

基于CMIP6模式模拟的不同排放情景下的 2015~2100年北极通航风险评估

高千惠^{1,2}, 吴昊煜^{1,2}, 胡舒涵³, 赵传湖^{1,2*}, 黄 菲^{1,2}, 刘彬贤⁴

¹中国海洋大学透明北极山东省重点实验室, 山东 青岛

²中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

³航天天目(重庆)卫星科技有限公司, 北京

⁴天津海洋中心气象台, 天津

收稿日期: 2026年6月6日; 录用日期: 2026年7月4日; 发布日期: 2026年7月13日

摘 要

在全球变暖背景下, 北极海冰持续消退为北极航道通航提供了有利条件, 但近地面风场变化也增加了通航不确定性。本文基于CMIP6中对北极气候模拟性能较优的多模式集合平均结果, 构建综合考虑海冰厚度、海冰密集度与近地面10 m风速的海冰-风综合风险指数(CRI), 定量评估了SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5等四种情景下2015~2100年普通商船在东北航道、中央航道和西北航道的通航风险。结果表明: (1) 21世纪北极通航风险整体呈下降趋势, 但空间差异显著。高风险区主要位于格陵兰岛以北海域和加拿大北极群岛附近, 至21世纪末该区域CRI仍普遍高于0.4, 表明该区域在评估标准下仍不具备通航条件; 低风险区由欧亚边缘海向极区扩展, 在SSP5-8.5情景下超过60%海域可满足通航要求(CRI < 0.2)。 (2) 未来北极通航条件存在显著季节差异, 夏季最优、冬季最差。在中高排放情景下, 夏季东北和西北航道普遍具备通航条件(CRI < 0.2), 而冬季大部分区域CRI仍高于0.4, 无法通航, 表明季节性海冰覆盖仍是限制冬春季通航的主导因素。 (3) 在SSP2-4.5情景下, 西北航道夏季CRI下降40%~50%, 中央航道全年CRI下降25%~30%; 但在SSP5-8.5情景下, 夏季东北航道CRI后期出现小幅回升, 表明在海冰持续减少的背景下, 近地面10 m风速增强可能反而会增加通航风险。

关键词

北极航道, CMIP6, 通航风险, 综合风险指数, 近地面风速, 海冰

Risk Assessment of Arctic Navigability under Different Emission Scenarios Simulated by CMIP6 Models from 2015 to 2100

Qianhui Gao^{1,2}, Haoyu Wu^{1,2}, Shuhan Hu³, Chuanhu Zhao^{1,2*}, Fei Huang^{1,2}, Binxian Liu⁴

*通讯作者。

文章引用: 高千惠, 吴昊煜, 胡舒涵, 赵传湖, 黄菲, 刘彬贤. 基于 CMIP6 模式模拟的不同排放情景下的 2015~2100 年北极通航风险评估[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(4): 726-743. DOI: 10.12677/ccrl.2026.154077

¹Key Laboratory of Transparent Arctic, Ocean University of China, Qingdao Shandong²College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong³Aerospace Tianmu (Chongqing) Satellite Technology Co., Ltd., Beijing⁴Tianjin Marine Central Meteorological Observatory, Tianjin

Received: June 6, 2026; accepted: July 4, 2026; published: July 13, 2026

Abstract

Under the background of global warming, the continued retreat of Arctic sea ice provides favorable conditions for the navigability of Arctic shipping routes; however, changes in the near-surface wind field also introduce uncertainties to navigation. This study employs the multi-model ensemble mean of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) models that demonstrate superior performance in simulating Arctic climate conditions. A comprehensive Sea Ice-Wind Composite Risk Index (CRI) is developed, integrating sea ice thickness, sea ice concentration, and near-surface (10 m) wind speed, to quantitatively assess the navigational risks for ordinary merchant vessels along the Northeast Passage, the Central Arctic Passage, and the Northwest Passage from 2015 to 2100 under four scenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5. The results indicate: (1) In the 21st century, the overall navigational risk in the Arctic exhibits a declining trend, but with significant spatial heterogeneity. High-risk areas are primarily located in the seas north of Greenland and near the Canadian Arctic Archipelago, where the CRI remains generally above 0.4 by the end of the century, suggesting that these regions are still not navigable under the evaluation criteria. In contrast, low-risk areas expand from the Eurasian marginal seas toward the polar region, and under the SSP5-8.5 scenario, more than 60% of the Arctic waters meet the navigability requirement ($\text{CRI} < 0.2$). (2) Future Arctic navigability shows pronounced seasonal differences, being most favorable in summer and least in winter. Under medium-to-high emission scenarios, the Northeast and Northwest Passages are generally navigable in summer ($\text{CRI} < 0.2$), while in winter, most areas exhibit a CRI exceeding 0.4, rendering navigation infeasible. This indicates that seasonal sea ice cover remains the dominant factor restricting navigation in winter and spring. (3) Under the SSP2-4.5 scenario, summer CRI in the Northwest Passage decreases by 40%~50%, while the annual CRI along the Central Arctic Passage declines by 25%~30%. However, under the SSP5-8.5 scenario, a slight increase in summer CRI is observed in the later period along the Northeast Passage, suggesting that intensified near-surface (10 m) wind speeds may increase navigational risk despite ongoing sea ice reduction.

Keywords

Arctic Shipping Routes, CMIP6, Navigation Risk, Comprehensive Risk Index, Near-Surface Wind Speed, Sea Ice

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

20 世纪 80 年代以来, 北极海冰范围显著缩减、厚度持续变薄, 尤其是在北半球夏季开阔水域面积显著扩大[1]。多模式气候模拟表明, 21 世纪中叶北极夏季接近无冰状态的概率将显著上升[2]-[5]。其中, Notz and Stroeve [3]指出, 北极 9 月海冰面积与全球平均气温之间存在近似线性关系, 当全球升温达到 2℃

时, 夏季无冰概率将显著增加。在未来持续升温情景下, 海冰持续消退为北极航道通航条件改善提供了有利背景。

北极航道开发的战略与经济意义日益凸显。北极航道主要包括东北航道(Northern Sea Route, NSR)、西北航道(Northwest Passage, NWP)以及中央航道(Transpolar Sea Route, TSR)。近年来, 东北航道在夏秋季已实现阶段性商业通航运行。根据俄罗斯北方海航道管理局公布的数据, 2018年后NSR年货运量已突破2000万吨, 2023年约达3600万吨, 表明其正由试验性航行逐步向准业务化运营转变。然而, 北极航运活动仍受到许可制度、海冰冰情年际波动及保险成本等多重因素的制约。相比之下, 西北航道和中央航道受多年冰控制, 当前通航能力仍较为有限, 但在持续变暖背景下呈现出潜在开放趋势[6]。

北极环境的快速变化显著增加了航运安全与管理的不确定性[7]。在各类自然风险因素中, 海冰条件仍是制约北极航运的决定性因素[8]。为规范极地航行安全, 国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)于2014年通过《International Code for Ships Operating in Polar Waters》(Polar Code), 并于2017年正式生效。该规则建立了极地运行限制风险评估系统(POLARIS), 形成基于船级与海冰厚度及海冰密集度相结合的风险评估框架[9], 为冰区通航风险量化评估提供了统一的技术基础。除海冰因素外, 气象条件亦是影响北极航运安全的重要因素[10]。《Polar Code》明确指出, 极端低温、大风及能见度受限等均构成航行风险[9]。在实际风险评估实践中, 海冰密集度与风速常被作为刻画通航风险的核心指标[11][12]。

气候系统模式为揭示未来北极航道通航风险提供了重要的数据支撑[13]。Smith and Stephenson[14]指出, 到21世纪中叶北极沿岸航道的可通航期将显著延长; Melia *et al.* [15]的研究进一步表明, 在高排放情景下中央航道的通行概率将明显上升。Li *et al.* [16]指出, 在持续升温情景下东北航道和跨极航道的可通航期显著延长, 中央航道在高排放情景下逐步具备季节性通航潜力。上述研究表明, 未来北极航道的可通航能力总体呈增强趋势。然而, 在未来情景评估中, 多数研究主要基于海冰阈值或POLARIS框架开展分析, 侧重于海冰因素对通航能力的影响, 较少考虑风速变化带来的影响[5][17]。已有模式评估研究表明, CMIP6模式在北极近地面10 m风速模拟上存在显著的区域差异与模式离散性[18], 提示未来风场变化对航运风险的影响仍具有较大不确定性, 近地面风速增强带来的通航风险增大可能部分抵消海冰减少所带来的通航条件改善。因此, 在风-冰耦合作用框架下开展未来北极航道通航风险的综合评估具有重要的科学意义。

基于此, 本文在海冰风险评估框架基础上引入近地面10 m风速因子, 构建风-冰耦合综合风险指数(Comprehensive Risk Index, CRI), 系统分析2015~2100年不同排放情景下三条主要航道通航风险的变化特征及其季节差异, 为“冰上丝路”国家战略提供科学支撑, 并为未来北极航运风险管理提供决策参考。

2. 资料与方法

2.1. 数据

本文研究北极圈(66°34'N)以北区域的近地面10米风速变化特征, 使用8个对北极气候模拟技巧最优的CMIP6模式历史时期(1979~2014年)的月平均和日平均近地面10米风速数据(sfwind), 以及上述模式包含的SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5等四种共享社会经济路径下的2015~2100年月平均和日平均近地面10米风速数据(<https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/>) (表1)。其中, SSP表示由不同社会经济模式驱动的新排放情景, SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5情景分别表示2100年相对于工业化前水平的 $2.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $4.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $7.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的辐射强迫[19]。由于各个模式的网格大小和投影方式不同, 所以先将每个模式输出结果通过双线性插值方法插值在 $1^\circ \times 1^\circ$ 的规则水平网格上。

