

北极东北航道通航窗口计算与分析

刘艳花¹, 何亚文^{1,2*}, 冯都贤¹, 李永恒¹

(1. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580; 2. 青岛中科蓝底信息科技有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 使用美国冰雪中心发布的海冰密集度数据集, 对1979—2022年北极区域海冰密集度数据进行时空分析; 提出基于Dijkstra最短路径算法的通航窗口改进算法, 计算并分析了东北航道的通航窗口, 确定了通航航道及周期; 进一步分析并确定了影响东北航道通航性的关键区域。研究结果表明: 1979—2022年北极区域海冰密集度持续减少, 年减少约0.18%; 1979—2022年间共有25年存在通航窗口, 平均通航窗口起始多在7月下旬—8月上旬, 结束多在10月上中旬, 周期变化较大; 影响东北航道通航期的关键区域为中段海域。

关键词: 北极海冰; 东北航道; Dijkstra算法; 通航窗口

中图分类号: P731.32; P727 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)01-0023-09

0 引言

自1979年以来, 北极的变暖速度几乎达到全球平均水平的4倍^[1], 尤其在北半球的夏秋季, 北极海冰减少的态势持续加剧^[2-3], 融冰期不断延长, 多年冰的范围逐渐缩减^[4]。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的气候模式预测得知, 至21世纪中叶, 夏季北极海域的海冰极有可能完全消失^[5-6]。

北极地区作为地球的重要组成部分, 其独特的地理位置和环境特征具有重要的研究价值。多年来, 北极地区的海冰一直是航运和资源开发的主要障碍之一。然而, 由于全球气候变化导致的温室效应和海洋加热, 北极海冰的覆盖面积和海冰厚度均在减少, 这为北极航道的开辟带来了新的契机^[7]。据统计, 东北航道通航后, 船舶经东北航道与通过苏伊士运河相比, 将至少可节省约30%的航行时间和25%的航行费用^[8]。由于北极海冰的存在, 东北航道并非全年都可以通航, 而是存在一定的通航期^[9]。

通航窗口计算的方法主要分两种。一种是海冰密集度阈值法, 如JI等^[10]和李振华^[11]参考了2013年穿越北极的“永盛轮”商船的破冰能力, 基于40%的海冰密集度阈值定义了窗口期算法。季青等^[12]在对北极东北航道的通航性进行分析时, 使用海冰密集度阈值法(50%)来建立船舶的安全航行标准。根据该标准定义的窗口期为当海冰密集度 $\leq 50\%$ 时, 船舶可以安全航行。马龙等^[13]选择用15%的海冰密集度阈值来定义航道通航窗口。另一种是基于极地操作限制评估风险指数系统(Polar Operational Limit Assessment Risk Indexing System, POLARIS)。王辉等^[14]以“永盛轮”为参考, 将航行风险量化为北极水域风险指数结果(Risk Index Outcome, RIO), 将航道可通航的阈值设置为RIO值 ≥ 0 的航段占总航道的90%以上, 通航窗口定义为航道中 $\geq 90\%$ 的像元的RIO值 ≥ 0 , 并且剩余 $\leq 10\%$ 的像元可以进行高风险操作或短程破冰安全通过。CHEN等^[15]利用POLARIS系统评估了低/无破冰能力的船舶在西北航道沿线关键海域/海峡的通航能力, 以及破冰等级在PC6及以上船舶在西北航道的

收稿日期: 2024-03-05。

基金项目: 国家自然科学基金(4197060184)。

作者简介: 刘艳花(2001-), 女, 硕士, 主要从事海洋地理数据分析与建模工作。E-mail: lyheduuu@163.com

*通信作者: 何亚文(1985-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海洋信息时空挖掘方法研究。E-mail: heyw@upc.edu.cn

通航能力^[16]。MAHMOUD等^[17]基于POLARIS系统评估了2030年、2040年和2050年东北航道沿线不同船型的航行可行性。以上研究列举了几种北极航道窗口期的算法,但都未最大程度地利用东北航道,有关研究结果难以有效支持航运企业对北极航道的利用。本研究在安全高效地通过东北航道的前提下,基于Dijkstra最短路径算法的通航窗口改进算法来计算通航期。

