L R, et al. Development of deep learning-based hyperspectral remote sensing image unmixing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(1): 1-19.
- [27] PEROVICH D K, NGHIEM S N V, MARKUS T, et al. Seasonal evolution and interannual variability of the local solar energy absorbed by the Arctic sea ice-ocean system[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2007, 112(C03): C03005.
- [28] 陆云波, 王伦澈, 牛自耕, 等. 2000—2017年中国区域地表反照率变化及其影响因素[J]. 地理研究, 2022, 41(2): 562-579.
LU Y B, WANG L C, NIU Z G, et al. Variations of land surface albedo and its influencing factors in China from 2000 to 2017[J]. Geographical Research, 2022, 41(2): 562-579.
- [29] CHOI Y S, HWANG J, OK J, et al. Effect of Arctic clouds on the ice-albedo feedback in midsummer[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(10): 4707-4714.
- [30] PEROVICH D K, LIGHT B, EICKEN H, et al. Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979—2005: attribution and role in the ice-albedo feedback[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(19): L19505.
- [31] YIN Q Z, WU Z P, BERGER A, et al. Insolation triggered abrupt weakening of Atlantic circulation at the end of interglacials[J]. Science, 2021, 373(6558): 1035-1040.
- [32] NAGOVITSYN Y A. Specific features in the effect of solar activity on the earth's climate changes[J]. Geomagnetism and Aeronomy, 2014, 54(8): 1010-1013.
- [33] ARNDT S, NICOLAUS M. Seasonal cycle and long-term trend of solar energy fluxes through Arctic sea ice[J]. The Cryosphere, 2014, 8(6): 2219-2233.
- [34] 索飞, 乐红安, 黄国平. 基于 AMSR-E 海冰密集度北极海冰信息提取与分析[J]. 智库时代, 2019(32): 220-221.
SUO F, LE H A, HUANG G P. Arctic sea ice information extraction and analysis based on AMSR-E sea ice concentration [J]. Think Tank Era, 2019(32): 220-221.
- [35] 魏立新, 邓小花, 县彦宗, 等. 2007与2008年夏季北极海冰变化特征及原因的对比分析[J]. 海洋预报, 2013, 30(2): 1-7.
WEI L X, DENG X H, XIAN Y Z, et al. Comparative analysis of Arctic sea ice variation in summer 2007 and 2008[J]. Marine Forecasts, 2013, 30(2): 1-7.
- [36] MATSOUKAS C, HATZIANASTASSIOU N, FOTIADI A, et al. The effect of Arctic sea-ice extent on the absorbed (net) solar flux at the surface, based on ISCCP-D2 cloud data for 1983—2007[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(2): 777-787.
- [37] 李淑瑶, 崔红艳. 1982~2001年与2002~2021年北极秋季海冰的时空变化及原因[J]. 海岸工程, 2022, 41(2): 162-172.
LI S Y, CUI H Y. The spatial-temporal variation of Arctic autumn sea ice and its impact factors in 1982-2001 and 2002-2021[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 162-172.
- [38] SHEN Z L, DUAN A M, LI D L, et al. Quantifying the contribution of internal atmospheric drivers to near-term projection uncertainty in september Arctic sea ice[J]. Journal of Climate, 2022, 35(11): 3427-3443.
- [39] 王昀, 李雪薇, 王今菲, 等. 北极海冰厚度的热力学和动力学影响因素研究评述[J]. 极地研究, 2023, 35(1): 124-138.
WANG Y, LI X W, WANG J F, et al. Overview on the thermodynamic and dynamic factors influencing Arctic sea ice thickness[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2023, 35(1): 124-138.
- [40] LIANG Y, BI H B, WANG Y H, et al. Role of atmospheric factors in forcing Arctic sea ice variability[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(9): 60-72.
- [41] WANG L, ZHANG L J, YANG W F. The impact of concurrent variation of atmospheric meridional heat transport in western

- Baffen Bay and eastern Greenland on summer Arctic sea ice[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(8): 14-23.
- [42] LIANG H J, SU J. Variability in sea ice melt onset in the Arctic northeast passage: seesaw of the Laptev Sea and the East Siberian Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(10): e2020JC016985.
- [43] LIANG H J, ZHOU W. Dynamic and thermodynamic processes related to sea-ice surface melt advance in the Laptev Sea and East Siberian Sea[J]. *The Cryosphere*, 2024, 18(8): 3559-3569.
- [44] 桂大伟. 北极海冰输运以及冰场形变特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
- GUI D W. Characteristics of sea ice motion and deformation in the Arctic using sea ice motion product[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.
- [45] GUI D W, PANG X P, LEI R B, et al. Changes in sea ice kinematics in the Arctic outflow region and their associations with Arctic northeast passage accessibility[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(8): 101-110.

Study on the changes of Arctic sea ice area and the navigability of the Arctic Northeast Passage

JIANG Pan¹, GAN Binrui^{1,2,3}, YANG Shengfa^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Hehai College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Chongqing Jiaotong University National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing 400074, China)

Abstract: To study the changes in sea ice conditions and navigability of the Arctic Northeast Passage, based on the daily Arctic sea ice concentration from the AMSR-E/AMSR2 (OUC2) and FY-3D/MWRI (OUC3) data, we investigate sea ice area variability and the navigability of the Northeast Passage (NEP) from 2003 to 2023 using the eye interpretation and weighting analysis methods. The results show that: Both datasets show consistency in seasonal sea ice variations and key navigable regions, and the OUC2 data with a higher spatial resolution presents a broader sea ice area and yields higher navigable days compared to the OUC3 data. The Arctic sea ice area changes follow a clear seasonal cycle, decreasing by approximately 70% from April to September and increasing by about 95% from October to next March, primarily driven by solar radiation and the associated air temperature and sea surface temperature changes. The key regions affecting the navigability of the NEP are Vilkitsky Strait, Severnaya Zemlya Islands, New Siberian Islands, and the East Siberian Sea. The navigable days of the NEP in both datasets have a fluctuating upward trend before 2020, but significantly decrease between 2021 and 2023 (OUC2: from 105 days to 37 days; OUC3: from 104 days to 29 days), primarily due to changes in atmospheric circulation leading to the accumulation of sea ice in the Laptev Sea and East Siberian Sea, which blocks the passage and reduces navigable days.

Key words: Northeast Passage; Arctic; sea ice area; navigability