所用海冰密集度和厚度资料选取基于胡舒涵等[5]的研究结果。研究中使用了包含历史情景(historical)的 48 个 CMIP6 模式历史时期(1979~2014 年)的月平均海冰密集度数据(siconc)、海冰厚度数据(sithick 或 sivol)和近地面温度数据(tas), 以及上述模式包含的 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 等四种情景的未来时期(2015~2100 年)月平均海冰密集度数据和海冰厚度数据, 对这些数据进行双线性插值, 空间分辨率统一为 $1^\circ \times 1^\circ$, 然后计算了 1979~2014 的模式模拟和观测的北极海冰面积和平均海冰厚度。本文根据对 CMIP6 模式的综合评估结果, 选出了对北极气候模拟技巧最优的 12 个 CMIP6 模式(表 1), 该评估基于多个指标, 包括海冰面积和海冰厚度的平均值、线性趋势和年较差, 以及模式对全球变暖的响应能力和对海冰厚度的响应能力等。考虑到北极气候的季节变化规律, 将 1~3 月定义为冬季, 4~6 月为春季, 7~9 月为夏季, 10~12 月为秋季[20] [21]。

为评估 CMIP6 模式对北极气候要素的模拟能力, 本文选取多源观测及再分析资料作为参考基准。全球站点逐日平均风速资料为 1979~2014 年美国国家海洋和大气管理局 - 国家环境信息中心(National Oceanic and Atmospheric Administration-National Centers for Environmental Information, NOAA-NCEI)。使用的三套再分析数据集分别是来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)的第五代再分析数据(ECMWF Reanalysis v5, ERA-5) [22], 分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$; 来自美国气象环境预报中心 - 美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research, NCEP-NCAR)的大气再分析数据集 1.0 (Reanalysis 1.0), 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ [23]; 来自日本气象厅(Japan Meteorological Agency)的第二代全球大气再分析数据集(JRA-55)。

月平均海冰密集度的观测数据来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和 NSIDC 的被动微波海冰密集度气候数据记录第 4 版(Climatic Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version4), 空间分辨率为 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ [24]。月平均海冰厚度数据来自华盛顿大学 Zhang 和 Rothrock [25]研发的北极海冰海洋模拟与同化系统(Pan-Arctic Ice-Ocean Modeling and Assimilation System, PIOMAS), 该系统耦合了 POP (Parallel Ocean Program)海洋模式和海冰厚度焓分布模型 TED (Thickness and enthalpy distribution), 并同化来自卫星观测的最新海冰密集度和厚度数据集[26] [27]。

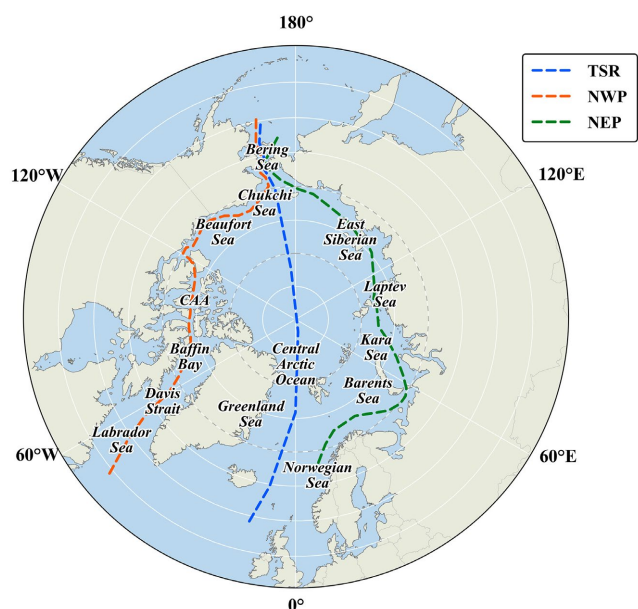


Figure 1. Schematic diagram of the Arctic sea routes. From left to right are the Northwest Passage (NWP), the Transpolar sea routes (TSR) and the Northeast Passage (NEP)

图 1. 北极航道示意图。从左往右分别是西北航道(NWP)、中央航道(TSR)和东北航道(NEP)

在评估海冰对北极变暖的敏感度方面, 为了减少北极月平均近地面 2 m 气温的不确定性, 使用了两套再分析数据集的集合平均值, 分别来自 ERA-5 [22], 分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 和 NCEP-NCAR [23], 分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。本文将上述数据均双线性插值到 1° 分辨率的经纬度网格中, 时间范围为 1979 年 1 月至 2014 年 12 月。

北极航道是指穿越北冰洋, 链接太平洋和大西洋的海上航线的集合。主要有三条北极航道(图 1), 分别是: (1) 西北航道, 大部分位于加拿大北极群岛水域, 从白令海峡出发, 向东经过阿拉斯加北部海域, 穿过加拿大北极群岛至戴维斯海峡; (2) 中央航道, 这是一条假设的从大西洋穿过北冰洋中心到太平洋的北极航道, 自白令海峡穿过北冰洋中心区域到达格陵兰海或挪威海; (3) 东北航道, 以白令海峡为起点, 沿着挪威和俄罗斯海岸, 途径白令海、东西伯利亚海、拉普捷夫海、喀拉海和巴伦支海, 至荷兰鹿特丹 [10] [28] [29]。本文采用的北极航道数据来自美国国家地理空间情报局(National Geospatial-Intelligence Agency, NGA), 将上述数据双线性插值到 1° 分辨率的经纬度网格中。

Table 1. The main information of CMIP6 models used for wind speed and sea ice
表 1. 用于计算风速和海冰的 CMIP6 模式信息

因子	模式名称	水平分辨率(经纬网格数)	模式名称	水平分辨率(经纬网格数)
风速	ACCESS-ESM1-5	360×300	IPSL-CM5A2-INCA	182×149
风速	CanESM5	360×291	IPSL-CM6A-LR	362×332
风速	NorESM2-LM	360×384	IPSL-CM6A-LR-INCA	362×332
风速	NorESM2-MM	360×384	MIROC6	360×256
海冰	CESM2-WACCM	CICE5.1 (320×384)	CanESM5-1	LIM2 (360×291)
海冰	CESM2-FV2	CICE5.1 (320×384)	ACCESS-CM2	CICE5.1.2 (360×300)
海冰	TaiESM1	CICE4 (320×384)	HadGEM3-GC31-LL	CICE-HadGEM3-GSI8 (360×330)
海冰	MPI-ESM1-2-LR	Unnamed (256×220)	HadGEM3-GC31-MM	CICE-HadGEM3-GSI8 (1440×1205)
海冰	MIROC6	COCO4.9 (360×256)	UKESM1-1-LL	CICE-HadGEM3-GSI8 (360×330)
海冰	CESM2	CICE5.1 (320×384)	IPSL-CM6A-LR	NEMO-LIM2 (182×149)

2.2. 方法

本文参照 POLARIS 系统所提出的船舶航行风险指数(Risk Value, RV)对船舶在北极的通航能力进行评估[30]。RV 由船舶类型与海冰类型共同确定, 其取值范围为-6~+3, 其中负值表示通航风险较高, 不适宜船舶通行, 正值则表示具备通航条件, 且数值越大表明航行风险越低。当 $RV=0$ 时, 船舶处于极地操作限制边界, 航行安全处于临界状态。在该条件下, 船舶虽可航行, 但需采取额外操作限制或风险缓解措施。

本文主要研究普通商船的通航能力, 对应国际船级社协会(International Association of Classification Societies, IACS)定义的极地船级(Polar Class, PC)体系中的开阔水域(Open Water, OW)船舶[31], 即 OW 船在不同海冰类型下的风险值如表 2 所示[32]。

Table 2. Risk values (RVs) for OW ship under different ice classes
表 2. OW 船在不同冰级下的 RV 值

冰级/海冰厚度(cm)	OW 船
无冰/0	3
新冰/[0, 10]	1

续表

灰冰/(10, 15]	0
灰白冰/(15, 30]	-1
薄当年冰第一阶段/(30, 50]	-2
薄当年冰第二阶段/(50, 70]	-3
中等厚度当年冰第一阶段/(70, 100]	-3
中等厚度当年冰第二阶段/(100, 120]	-3
厚当年冰/(120, 170]	-4
二年冰/(170, 200]	-5
薄多年冰/(200, 250]	-6
厚多年冰/>250	-6

基于海冰厚度确定的风险值(RV)及对应网格的海冰密集度,可进一步计算海冰通航风险指数(Risk Index Outcome, RIO),其计算方法如下:

$$\text{RIO}_V = \sum C_T \times \text{RV}_{V,T} \quad (1)$$

其中, C_T 表示某区域内 T 类型海冰的密集度, $\text{RV}_{V,T}$ 表示 V 类型船舶在 T 类型海冰条件下的风险值。RIO_V 值表征复杂冰况下特定类型船舶航行风险的综合量化结果。

除海冰外,还考虑了风速对北极通航的影响。在风速风险评估中,评估单元内风的强度由风速大小决定,其无量纲化表达如下:

$$W' = \begin{cases} 1, W > W_{\min} \\ \frac{W^2}{W_{\min}^2}, W \leq W_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

其中, W' 表示风速强度指标, W 为评估单元内的风速,采用某一时段内的极端风速(95 百分位数), $W_{\min}$ 为风速阈值。依据国际船级社规定,OW 船的 $W_{\min}$ 通常取蒲福风力 6 级对应风速($10.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) [31]。当 $W > W_{\min}$ 时,认为风速对通航的影响达到最大;当 $W \leq W_{\min}$ 时,风速对通航的影响随风速减小而逐渐减弱,并趋近于 0。