本研究基于美国冰雪数据中心1979—2022年海冰密集度数据,分析过去44年北极区域东北航道的海冰时空变化特征,用改进算法获取东北航道的通航窗口,分析影响东北航道的关键海域。通过本文研究,可以全面了解近44年来东北航道海冰的时空变化和通航条件的变化特征,为今后东北航道的开发利用提供一定的参考。

1 研究数据与方法

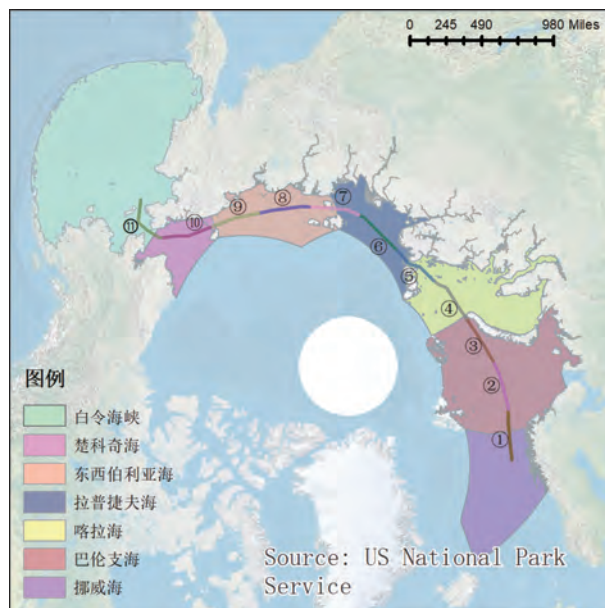
1.1 研究区域

北极地区指北纬 $66^{\circ}34'$ (北极圈)以北的区域,包括北冰洋的大部分,以及沿岸亚洲、欧洲、北美洲的陆地和岛屿。北极气候严寒,多数区域被冰雪覆盖。北极航道是指穿越北冰洋、连接太平洋和大西洋的海上航道集合。北极航道的通航时间通常受季节和冰情限制。北极航道可分为东北航道、西北航道和北冰洋中央航道^[18],本文主要研究东北航道及其所涉及的海域。

东北航道是连接北太平洋和北大西洋的海上通道,起点为俄罗斯,然后从北欧出发,向东穿过北冰洋挪威海、巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海和楚科奇海,直到白令海峡(见图1)。东北航道作为北极航道中的一条关键航道,具有缩短航行时间、节约航行费用、避开高风险区域等优势^[19]。随着北极海冰的消融加快,东北航道的重要性和可行性也在不断增加。

1.2 研究数据

本研究的基础数据集为美国国家雪冰数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)的逐日海冰密集度数据。该数据集来源于Nimbus-7 SMMR和DMSP SSM/I-SSMIS无源微波数据的海



注:序号表示将东北航道分为11段,①表示第一天航行的距离,以此类推

图1 研究区域及其重点海域

Fig.1 The study area and its priority sea areas

冰密集度版本2(网址:<https://nsidc.org/data/nsidc-0051>),数据集利用微波遥感传感器(SMMR,SSM/I、SSMIS)提供的亮度温度数据并运用NASA Team算法反演生成。该数据集的空间分辨率为25 km,时间分辨率为逐日,时间覆盖范围为1978年10月至今^[20],本研究选取的时间范围为1979—2022年。NASA Team算法首先分别反演一年冰和多年冰的海冰密集度,进而求和获得总海冰密集度^[21]。

本研究所用的NSIDC的海冰密集度数据分辨率较低(25 km),但鉴于不莱梅大学的高分辨率数据(6.25 km)因仪器停止工作而中断,为保证时间序列的连续性,本研究最终选用25 km分辨率的数据集。NSIDC发布的数据集已被广泛应用于海冰变化研究^[22],它为北极地区提供了海冰详细信息,已取得了良好的研究成果。

1.3 航道通航窗口计算方法

航道航行窗口是指海冰密集度不影响船舶在航道中安全航行的时段,它反映了航道所在海域的海冰状况。根据SHIBATA等^[23]对海冰密集度和海冰航行条件的描述,当海冰密集度为10%~30%时,

海面上仅有少量碎冰且十分稀疏,通行非常流畅;当海冰密集度大于40%时,海面存在大量互不相连的碎冰,航行较为困难。因此,本文将海冰密集度小于40%的栅格单元设置为可通行状态。

