

基于模糊决策法的北极东北航线风险评估

易 燕^{1*}, 陈建平^{2#}, 谢瑞灵²

¹广州航海学院, 国际邮轮游艇学院, 广东 广州

²广州航海学院, 船舶与海洋工程学院, 广东 广州

Email: #wchchenjp@sina.com

收稿日期: 2021年8月7日; 录用日期: 2021年9月19日; 发布日期: 2021年9月26日

摘 要

文章以中国冰上海上丝绸之路发展为背景, 以北极东北航线的通航风险和海冰融化为重点, 选取气温等气候因素, 确定风险指标体系, 采用模糊决策方法, 建立起航道通航风险模糊综合评价模型, 并对在海冰融化风险下的航道水深等地理因素, 对航道主要海域存在自然环境风险进行评价。最后选取温度、海冰密度和风速作为因子变化的敏感度, 来评价要素风险指标的影响。

关键词

北极航线, 东北航线, 风险评估, 模糊算法

Risk Assessment of Arctic Northeast Route Based on Fuzzy Decision Method

Yan Yi^{1*}, Jianping Chen^{2#}, Ruiling Xie²

¹School of International Cruise Yacht, Guangzhou Maritime University, Guangzhou Guangdong

²School of Ship and Ocean Engineering, Guangzhou Maritime University, Guangzhou Guangdong

Email: #wchchenjp@sina.com

Received: Aug. 7th, 2021; accepted: Sep. 19th, 2021; published: Sep. 26th, 2021

Abstract

Based on the development of China's Maritime Silk Road and Arctic route, focusing on the navigation risk and sea ice melting of the Northeast Arctic route, the paper evaluates the navigation risk

*第一作者。

#通讯作者。

of the Arctic Northeast channel and the navigation risk employing the fuzzy decision-making method and selecting the climatic factors such as temperature and the geographical factors such as channel depth under the risk of sea ice melting, and evaluates the risk existing in the natural environment of the main section of the Arctic Northeast channel. On this basis, the contribution of each index factor to the comprehensive risk is discussed.

Keywords

Arctic Route, Northeast Route, Risk Assessment, Fuzzy Algorithm

Copyright © 2021 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

北极航线为北极自然和地缘政治环境的变化开辟了国际政治博弈的新领域。北极航线的开发利用迎来了前所未有的发展机遇。北极周边国家和外国列强纷纷更新或出台北极政策,以便主动开发利用北极航线。“冰上丝绸之路”是俄罗斯提出并由中国领导人明确陈述的[1] [2] [3] [4]。作为北极重要利益相关者,中国愿依靠北极航线的开发利用,与各方共建“冰上丝绸之路”,以积极的态度参与北极事务。中国致力于抓住发展机遇,突破北极航线开发的复杂风险和困难,寻求在北极更广阔领域与其他国家开展合作,建设可持续发展的“冰上丝绸之路”。北极航线对我国具有经济和战略双重价值,这条航线的发展将对中国对外贸易、区域经济发展和海洋强国建设产生深远影响。“一带一路倡议”将是“冰上丝绸之路”的重要补充,对促进欧亚经济发展和促进世界互联互通有更大的作用。因此,“一带一路”北极航线的开发和“冰上丝绸之路”的建设,将有助于发现和利用“丝绸之路”上的“冰”的合理切入点。它是实现“一带一路倡议”构想和“人类命运共同体”价值的重要组成部分。

北冰洋东北航道是指从西起冰岛,经欧亚大陆北部海岸,穿过白令海峡,连接东北亚的航线。随着全球气温的持续升高和北极冰雪的加速融化,北极航线的开通和航行已成为全球关注的焦点。与苏伊士运河、好望角等传统航线相比,北极东北航线将使上海以北港口至西欧、北海、波罗的海港口航线缩短25%~55%,每年节省国际贸易和航运成本533.274亿美元,这对中国实施海洋强国战略,建设中俄“冰上丝绸之路”具有重要和深远的意义。但北极地区船舶航行条件仍存在诸多不确定性,如冰况、搜救、补给等因素仍然制约着北极航运的发展。

目前,一些学者对北极东北航道的性质,人文,航行环境,航道管理,战略规划和法律进行了系统的研究[5] [6]。付强[7]在北冰洋西北航道航行主要海域开展了海冰变化规律研究。曹玉墀[8]在总结大量航海经验的基础上,比较了历史上逐渐形成的北冰洋航线,并初步探讨了商业航线的选择。李振锋[9]等人运用灰色模型综合评价方法对北极航线的航行环境进行了初步评价,相关研究多为定性描述,但客观定量评价不够。此外,在北极航道风险评估中,使用传统的层次分析法(AHP)确定指标权重。该方法在构造判断矩阵时会忽略人的主观判断影响,需要完成复杂的一致性检验。王泽林[10]等人提出了基于海冰密度、风速、能见度、温度和海拔高度等风险评估方法的风险评估理论。