由于 RIO_V 与风速强度指标在量纲及数量级上存在差异,需对 RIO_V 指标进行归一化处理,归一化后的海冰风险指数记为 RIO_V'。在指标融合过程中,参考已有研究中基于粗糙集与犹豫层次分析方法确定的北极通航自然风险权重,其中,犹豫层次分析用于确定主观权重,粗糙集思想用于提取客观权重,并通过集成获得组合权重[12]。最终构建考虑海冰与风速共同作用的综合通航风险指数(CRI):

$$\text{CRI} = \frac{5}{7} \text{RIO}_V' + \frac{2}{7} W_V' \quad (3)$$

根据 CRI 的取值范围及其物理意义,将通航条件划分为三类:当 $\text{CRI} > 0.4$ 时,船舶不可通航;当 $0.2 \leq \text{CRI} < 0.4$ 时,通航条件较为困难;当 $\text{CRI} < 0.2$ 时,认为具备通航条件。本文构建的 CRI 主要用于刻画海冰与近地面风速共同作用下的通航风险。其中,海冰因子包括海冰厚度和海冰密集度,风速因子采用近地面 10 m 风速表征。由于长期气候模式输出变量的限制,本文未将能见度、海浪、冰山、船体结冰、极端低温、气旋活动、海雾、船舶性能、通信条件和应急搜救能力等因素纳入 CRI 计算。对 1979~2014 年北极区域平均的 RIO_V' 和 W_V' 进行散点分析发现,两者在历史时期整体呈显著负相关关系,表明在多年

冰占优条件下海冰对通航风险的影响较大, 而极端风速出现概率相对较低; 随着开阔水域增加, 风速增强导致的通航风险上升, 而海冰的影响降低(图 2)。

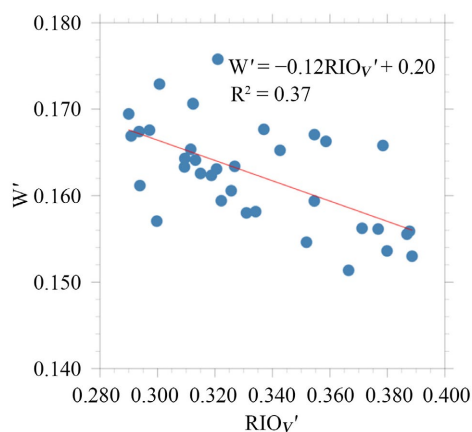


Figure 2. Scatter distribution and linear fitting results between the regional mean normalized Risk Index Outcome (RIO_V') and wind speed risk index (W_V') over the Arctic during 1979~2014, with significance tested at the 0.05 level

图 2. 1979~2014 年北极区域平均的归一化海冰风险指数 (RIO_V') 与风速风险指数 (W_V') 的散点分布及线性拟合结果(显著水平为 0.05)

3. 通航风险值的空间分布变化

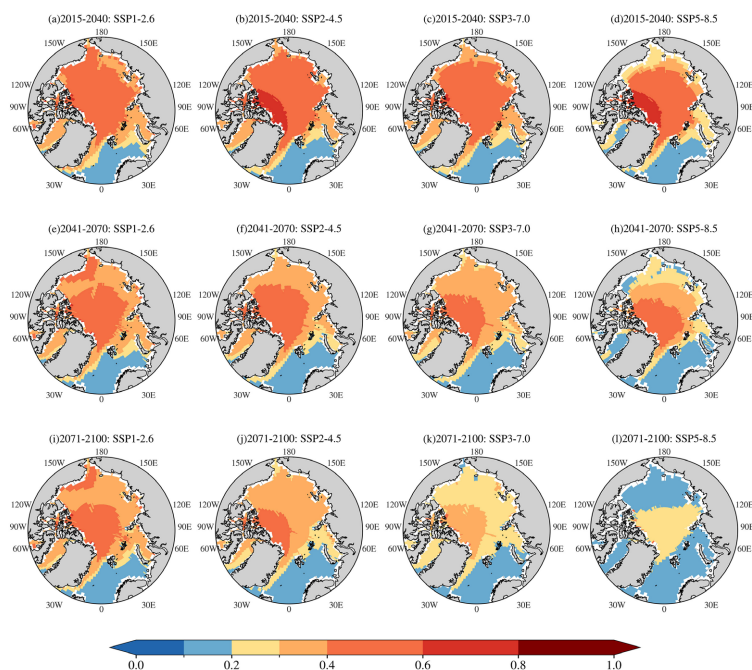


Figure 3. Spatial distribution of year-round comprehensive risk value of OW ships in different future sharing socio-economic path scenarios in the 21st century simulated by excellent group models. (a)~(d) is the near period of the 21st century, (e)~(h) is the middle period, (i)~(l) is the far period. SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 are four different emission scenarios

图 3. 不同未来共享社会经济路径下 21 世纪近期、中期和远期北极全年 OW 船的 CRI 值空间分布。(a)~(d)为 21 世纪近期; (e)~(h)为中期; (i)~(l)为远期; SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 为 4 种不同的排放情景

基于表 1 所列模式模拟结果的集合平均, 计算了不同排放情景下 OW 船的 CRI, 并分析其在 21 世纪近期(2015~2040 年)、中期(2041~2070 年)和远期(2071~2100 年)的空间分布特征。

2015~2100 年北极三条主要航道的可通航性整体呈增强趋势, 但在不同排放情景及时间阶段存在显著差异(图 3)。21 世纪近期阶段, 各情景下 CRI 空间分布差异较小; 进入 21 世纪中期, SSP3-7.0 与 SSP5-8.5 情景下低风险区扩展明显加快, 而 SSP1-2.6 情景变化趋于平缓; 21 世纪远期时各情景下 CRI 差异最为显著, 高排放情景下通航期显著延长, 部分航段接近季节性常态开放。整体表现为“低排放趋稳、高排放加速”的阶段演变特征。

CRI 存在显著的季节变化, 整体呈现出“海冰退缩主导、风速变化调制”的变化特征。冬季(图 4)在各情景下 21 世纪近期时北极大部分区域 CRI 均高于 0.4, 尤其在格陵兰岛以北海域和加拿大北极群岛附近形成持续高风险区, 表明厚冰及多年冰仍占主导。进入 21 世纪中期后, 高排放情景(SSP3-7.0 与 SSP5-8.5)下欧亚边缘海 CRI 明显下降, 低风险区向巴伦支海及喀拉海扩展, 但中央盆地及加拿大群岛附近仍维持高值区。21 世纪远期阶段, 仅在 SSP5-8.5 情景下巴伦支海局地 CRI 降至约 0.3, 但整体仍以不可通航为主。

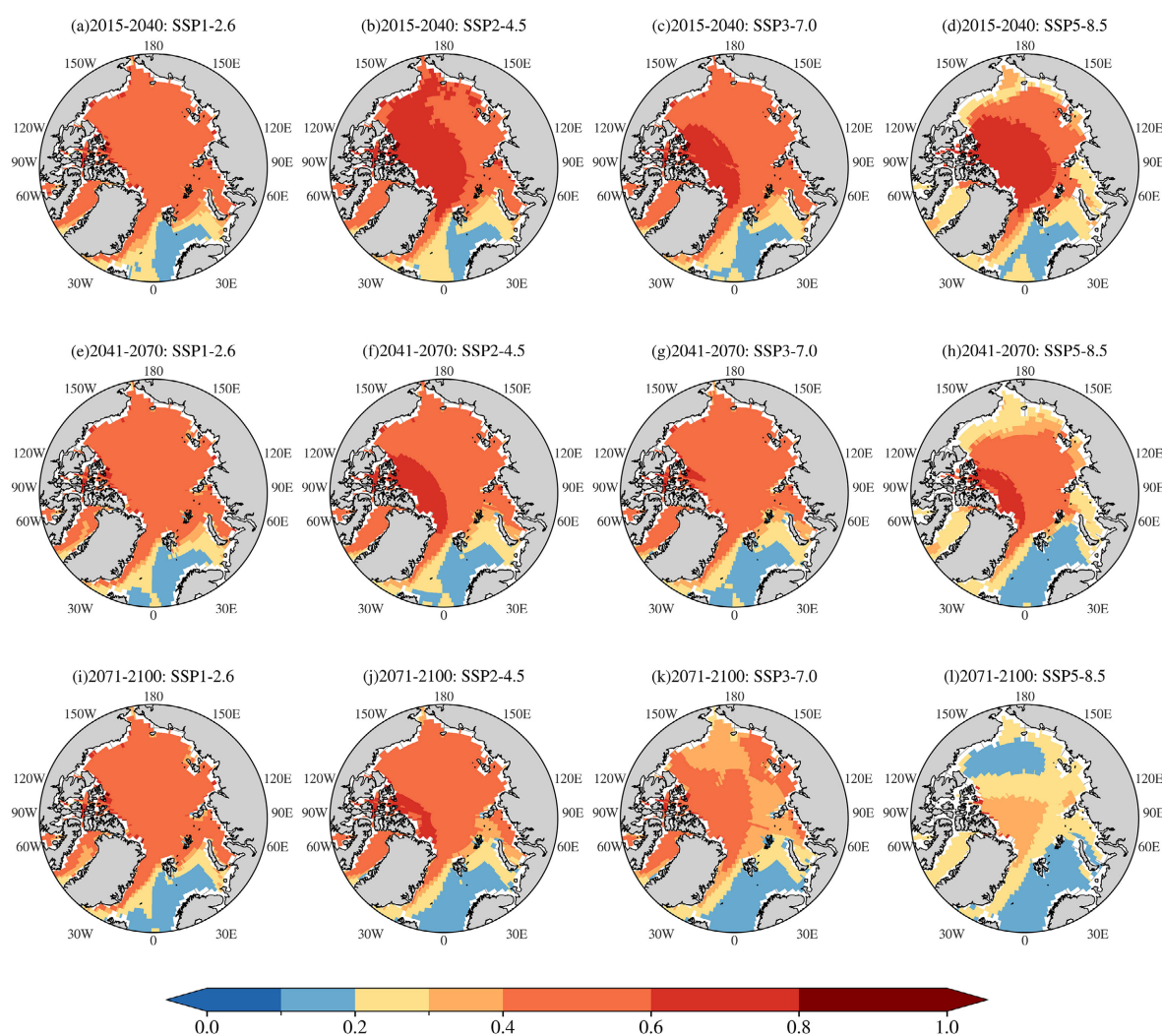


Figure 4. Same as Figure 3, but in Winter

图 4. 同图 3, 但为冬季

春季(图 5) CRI 受海冰控制最为显著。与冬季相比,整体风险略有降低,但空间结构仍呈现“边缘海低、中央高”的分布特征。21 世纪中期阶段,高排放情景下冰缘线明显北移,低风险区沿欧亚大陆架向北扩展。远期 SSP5-8.5 情景下,东北航道沿岸区域 CRI 降至 0.2~0.3,表明春季通航窗口有所提前。