依据东北航道起止点坐标结合各类船舶的航速(见表1),取航速为13节,以船舶在东北航道连续航行为条件,计算得到船舶的平均通行天数约为11天,本文约定船舶在11天内可以通过北极。

表1 各类船舶参数汇总表

Tab.1 Summary of parameters for each type of ship

船舶类型	船舶名称	航速范围/节	航行天数
科考船	雪龙号	10	12
	极星号	10	389
运输船	集装箱船	20~25	6~7
	散货船	12~18	8~11.5
	油轮	12~16	9~11.5
海洋工程船	海洋工程船	10~20	7~12

以航行天数11天作为条件,通过通航窗口改进算法计算通航期,根据不同海域的海冰密集度确定最佳航道路线。该算法的核心思想是判断从某天出发,是否存在一条路径确保船舶在11天内通过北极。

该通航窗口算法的改进之处在于:①采用动态规划的思想,将东北航道分解为11段,并在后续分段过程中动态调整和利用之前的行驶路径;②同时考虑多个目标,如东北航道总长度、海冰密集度、船舶平均航速等,实现多目标之间的权衡和优化。

改进后的算法优势在于:①可以实时处理不断变化的海冰数据,及时更新最佳航道路线。这种灵活性使算法能够适应北极海冰的动态变化;②能够更精确地评估海冰对航行的影响,将海冰的阻碍作用充分纳入路径规划中,从而保证计算出的通航窗口和最佳航线更符合实际航行需求;③不仅适用于特定条件下的东北航道,还可以应用于其他具有复杂环境和动态变化因素的航运场景,方法具有较强的通用性和扩展性。

最佳航道路线算法流程见图2。具体步骤为:

①输入船舶出发日期及当日海冰密集度栅格数据,判断航道标号第一天(见图1中①位置)是否存在可通行路径,可通行则进入下一步,不可通行则输入次日继续判断。

②基于第一步,再次输入次日日的海冰密集度栅格数据,判断航道第二天(见图1中②位置)是否存在可通行的路径,可通行则重复第二步,反之,则不可通行。

③若航道存在不可通行的路径,即在11天内无法到达终点,则之前满足条件的航段不能认为是窗口期,需返回第一步重新开始上述步骤进行判断。

④若航道所有航段均可通行,即在11天内可以到达终点,则这11天是一个完整的通航窗口周期,保存并输出船舶的出发时间。

⑤输入每年海冰密集度数据,重复上述步骤,计算出北极东北航道的通航窗口周期。

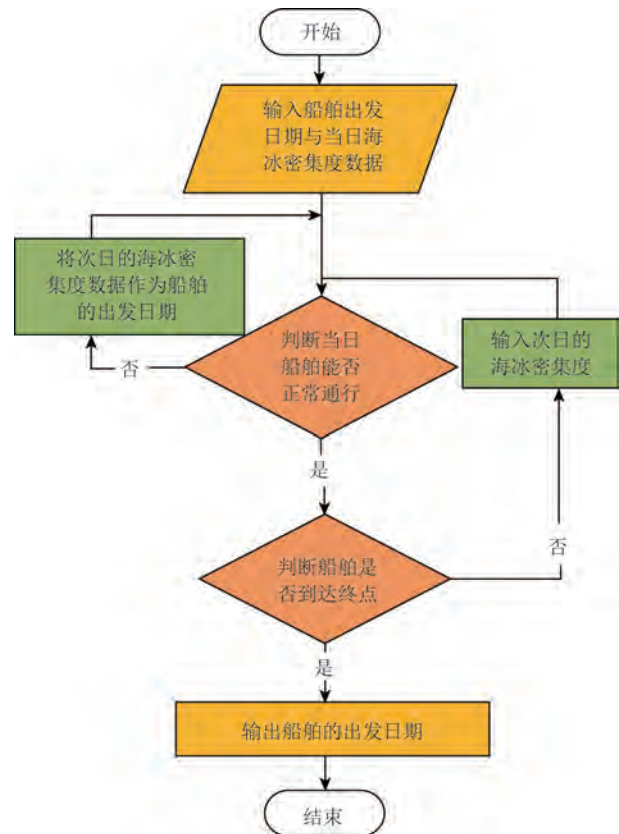


图2 北极航道通航窗口算法流程图

Fig.2 Flowchart of the algorithm for calculating the window period of the Arctic shipping lanes