夏季(图 6) CRI 变化最为显著。21 世纪近期阶段,东北航道和西北航道沿岸区域 CRI 已低于 0.3。中期在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下,低风险区迅速向中央盆地扩展,中央航道部分区域 CRI 降至 0.2 以下。远期阶段差异进一步加大: SSP1-2.6 趋于稳定,而 SSP5-8.5 情景下低风险区已覆盖北冰洋大部分海域。值得注意的是,部分边缘海 CRI 未持续下降,反而在局地出现相对高值,表明在海冰减少的背景下,风速等动力因子可能对夏季通航风险具有调制作用。

秋季(图 7) CRI 变化幅度与夏季相当,部分区域甚至更为显著。由于海冰冻结时间推迟,秋季低风险区扩展速度明显加快。21 世纪中期以后,东北航道和中央航道 CRI 显著下降。远期 SSP5-8.5 情景下低风险区进一步向加拿大盆地扩展。与夏季不同,秋季部分边缘海(如喀拉海和拉普捷夫海) CRI 下降幅度小于预期,甚至在局地出现高值区,表明在开放水域背景下,近地面风速增强对通航风险的影响更加显著。

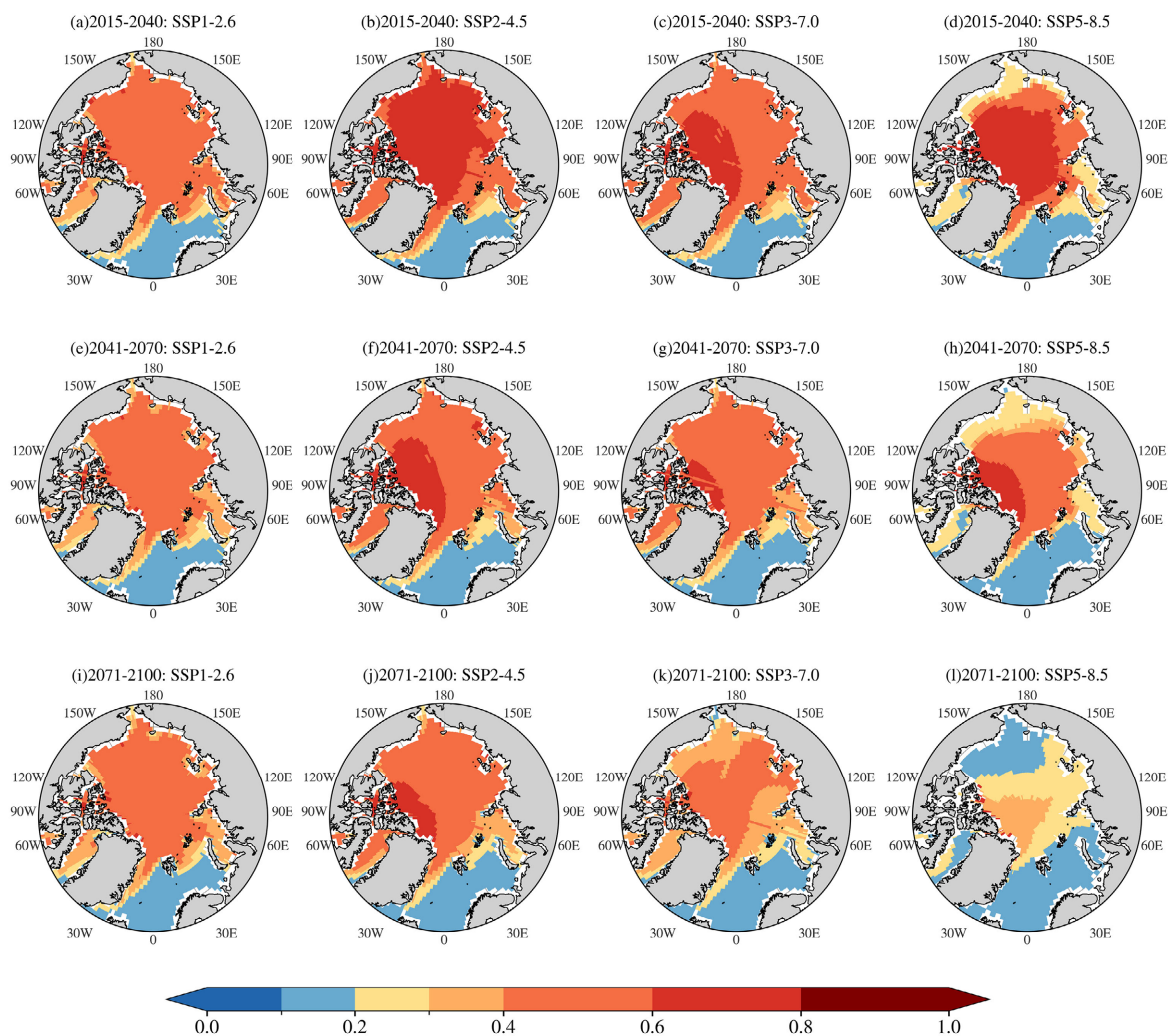


Figure 5. Same as Figure 3, but in spring

图 5. 同图 3, 但为春季

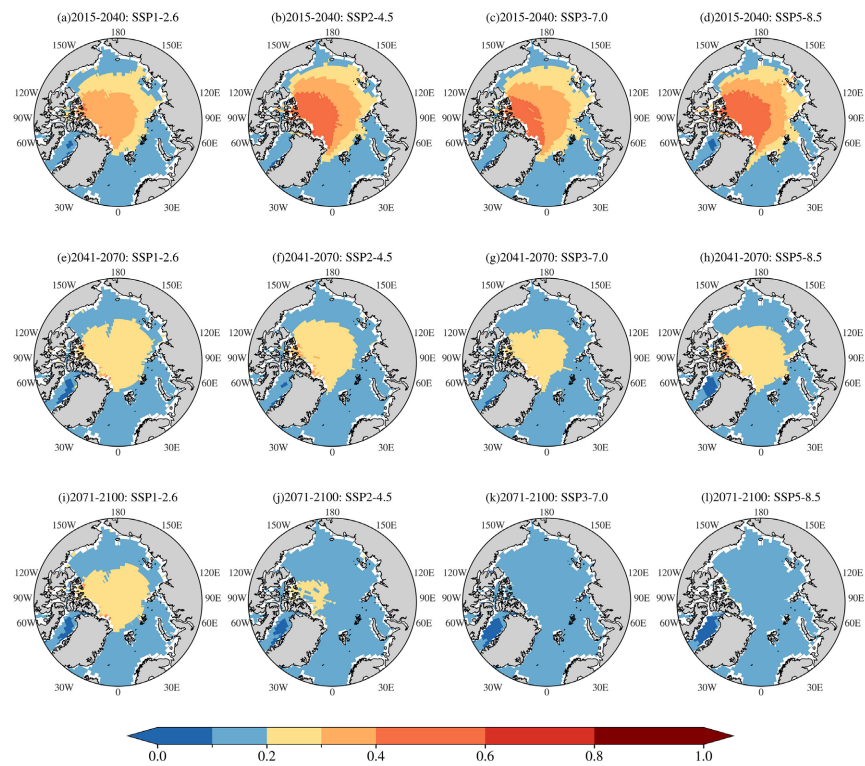


Figure 6. Same as Figure 3, but in summer
图 6. 同图 3, 但为夏季

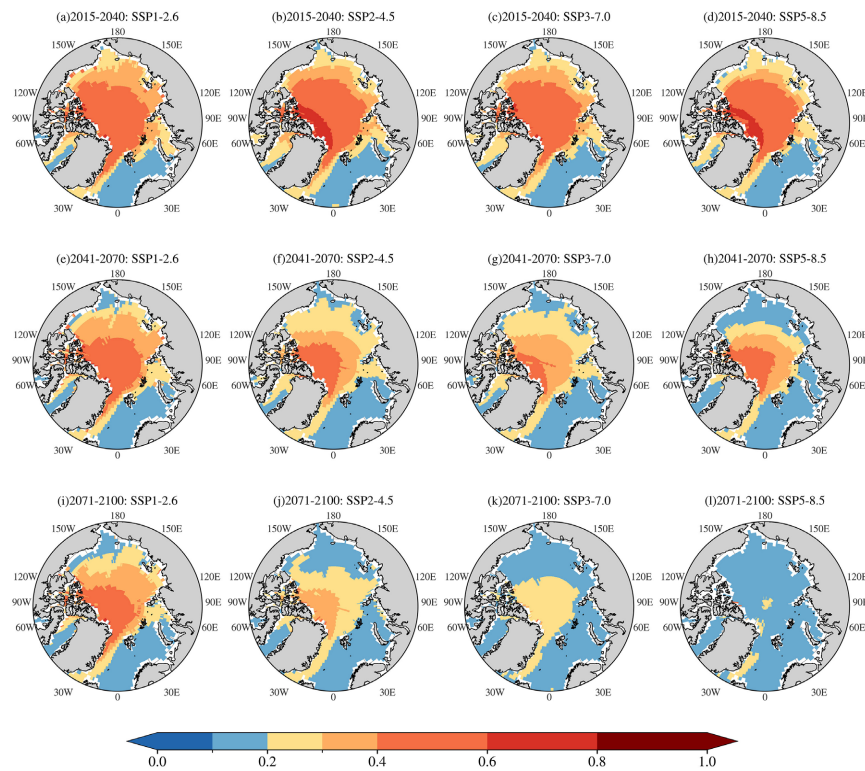


Figure 7. Same as Figure 3, but in autumn
图 7. 同图 3, 但为秋季

4. 北极航道通航风险的年际和季节变化

东北航道、西北航道与中央航道的年平均 CRI 在未来均呈显著下降趋势。图 8 展示了 2015~2100 年东北航道 CRI 的年际变化特征及长期趋势。结果表明, 各情景下 CRI 随时间下降的趋势在绝大多数模式中保持一致; 同时, 高排放情景下, CRI 下降速率大。在 21 世纪中后期, 不同模式之间的离散程度扩大, 尤其在 高排放情景(SSP3-7.0 与 SSP5-8.5)下更为明显, 表明未来通航风险的不确定性随排放强度增强而增强。从季节变化来看, 夏季 CRI 最先降至 0.2 以下, 不确定性范围最小, 表明模式模拟的夏季通航条件改善具有一致性。相比之下, 冬季和春季虽呈下降趋势, 但 CRI 整体仍高于 0.4, 且模式离散度较大, 表明该季节通航条件较差且不确定性较高。值得注意的是, 在 SSP5-8.5 情景下, 部分模式在 21 世纪后期夏季出现 CRI 阶段性增大现象, 这表明在海冰持续减少背景下, 风速增强可能对通航风险产生重要调制作用。秋季 CRI 亦显著下降, 其变化趋势与夏季相似, 但整体略高于夏季, 表明秋季通航条件也有明显改善。

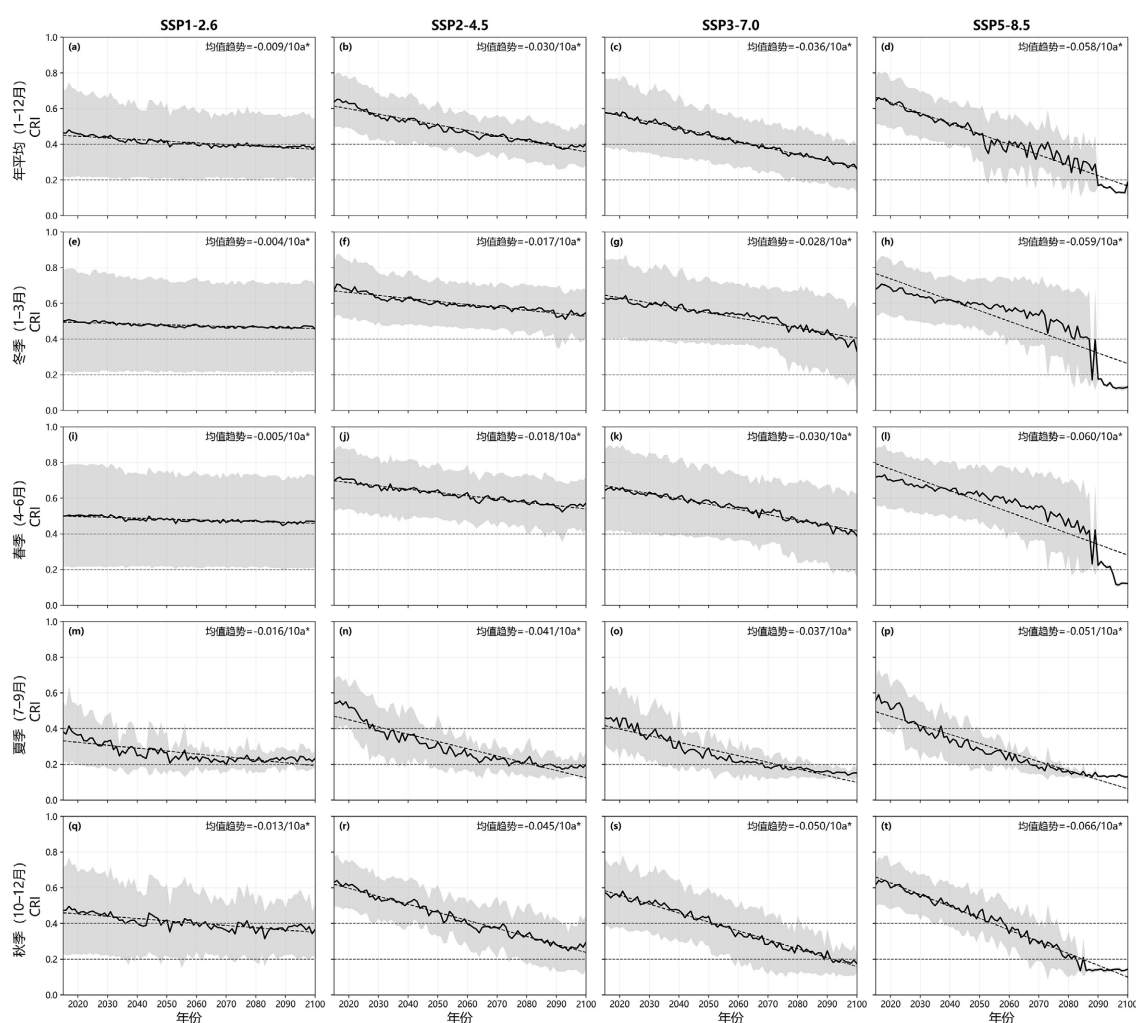


Figure 8. Annual variation and long-term trend (unit: $(10a)^{-1}$) of OW ship's average navigability of northeast waterway under different future shared socio-economic paths in 2015-2100. Solid lines denote the multi-model ensemble mean, and shaded areas represent inter-model spread (± 1 standard deviation), * indicating that the trend has passed the significance test of 0.05 significance level. (a)~(d) Annual mean; (e)~(h) Winter; (i)~(l) Spring; (m)~(p) Summer; (q)~(t) Autumn

图 8. 2015~2100 年不同共享社会经济路径下 OW 船的东北航道 CRI 的年际变化及长期趋势(单位: $(10a)^{-1}$)。实线表示多模式集合平均, 阴影表示模式间离散范围(± 1 标准差), *表示通过了 0.05 显著水平的显著性检验。(a)~(d) 年平均; (e)~(h) 冬季; (i)~(l) 春季; (m)~(p) 夏季; (q)~(t) 秋季

同样的排放情景下中央航道 CRI 值整体高于同期其他航道。各季节 CRI 变化存在显著差异(图 9)。冬季 CRI 虽呈下降趋势,但绝大多数模式中 CRI 仍维持在 0.4 以上,且模式间离散范围较大,表明冬季通航条件整体较差且不确定性较高。春季仅在 SSP5-8.5 情景下的 21 世纪远期阶段,部分模式中 CRI 降至 0.2 以下。夏季 CRI 下降最为显著,多数模式在 21 世纪中期后 $CRI < 0.2$,表明其通航能力明显改善,但模式间仍存在一定差异。秋季 CRI 变化与夏季相似,但其值略高于夏季。21 世纪中期后 CRI 普遍降至 0.4 以下,远期在中等及以上排放情景下逐步接近或低于 0.2,表明通航条件逐渐改善。与东北航道相比,中央航道 CRI 值的模式间离散度明显更大,尤其在冬季,其不确定性范围在各情景下均为最大。与东北航道不同,中央航道 CRI 在各模式中未表现出明显的后期风险回升特征,表明其变化主要受海冰减少主导,而风速的影响相对较弱。