2 结果与分析

2.1 北极区域冰情时空分析

对北极海冰密集度的气候态平均变化进行统计分析,可以得到年际变化特点,图3显示了1979—2022年的年平均海冰密集度以及变化趋势。在44年中,北极区域整体海冰密集度呈现缓慢的下降趋势,每年约减少0.18%;年平均拟合曲线(见图3红色虚线)同样为下降趋势。具体计算可知,44年间的平均海冰密集度为52.38%,大致以2005年为分界线,2005年之前大部分高于年平均值,仅有1987年略低,而2005年之后均低于年平均值。

本研究计算出的北极区域年平均海冰密集度的变化与相关研究的结果基本一致。例如,吴展

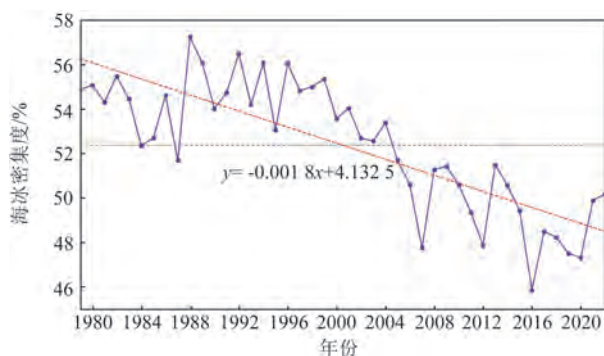


图3 1979—2022年北极区域年平均海冰密集度变化图

Fig.3 Changes in annual mean sea ice concentration in the Arctic from 1979 to 2022

开^[24]研究得到了1979—2018年北极年平均海冰密集度呈缓慢的下降趋势,且以每年0.001的速度减少。近年来,温室气体的排放和人类活动对全球气候的影响变得越来越显著,也加速了北极海冰的消融,因此1979—2022年的年平均海冰密集度变率较1979—2018年更快。

从1979—2022年北极区域海冰密集度的气候平均态分布以及最大/小值的气候态分布可见(见图4),海冰密集度的大值区位于东北航道的东部、中部航段,平均密集度达到65%以上的海域有东西伯利亚海、拉普捷夫海及喀拉海。1988年为最大正距平值,海冰密集度为57.24%,属于重冰年,除白令海峡和挪威海外,其余海峡的平均海冰密集度均达到65%以上;2016年为最大负距平值,海冰密集度为45.87%,属于轻冰年,东北航道仅有小部分海域(东西伯利亚海与拉普捷夫海)的海冰密集度较大,达到65%以上。

2.2 东北航道通航窗口计算

本研究统计了1979—2022年东北航道每年的通航开始/结束日期和通航周期,能否通航是根据东北航道相关海域的海冰密集度确定的,即海冰密集度 $\leq 40\%$ 时,存在一条路径可确保船舶在11天内完整通过北极(11天被认为是一个通航周期),则认为东北航道这一年是可通航的。由于1979—1989年间东北航道一直存在高密集度的海冰,航道未开通,故没有窗口期。