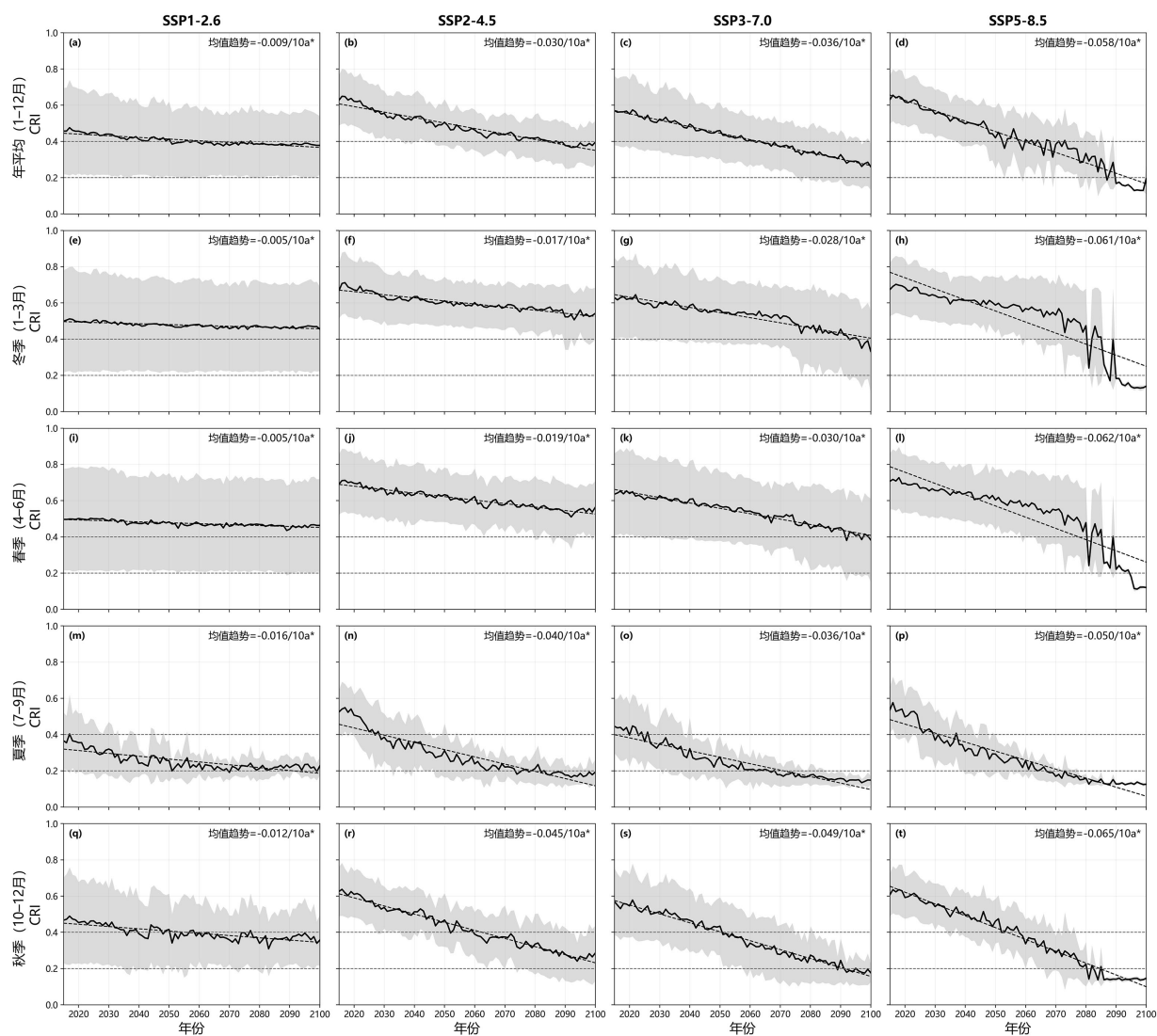


Figure 9. The same as Figure 8, but the central channel

图 9. 同图 8, 但是为中央航道

西北航道 CRI 同样呈显著下降趋势(图 10),且在中高排放情景下下降幅度增大。秋季及年平均的 CRI 值不确定性较强,尤其在 SSP5-8.5 情景下模式间差异显著扩大。从季节变化来看,夏季 CRI 下降幅度最

大,最先达到可通航阈值,是三条航道中改善最显著的区域,且在21世纪中期即可进入相对稳定的可通航状态。春季和秋季通航条件均呈明显改善趋势,其中秋季CRI在高排放情景下波动幅度显著增大。例如,在SSP5-8.5情景下秋季CRI标准差(0.0258)比SSP1-2.6情景(0.0076)增加2.4倍。冬季CRI虽略有下降,但整体通航风险仍较高;相比东北航道,其模式间离散度也略高。

综合图8~10可知,三条航道CRI在四种情景下均呈一致下降趋势,表明未来北极通航条件改善具有较高的可信度。从模式离散度来看,中央航道最大,波动最强(最大标准差为0.0345),西北航道次之(最大标准差为0.0312),东北航道最小(最大标准差为0.0303)。从季节变化看,冬季与春季波动普遍高于夏季,而秋季与夏季相近。从航道差异来看,东北航道最早进入稳定可通航阶段,但在SSP5-8.5情景下后期夏季出现风险回升,表明风速增强对通航风险具有一定调制作用;中央航道在21世纪近期风险最高但降幅最大,中后期夏季逐渐具备阶段性通航潜力;西北航道夏季改善最为显著,在SSP2-4.5及以上情景下世纪末风险降低约40%~50%。总体而言,海冰减少仍是北极通航条件改善的主导因子,但在高排放情景下,风速变化对通航风险的调制作用逐渐增强。与此同时,年际波动显著增强(标准差提高约2~3倍),尤其在秋季和冬季表现更为突出,表明大风对通航风险的影响不断增强。

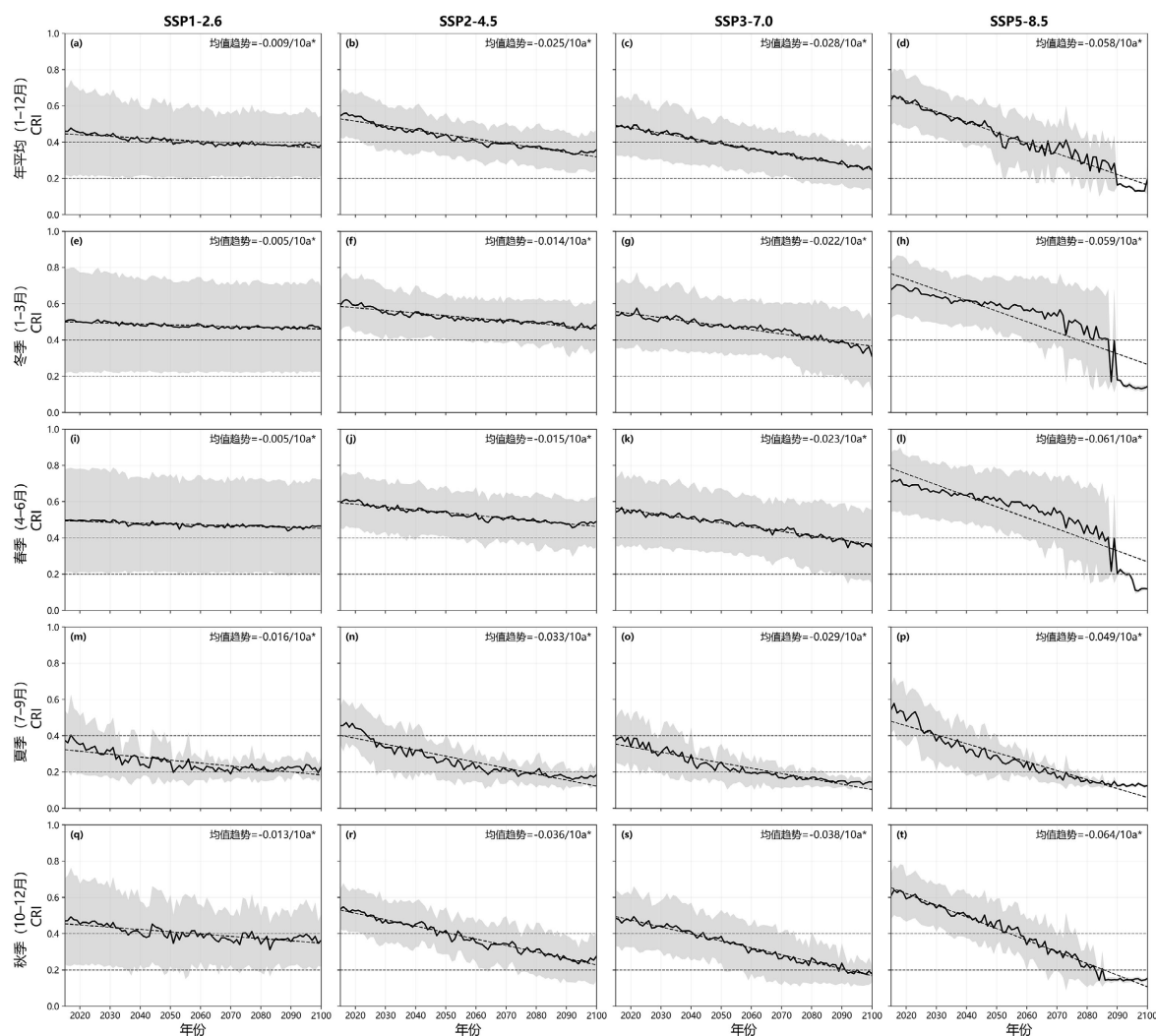


Figure 10. The same as Figure 8, but the northwest channel

图 10. 同图 8, 但是为西北航道

综上,未来北极航道通航能力增强主要集中于夏秋季,而冬季仍维持高风险状态(表3)。中央航道由“长期不可通航”向“季节性可通航”的转变最为显著。与仅考虑海冰因素的北极航道通航风险评估相比,本文基于海冰与风速构建的综合风险指数(CRI)能够更全面地刻画通航风险特征。表3结果表明,海冰仍是控制北极冬春季通航条件的主导因子,但在高排放情景下,秋季风速对通航风险的影响显著增强。若仅考虑海冰因素,通航期随时间呈单调增加趋势;在引入近地面 10 m 风速因子后,部分季节及航段的有效通航窗口缩短,综合评估结果普遍低于仅基于海冰的估算结果。该差异在高排放情景下更为显著,表明风速增强可能部分抵消海冰减少带来的正向效应。因此,仅基于海冰变化评估未来通航能力可能存在系统性高估,风-冰耦合作用是影响未来北极航运风险演变的重要机制。

Table 3. Navigability characteristics of Arctic OW ships in the 21st century, including scenarios considering both sea ice and wind speed (SW) and those considering only sea ice (S)

表 3. 21 世纪北极 OW 船的可通航性特征。包含同时考虑海冰和风速(SW)以及只考虑海冰(S)的情况

季节	航道	指标	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
东北		SW	□	□	□	2060s 前□, 后√
		S	×	×	×	√
冬季	中央	SW	×	2040s 前×, 后□	2040s 前×, 后□	2030s 前不×, 2030s~2090s□, 后√
		S	×	×	2070s 前×, 后√	2050s 前×, 后√
西北		SW	×	×	×	2090s 前□, 后√
		S	×	×	×	2040s 前×, 后√
东北		SW	□	□	□	2040s 前□, 后√
		S	×	×	2060s 前×, 后√	√
春季	中央	SW	×	2030s 前×, 后□	2030s 前×, 后□	2030s 前不×, 2030s~2080s□, 后√
		S	×	×	2090s 前×, 后√	2050s 前×, 后√
西北		SW	×	×	2080s 前×, 后□	2080s 前□, 后√
		S	×	×	×	2040s 前×, 后√
东北		SW	√	√	√	√
		S	√	√	√	√
夏季	中央	SW	2040s 前□, 后√	2030s 前□, 后√	2030s 前□, 后√	2030s 前□, 后√
		S	√	√	√	√
西北		SW	√	√	√	√
		S	√	√	√	√
东北		SW	□	□	□	√
		S	√	√	√	√
秋季	中央	SW	□	2080s 前□, 后√	2070s 前□, 后√	2070s 前□, 后√
		S	2020s 前×, 后√	2020s 前×, 后√	2020s 前×, 后√	2020s 前×, 后√
西北		SW	□	□	□	□
		S	√	√	√	√

注: √表示可通航, ×表示不可通航, □表示通航较困难; √为 $CRI < 0.2$; □为 $0.2 \leq CRI < 0.4$; ×为 $CRI \geq 0.4$ 。

上述结果是基于固定的 CRI 阈值(0.2/0.4)。为检验结论的稳健性, 本文进一步开展阈值敏感性分析。以基准阈值(CRI = 0.2/0.4)为中心, 构建较严格(0.15/0.35)和较宽松(0.25/0.45)两组扰动方案, 对不同阈值条件下三条北极航道的通航时间及通航比例进行对比分析(图 11 和图 12)。

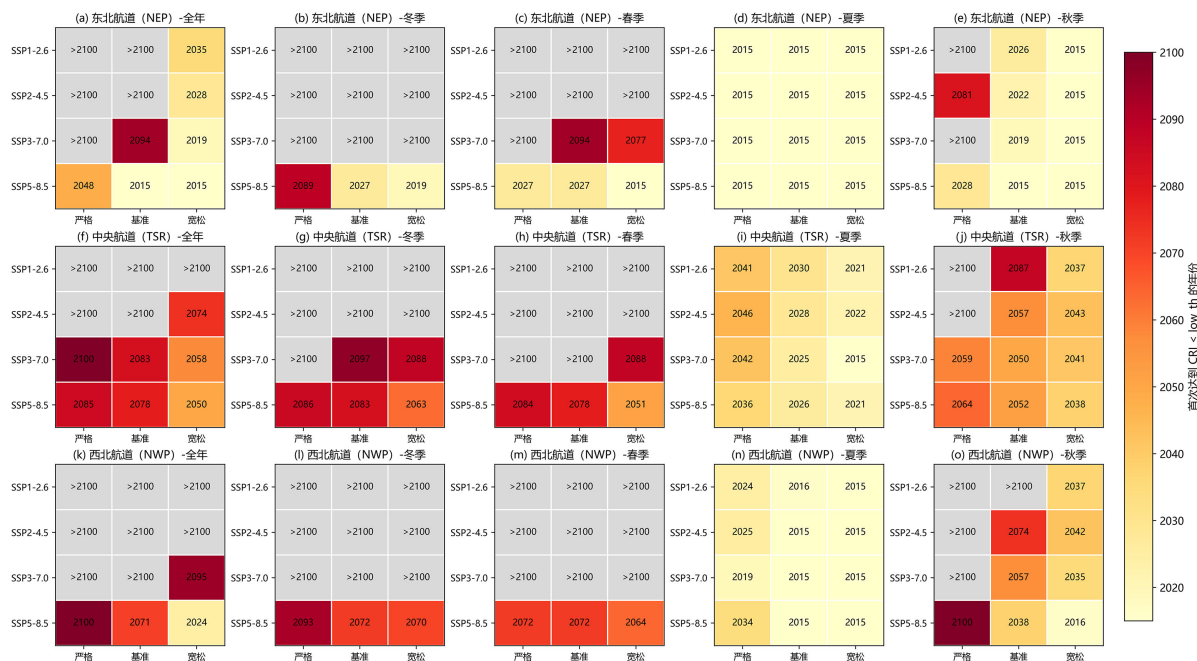


Figure 11. The years in which each of the three Arctic routes first meets navigable conditions under different threshold schemes
图 11. 不同阈值方案下三条北极航道首次达到可通航条件的年份

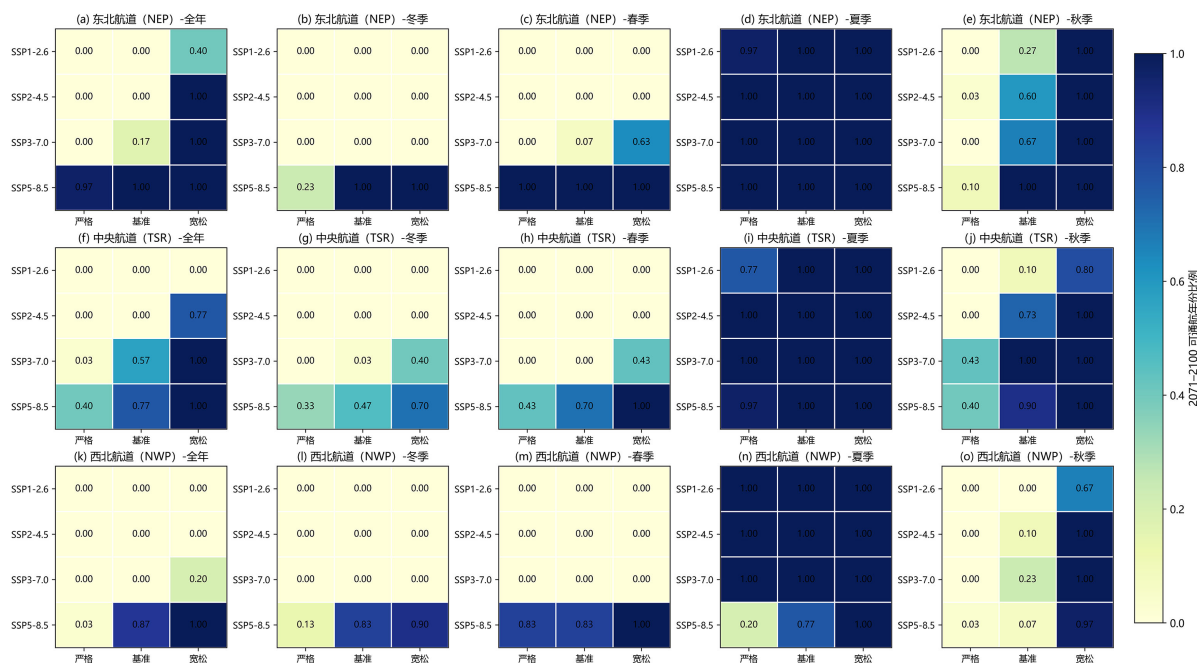


Figure 12. Proportion of navigable years for the three Arctic shipping routes under different threshold scenarios in the far-term period (2071~2100)
图 12. 远期(2071~2100 年)不同阈值情景下北极三条主要航运航线的可通航年份比例

结果表明,在不同阈值方案下,CRI 时间序列所反映的总体变化趋势基本一致。三条航道年平均及各季节 CRI 均呈随时间逐渐下降的特征,表明 CRI 的长期下降趋势并非由阈值设定所驱动。进一步分析发现,不同阈值设定主要影响通航条件达成的时间节点,但不改变趋势演变方向。其中,夏季 CRI 下降最快,在不同阈值方案下均最早达到可通航条件,且在 21 世纪远期可通航年份比例接近或达到 1,表明其对阈值变化不敏感。冬季和春季 CRI 整体仍维持在较高水平,多数情景下即使放宽阈值至 0.25/0.45 仍难以达到低风险通航条件,表明其通航受限特征具有较强稳定性。相比之下,秋季及全年结果对阈值变化更为敏感,放宽阈值可明显提前首次达到可通航条件的时间,并提高远期可通航比例。

综合来看,阈值变化不改变 CRI 演变所反映的物理过程及其趋势特征。不同阈值方案下,三条航道在各季节中的相对差异格局保持一致,即夏季最易通航、冬季最困难、秋季处于过渡阶段,表明本文关于北极航道可通航性时空演变的结论具有良好的稳健性与可靠性。

5. 结论与讨论

基于性能优秀模式的海冰和近地面 10 米风速集合均值结果,本文构建风-冰耦合综合风险指数(CRI),计算并讨论了在 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 等四种情景下 21 世纪近期、中期和远期 OW 船对应的北极可通航性的空间、年际和季节变化,主要结论如下:

(1) 构建了综合海冰厚度、海冰密集度与近地面 10 m 风速的风-冰耦合综合风险指数(CRI),实现了对未来北极航道通航风险的多要素量化评估。结果表明,在仅考虑海冰条件时,北极航道通航能力随变暖呈近似单调增强趋势;而在引入风速因子后,高排放情景下通航风险降幅较单一海冰估算减少约 10%~20%,部分季节及航段达到可通航标准的年份比例明显降低,表明单一海冰评估可能系统性高估了未来北极的通航潜力。此外,在高排放情景下,部分区域和季节的通航风险出现阶段性回升,进一步说明近地面风速变化对开放水域通航风险具有调制作用。

(2) 不同排放情景下北极航道通航能力提升幅度存在显著差异。在低排放情景(SSP1-2.6)下,仅夏季东北航道和西北航道阶段性具备可通航条件,21 世纪远期夏季可通航年份占比约 70%。中等排放情景(SSP2-4.5 与 SSP3-7.0)下,通航能力显著提升,夏季东北和西北航道可通航年份占比普遍超过 70%~80%,中央航道逐步具备季节性通航潜力;至 21 世纪末,西北航道夏季通航风险降低约 40%~50%,中央航道年平均通航风险降低约 25%~30%,但冬季改善仍较有限。在高排放情景(SSP5-8.5)下,通航条件改善最为显著,春、夏、秋三季三条航道可通航年份占比普遍超过 80%,其中夏季东北和西北航道接近 90%~95%,中央航道达 75%~85%,但冬季仍维持高风险状态。