东北航道1990—2022年的航道通航窗口周期

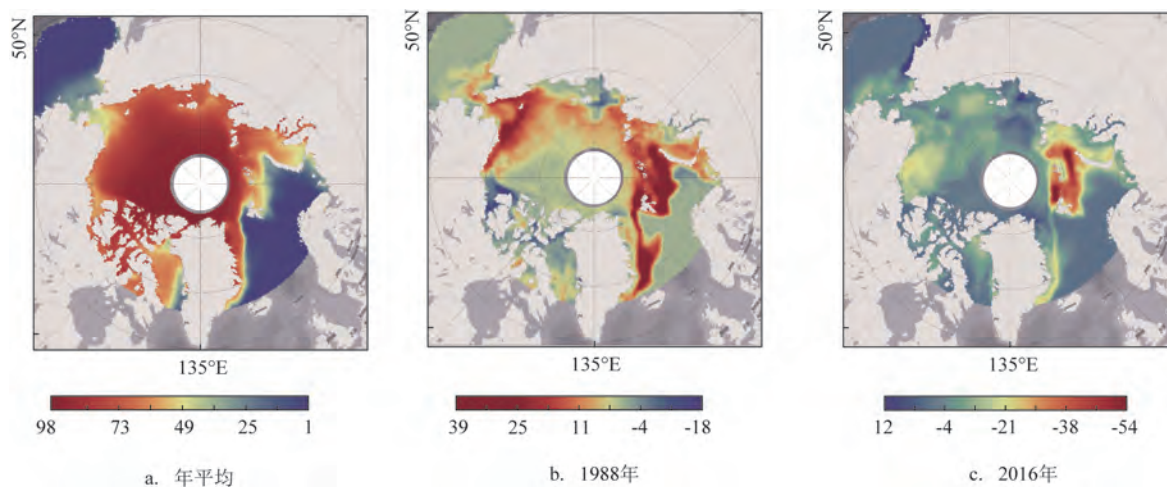


图4 1979—2022年北极区域海冰密集度的平均气候态分布(单位:%)

Fig.4 Climatic distribution of sea ice concentration in the Arctic from 1979 to 2022 (unit: %)

见表2,共有25年存在通航窗口。通航起始时间多在7月下旬—8月上旬,结束时间多在10月上中旬,平均通航期有60个周期(除去所有不能通航的年份),在存在通航周期的25年内,周期有较大的波动且没有明显的稳定变化趋势。

具体来看,1990—2000年:有6年存在通航窗口;通航周期变化较大,最大为1995年(73个),最小为1997(8个),有4年的通航周期达到30个以上。2001—2011年:除2001年、2003年、2004年外均有通航窗口;通航周期变化较大,基本在30~90个;2005年后每年均有通航窗口,且之后海冰密集度小于44年的年平均值。2012—2022年:每年均有通航窗口;通航周期变化较小,基本在50~110个,除2013年外均超过60个。李新情等^[25]也对2014年夏季东北航道的海冰变化进行了分析,发现航道开放时间大致为8月初—10月初,这与本研究获得的2014年的实际航行结果正好吻合。

2.3 东北航道通航窗口验证

本文计算的通航周期也得到相关研究的验证(见表3)。表中近半数以上船舶(均为独立航行)的航行天数为11天,也证明11天作为东北航道通航周期的合理性。

2.4 东北航道关键区域冰情及通航性分析

1979—2022年,东北航道涉及的关键区域通航期的气候平均态分布见图5。结果显示,关键区域通航期的海冰密集度融冰期、结冰期变化明显且各海域变化差异较大。

东北航道东段(包括白令海峡、楚科奇海、东西伯利亚海和拉普捷夫海东部)的海冰在通航开始(见图5a)和结束时(见图5d)对通航影响较大,是航道中海冰变化较大的航段。此航段受到极寒气候和季节性冰情的影响,在通航开始之前被大量积冰