(3) 海冰减少仍是未来北极通航改善的主导因子,但在高排放情景下,近地面风速增强,在秋季对开放水域通航风险的影响显著增强,推动通航风险结构由“海冰主导型”向“风-冰耦合型”转变。

与已有研究普遍认为通航能力随气候变暖呈单调增强趋势相比,本研究揭示了在引入近地面 10 m 风速影响后,北极航道通航风险的非线性变化特征。在高排放情景(尤其是 SSP5-8.5)下,部分航道在夏秋季出现通航风险阶段性回升,表明风速增强对通航风险具有调制作用。此外,综合评估结果显示,相较于仅考虑海冰的估算方法,风-冰耦合评估得到的通航窗口整体偏小,说明传统方法可能对未来北极通航能力存在系统性高估。另外,未来研究有必要进一步纳入极端气温、能见度及气旋活动等关键气象因子,构建多要素耦合风险评估框架,以更全面刻画北极航运安全的不确定性。

本文仍存在一定局限性。首先,CRI 仅纳入海冰厚度、海冰密集度和近地面 10 m 风速三个因子,属于风-冰综合风险指数,而不是完整的北极航运安全风险指数。Polar Code 指出,极地水域航行还受到低温、长时间极昼或极夜、高纬度导航与通信限制、遥远海域搜救能力不足、船员极地操作经验不足以及快速变化的恶劣天气等因素影响[33]。此外,Polar Code 在航行计划和操作评估中也要求考虑海况、能见

度、航线附近冰山信息以及低能见度条件下接近冰山等风险[33]。近期研究进一步指出,风、海浪、海喷雾结冰和能见度等海气环境因子均与北极船舶运行安全密切相关,但这些因子在现有极地航行规则和气候尺度风险评估中仍未被充分量化[34]。因此,本文结果应理解为在海冰和近地面风速约束下的未来通航潜力评估。若进一步纳入能见度、海浪、冰山、船体结冰、极端低温、气旋活动、通信保障、应急搜救能力、船舶性能和人为因素等,部分开放水域的实际航行风险可能高于本文估算结果,尤其是在秋冬季、高纬度中央航道以及加拿大北极群岛附近海域。后续研究应进一步结合高分辨率海洋气象资料、船舶 AIS 轨迹、极端天气预警信息和船舶运营约束,构建面向实际航行决策的多因子耦合风险评估框架[35]。

基金项目

本研究受到国家自然科学基金重点项目(42430411), 国家自然科学基金项目(42075024)的资助。

参考文献

- [1] Barnhart, K.R., Miller, C.R., Overeem, I. and Kay, J.E. (2016) Mapping the Future Expansion of Arctic Open Water. *Nature Climate Change*, **6**, 280-285. <https://doi.org/10.1038/nclimate2848>
- [2] Stephenson, S.R., Smith, L.C., Brigham, L.W. and Agnew, J.A. (2013) Projected 21st-Century Changes to Arctic Marine Access. *Climatic Change*, **118**, 885-899. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0685-0>
- [3] Notz, D. and Stroeve, J. (2016) Observed Arctic Sea-Ice Loss Directly Follows Anthropogenic CO₂ Emission. *Science*, **354**, 747-750. <https://doi.org/10.1126/science.aag2345>
- [4] IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- [5] 胡舒涵, 丁瑞昌, 吴昊煜, 等. CMIP6 模拟北极海冰面积变化能力评估[J]. 极地研究, 2025, 37(2): 212-224.
- [6] Zhao, C., Wang, Y., Gong, Y., Brown, S. and Li, R. (2021) The Evolution of the Port Network along the Maritime Silk Road: From a Sustainable Development Perspective. *Marine Policy*, **126**, Article 104426. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104426>
- [7] Dale, B. and Kristoffersen, B. (2018) Post-Petroleum Security in a Changing Arctic: Narratives and Trajectories towards Viable Futures. *Arctic Review on Law and Politics*, **9**, 244-261. <https://doi.org/10.23865/arctic.v9.1251>
- [8] Cariou, P., Cheaitou, A., Faury, O. and Hamdan, S. (2021) The Feasibility of Arctic Container Shipping: The Economic and Environmental Impacts of Ice Thickness. *Maritime Economics & Logistics*, **23**, 615-631. <https://doi.org/10.1057/s41278-019-00145-3>
- [9] Stoddard, M.A., Etienne, L., Fournier, M., Pelot, R. and Beveridge, L. (2016) Making Sense of Arctic Maritime Traffic Using the Polar Operational Limits Assessment Risk Indexing System (Polaris). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **34**, Article 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/34/1/012034>
- [10] 曹云峰, 张岩, 丁琪, 等. 北极跨极航道通航能力变化研究综述[J]. 科学通报, 2021, 66(1): 21-33.
- [11] 李宁, 王烨, 张正涛. 从科技论文数量和内容看自然灾害风险度评估方法的转变[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 8-14.
- [12] 王哲, 葛珊珊, 张韧, 等. 基于粗糙集与犹豫层次分析的北极东北航道风险评估[J]. 海洋通报, 2017, 36(5): 512-520.
- [13] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456.
- [14] Smith, L.C. and Stephenson, S.R. (2013) New Trans-Arctic Shipping Routes Navigable by Midcentury. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, E1191-E1195. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214212110>
- [15] Melia, N., Haines, K. and Hawkins, E. (2016) Sea Ice Decline and 21st Century Trans-Arctic Shipping Routes. *Geophysical Research Letters*, **43**, 9720-9728. <https://doi.org/10.1002/2016gl069315>
- [16] Li, M., Hu, S., Gao, Q., Ding, R., Zhao, C. and Huang, F. (2025) Navigability of Arctic Sea Routes in the 21st Century Based on CMIP6. *Advances in Polar Science*, **36**, 246-264.
- [17] Chen, W., Jiang, Z. and Li, L. (2011) Probabilistic Projections of Climate Change over China under the SRES A1B Scenario Using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*, **24**, 4741-4756. <https://doi.org/10.1175/2011jcli4102.1>
- [18] 吴昊煜, 胡舒涵, 杜如意, 等. CMIP6 模拟北极近地面 10 m 风速能力的评估[J]. 高原气象, 2025, 44(4): 833-848.
- [19] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., et al. (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization. *Geoscientific Model Development*, **9**,

- 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- [20] Walsh, J.E. and Chapman, W.L. (2001) 20th-Century Sea-Ice Variations from Observational Data. *Annals of Glaciology*, **33**, 444-448. <https://doi.org/10.3189/172756401781818671>
- [21] AMAP (2015) AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic Climate Forcer. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, vii+139pp. <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2015-methane-as-an-arctic-climate-forcer/1285>
- [22] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., *et al.* (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [23] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., *et al.* (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:tnyrp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2)
- [24] Meier, W.N., Fetterer, F., Windnagel, A.K. and Stewart, J.S. (2021) NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 4. National Snow and Ice Data Center, Boulder.
- [25] Zhang, J. and Rothrock, D.A. (2003) Modeling Global Sea Ice with a Thickness and Enthalpy Distribution Model in Generalized Curvilinear Coordinates. *Monthly Weather Review*, **131**, 845-861. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0845:mgsiwa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0845:mgsiwa>2.0.co;2)
- [26] 李彤彤, 汪杨骏, 吴鸿乾, 等. 北极多源海冰厚度数据产品的定量分析与综合评估[J]. 极地研究, 2024, 36(4): 607-622.
- [27] 周璐, 徐世明, 曾刚. 20 世纪 90 年代以来北极海冰减少的热动力分析——基于 PIOMAS 模式结果[J]. 大气科学, 2017, 41(1): 57-70.
- [28] Ellis, B. and Brigham, L. (2009) Arctic Marine Shipping Assessment 2009 Report. Arctic Council, Tromsø, 194pp.
- [29] Østreng, W., Eger, K.M., Fløistad, B., Jørgensen-Dahl, A., Lothe, L., Mejlænder-Larsen, M. and Wergeland, T. (2013) Shipping in Arctic Waters: A Comparison of the Northeast, Northwest and Trans Polar Passages. Springer.
- [30] Jensen, Ø. (2016) The International Code for Ships Operating in Polar Waters: Finalization, Adoption and Law of the Sea Implications. *Arctic Review on Law and Politics*, **7**, 60-82. <https://doi.org/10.17585/arctic.v7.236>
- [31] IACS (2011) Requirements Concerning Polar Class. International Association of Classification Societies, London.
- [32] 谢宗轩, 徐鹤, 王胜正, 等. 北极航线的海冰风险计算与航段安全评估[J]. 中国航海, 2023, 46(3): 36-41+58.
- [33] International Maritime Organization (IMO) (2015) International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code). International Maritime Organization, London. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/PO-LAR%20CODE%20TEXT%20AS%20ADOPTED.pdf>
- [34] Müller, M., Knol-Kauffman, M., Jeuring, J. and Palerme, C. (2023) Arctic Shipping Trends during Hazardous Weather and Sea-Ice Conditions and the Polar Code's Effectiveness. *npj Ocean Sustainability*, **2**, Article No. 12. <https://doi.org/10.1038/s44183-023-00021-x>
- [35] Yang, X., Lin, Z.Y., Zhang, W.J., Xu, S., Zhang, M.Y., Wu, Z.D., *et al.* (2024) Review of Risk Assessment for Navigational Safety and Supported Decisions in Arctic Waters. *Ocean & Coastal Management*, **247**, Article 106931. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106931>