表2 1979—2022年东北航道通航时间表

Tab.2 Northeast Passage Navigation Schedule 1979—2022

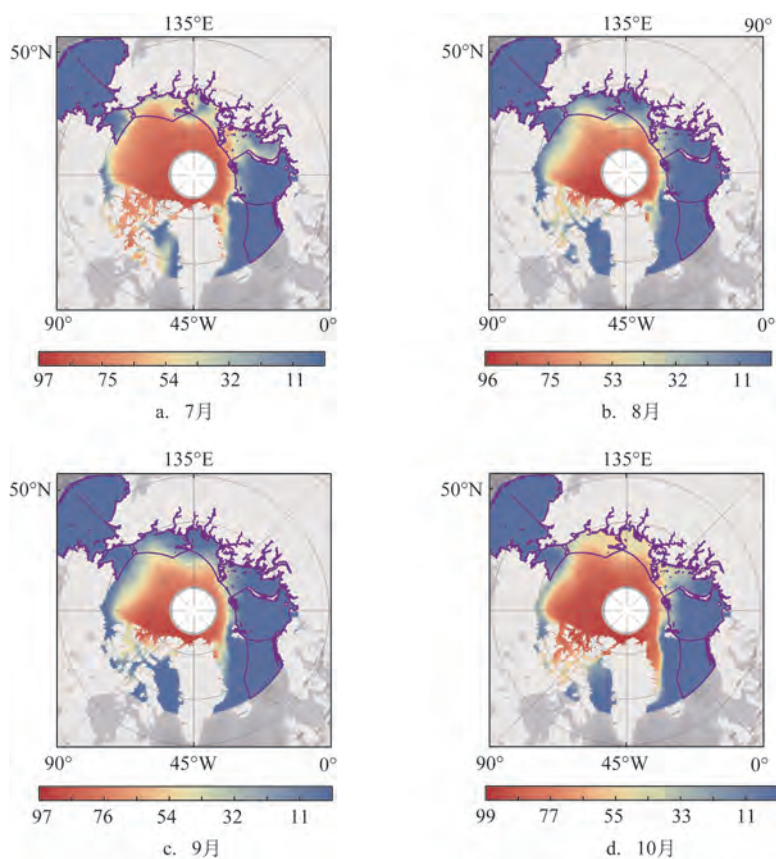
年份	通航开始日期	通航结束日期	通航周期/个	年份	通航开始日期	通航结束日期	通航周期/个
1990	8月20日	9月22日	26	2007	8月5日	10月4日	60
1991	—	—	0	2008	8月11日	10月1日	52
1992	—	—	0	2009	8月13日	10月11日	56
1993	—	—	0	2010	8月4日	10月3日	61
1994	—	—	0	2011	7月17日	10月13日	89
1995	7月28日	10月8日	73	2012	7月25日	10月19日	82
1996	—	—	0	2013	8月9日	10月1日	53
1997	9月14日	9月24日	8	2014	7月29日	10月5日	69
1998	8月10日	10月2日	50	2015	7月17日	10月10日	86
1999	8月18日	9月23日	33	2016	8月11日	10月17日	68
2000	8月10日	9月24日	32	2017	7月25日	10月7日	72
2001	—	—	0	2018	7月29日	10月19日	83
2002	8月1日	9月16日	47	2019	7月7日	10月12日	96
2003	—	—	0	2020	7月7日	10月28日	112
2004	—	—	0	2021	7月30日	10月2日	64
2005	8月2日	10月10日	65	2022	8月12日	10月8日	57
2006	7月24日	9月27日	33				

注:通航周期值每一年所有通航期的总和,由单个通航期的出发日期替代该通航时间段,例:1990年有26个通航周期,8月22日为第一个周期(8月20日—9月1日)的起始日,代表第一个通航周期。

表 3 部分年份船舶航行天数表

Tab.3 Table of sailing days for selected ships

年份	船名	驶入地点及时间 (年-月-日)	驶出地点及时间 (年-月-日)	天数
2015	“天盛”	白令海峡 2015-7-28	挪威海 2015-8-8	11
2016	“天盛”	挪威海 2016-9-13	白令海峡 2016-9-22	9
2017	“天乐”	挪威海 2017-9-2	白令海峡 2017-9-14	12
	“天健”	白令海峡 2017-9-10	挪威海 2017-9-20	10
	“天福”	挪威海 2017-9-2	白令海峡 2017-9-14	11
2018	“天禄”	白令海峡 2018-9-15	挪威海 2018-9-26	11
	“天惠”	白令海峡 2018-9-26	挪威海 2018-10-9	13
2019	“天佑”	白令海峡 2019-9-5	挪威海 2019-9-16	11
	“天惠”	白令海峡 2019-9-9	挪威海 2019-9-20	11
	“大泰”	挪威海 2019-9-24	白令海峡 2019-10-5	11
2020	“天佑”	挪威海 2020-8-4	白令海峡 2020-8-15	11
	“大昌”	白令海峡 2020-9-9	挪威海 2020-9-19	10
	“天惠”	挪威海 2020-10-5	白令海峡 2020-10-16	11
2021	“大智”	白令海峡 2021-9-24	挪威海 2021-10-7	13



注:紫色区域为东北航道重点海域

图 5 1979—2022 年东北航道重点海域通航期的海冰密集度气候平均态分布 (单位: %)

Fig.5 Climatic distribution of sea ice concentration of navigational periods in the Northeast Passage area from 1979 to 2022(unit: %)

覆盖,导致航道封冻,无法通航,随着季节转暖,冰层开始融化,通航条件逐渐改善。

东北航道中段(包括拉普捷夫海西部和喀拉海东部)是影响航道开通的关键航段。此航段中的维利基茨基海峡是东北航道夏季无冰期最短、冰情最为严重的区域。此航道可通航天数的年际间变化较大,但从总体趋势上看,随着年份增加冰情逐渐变轻,通航天数不断增多。全球气候变暖导致北极冰盖融化,冰层形成和消融时间也发生变化,中段航道的冰情相对减轻,无冰期长度增加,通航机会提高。

东北航道西段(包括喀拉海西部及巴伦支海、挪威海)是可通航天数最多的航段,也是冰情最好的航段。相对于其他两个航段,西段的气候条件较为温暖,由于受到大西洋暖流的影响,海洋温度较高,有助于减少冰层的形成和堆积,相对较高的气温使得冰层融化速度较快,无冰期长度延长。

3 讨论

本研究虽然提出了一种通航窗口改进算法,然而,不同算法在定义窗口期时使用的海冰密集度阈值和其他参数的不同,可能会导致结果出现差异。未来研究可以进一步比较不同算法的优劣,并选择最适合的算法。

本研究结果为北极航道的开发利用提供了参考。东北航道作为我国“冰上丝绸之路”的重要通道,具有巨大的经济和战略价值。通过合理规划航道和利用通航窗口,可以缩短船舶航行距离和时间,提高航运效率,并避免经过高风险区域。然而,北极航道的开发利用还面临着诸多挑战,如海冰变化的不确定性、环境保护和安全性等问题,需要综合考虑各种因素。

4 结论

本文基于1979—2022年海冰密集度数据集,整理并分析了相应时间内东北航道的海冰密集度,基于此数据对整个北极区域和东北航道关键海域的冰情以及东北航道的通航性进行分析。结

论如下:

①1979—2022年北极区域的海冰密集度逐年减少,年下降率约为0.18%,这与全球变暖背景下北极地区升温幅度大于全球平均的现象相一致。

②利用通航窗口改进算法计算得到东北航道的通航窗口。1979—2022年间共有25年存在通航窗口,通航起始时间多在7月下旬—8月上旬,结束时间多在10月上中旬。通航窗口的年际周期变化较大,其受气候条件和海冰状况影响。

③东北航道中段是影响东北航道通航期的关键区域,这个区域的海冰密集度对通航窗口的起始和结束时间具有重要影响,进一步地研究和观测可以帮助我们更好地理解该海域的海冰变化和通航条件。

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] CAVALIERI D J, PARKINSON C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881-889.
- [3] ONARHEIM I H, ELDEVIK T, SMEDSRUD L H, et al. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(12): 4917-4932.
- [4] ALI A, DUNLOP P, COLEMAN S, et al. Glacier area changes in the Arctic and high latitudes using satellite remote sensing[J]. *Journal of Maps*, 2023, 19(1): 1-7.
- [5] OVERLAND J E, WANG M Y. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(10): 2097-2101.
- [6] SWEENEY A J, FU Q, PO-CHEDLEY S, et al. Internal variability increased Arctic amplification during 1980—2022[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(24): e2023GL106060.
- [7] 耿家营, 管磊, 吴凡, 等. 基于卫星数据的北极海冰变化分析[J]. *海洋技术*, 2014, 33(2): 8-13.
GENG J Y, GUAN L, WU F, et al. Analysis on the variation of Arctic sea ice using satellite data[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2014, 33(2): 8-13.
- [8] FARRÉA B, STEPHENSON S R, CHEN L L, et al. Commercial Arctic shipping through the Northeast Passage: routes, resources, governance, technology, and infrastructure[J]. *Polar Geography*, 2014, 37(4): 298-324.
- [9] 马龙, 李振华, 陈冠文, 等. 基于“永盛轮”航线冰情分析的北极东北航线通航性研究[J]. *极地研究*, 2018, 30(2): 173-185.
MA L, LI Z H, CHEN G W, et al. Research on the navigability of

- the Arctic Northeast Route based on sea ice conditions during the passage of M/V Yong Sheng[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2018, 30(2): 173-185.
- [10] JI M, LIU G C, HE Y W, et al. Analysis of sea ice timing and navigability along the Arctic Northeast Passage from 2000 to 2019 [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(7): 728.
- [11] 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.
- [12] 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 Q, DONG J, PENG X P, 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.
- [13] 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.
- [14] 王辉, 安磊, 马龙, 等. 基于 POLARIS 的北极东北航道通航窗口研究[J]. 中国航海, 2022, 45(4): 23-29.
- WANG H, AN L, MA L, et al. Study on navigable window navigating through Arctic Northeast Passage based on POLARIS [J]. Navigation of China, 2022, 45(4): 23-29.
- [15] CHEN J L, KANG S C, WU A D, et al. Accessibility in key areas of the Arctic in the 21st mid-century[J]. Advances in Climate Change Research, 2023, 14(6): 896-903.
- [16] CHEN J L, KANG S C, WU A D, et al. Impacts of 1.5 °C global warming on hydrological conditions of navigation along the Northern Sea Route and Northwest Passage[J]. Advances in Climate Change Research, 2023, 14(6): 904-912.
- [17] MAHMOUD M R, ROUSHDI M, ABOELKHEAR M. Potential benefits of climate change on navigation in the Northern Sea Route by 2050[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 2771.
- [18] 刘森, 邹斌, 石立坚, 等. 基于 FY-3C 微波辐射计数据的极区海冰密集度反演方法研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(1): 113-122.
- LIU S, ZOU B, SHI L J, et al. Polar sea ice concentration retrieval based on FY-3C microwave radiation imager data[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(1): 113-122.
- [19] 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.
- [20] 陈诗怡, 曹云锋, 惠凤鸣, 等. 基于遥感观测的 2010~2017 年秋季北极东北航道通航能力时空变化[J]. 科学通报, 2019, 64(14): 1515-1525.
- CHEN S Y, CAO Y F, HUI F M, et al. Observed spatial-temporal changes in the autumn navigability of the Arctic Northeast Route from 2010 to 2017[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(14): 1515-1525.
- [21] CAVALIERI D J, GLOERSEN P, CAMPBELL W J. Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1984, 89(D4): 5355-5369.
- [22] 曹云锋, 梁顺林. 北极地区快速升温的驱动机制研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(26): 2757-2771.
- CAO Y F, LIANG S L. Recent advances in driving mechanisms of the Arctic amplification: a review[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(26): 2757-2771.
- [23] SHIBATA H, IZUMIYAMA K, TATEYAMA K, et al. Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980-2011[J]. Annals of Glaciology, 2013, 54(62): 139-148.
- [24] 吴展开. 基于遥感数据的极地海冰时空变化研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
- WU Z K. Study on temporal and spatial variation of polar sea ice based on remote sensing data[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.
- [25] 李新情, 慈天宇, 罗斯瀚, 等. 北极东北航道维利基茨基海峡海冰时空变化及适航性分析[J]. 极地研究, 2015, 27(3): 282-288.
- LI X Q, CI T Y, LUO S H, et al. Spatio-temporal variations of sea ice and navigability in the Arctic Vilkitsky Strait[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2015, 27(3): 282-288.

Calculation and analysis of the navigational window of the Arctic Northeast Passage

LIU Yanhua¹, HE Yawen^{1,2*}, FENG Duxian¹, LI Yongheng¹

(1. College of Oceanography and Spatial Information, China University of Petroleum (East China), Qingdao, 266580, China; 2. Qingdao Zhongke Landi Information Technology Co., LTD, Qingdao 266555, China)

Abstract: This paper used the sea ice concentration data set released by the National Snow and Ice Data Center to conduct spatiotemporal analysis of sea ice concentration data in the Arctic region from 1979 to 2022; An improved navigation window algorithm based on Dijkstra shortest path algorithm was proposed. The navigation window of the Northeast Passage was calculated, and the navigation channel and period were determined. The key areas affecting the navigability of the Northeast Passage are further analyzed. The results show that: the annual average sea ice concentration in the Arctic region decreased by about 0.18% per year. There were 25 years of navigable windows during 1979—2022. The average start period of navigable windows was late July to early August, and the end period of navigable windows was early and middle October. The cycle of navigable windows changed largely. The key area affecting the navigation period of the Northeast Passage is the middle section.

Key words: Arctic sea ice; Northeast Passage; Dijkstra's algorithm; navigational window