Sahin B [11]等人提出了基于专家经验的 IF-AHP 方法来识别和量化北极航行风险。Kum S [12]等人运用故障树分析方法对 1993 年至 2011 年北极航行事故及其原因进行了统计分析。Haas C [13]等人研究了东北航道的海冰厚度对预测海冰的分裂,夏季海冰状况和海冰对夏季航运的危害评估具有重要意义。Yang

L Z [14]等人使用 Arc-GIS 初步探索了北极东北航道的风险区划。Yang M Q [15]等人系统地梳理了北极的机遇, 挑战和风险。Wang Y J [16]等人基于博弈论的思想, 对北极周边国家在各种合作模式下的争端进行了模拟预测和实验模拟。相关研究多为定性描述, 但客观定量评价不足[17] [18] [19] [20]。

针对这些问题和研究现状, 本文拟以风险分析理论和高精度数据为基础, 分析北极东北航道可能面临的气候变化响应风险, 梳理东北航道开通所面临的自然环境和地理要素, 并选取关键要素构建指标体系。本文采用模糊决策方法, 结合主客观指标确定权重, 以期在一年的 12 个月内通过东北航道进行风险评估。为东北航道的开通提供了一种决策方法。

2. 研究领域

文章以北极东北航道为研究样本区, 建立自然环境风险指标体系。东北航道大部分位于俄罗斯北部沿海北冰洋。航道起于北欧, 经北冰洋巴伦支海、卡拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海向东至白令海峡, 最后, 连接东北亚海峡。选取北极东北(20°E~180°E, 68°N~83°N)区域作为主要航道进行研究。东北航道共有 58 条海峡连接 5 个海区, 其中 10 条最为重要, 不同海区的气象条件不同。其中, 巴伦支海平均水深约 29 米, 气候相对温暖, 冰情较轻。喀拉海海水略浅, 平均 118 米, 水深小于 50 米的海域占整个海域的 40%, 同时多雾, 夏季能见度低。拉普捷夫海平均水深 519 m, 但 53% 的水深小于 50 m, 南部海域全年气温低于 9 个月。东西伯利亚海非常浅, 平均水深不足 45 米, 冰期长达 9 个月。

3. 风险指标体系

指标的识别和确定对于风险指数的判断是非常重要的。指标的合理性和代表性直接影响评价过程的可靠性。北极地区自然环境复杂多变, 影响船舶航行的因素很多。本文根据北极东北航道的实际情况, 考虑指标数据的有效性, 建立了北极东北航道自然环境风险评价指标体系。

北极地区全年气温较低, 低温将对船只和船员造成损害是显而易见的。此外, 北极地区大风、浓雾等恶劣天气也将直接威胁到船舶航行。从地理环境来看, 东北航道大部分位于俄罗斯北冰洋沿岸, 沿线有复杂的岛屿、海峡、海湾冰山等, 复杂地形的增加等不确定因素将使航行船舶面临运输风险。根据以上分析及研究成果, 确定了东北航道的海冰、大风、低能见度等气象水文因素以及海岛、暗礁等地形条件的危险因素。

3.1. 指标体系

根据本文的研究目标, 将自然环境风险因素分为两类, 一类是海洋环境风险, 包括海冰密度风险指数(a_1)、无冰和轻冰日指数(a_2)、低能见度风险指数(a_3)、大风风险指数(a_4)、气温影响指数(a_5), 二是地理环境风险, 主要包括航道水深风险指数(b_1)、航道宽度风险指数(b_2)、海岛风险指数(b_3)、暗礁风险指数(b_4)。它们共同构成了北极东北航道自然环境风险评价指标体系。

3.2. 海洋环境风险指标

利用海冰密度风险指数 a_1 评价海冰密度对船舶航行的威胁。海冰密度越高, 风险就越大。这个数值可以直接从欧洲中期天气预报中心公布的数据中获得。

无冰和轻冰日(a_2)样品区海冰密度小于 50% 的日子, 数值越大, 风险越小。

$$a_2 = \frac{X_2}{Y_{2\text{year}}} \quad (1)$$

其中, X_2 是无冰和轻冰的天数, Y_2 是总天数。

低能见度风险指数(a_3)评估低能见度对船舶航行的影响。能见度指数越低, 危险越大。

$$a_3 = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\omega_1} \left(\frac{X_3}{Y_3}\right)^{\omega_2} \quad (2)$$

其中, V_0 为低能见度参考值, 按国际雾级有关规定取 4 km。 V 是平均能见度小于 V_0 。 X_3 是能见度小于 V_0 的天数值, Y_3 是总天数。 ω_1 和 ω_2 频率表示分别强度、频率的权重, 用德尔菲法(Delphi)确定, 分别取为 0.6 和 0.4。

用大风风险指数(Gale risk index, a_4)评价大风对船舶航行的威胁程度。值越大, 风险越大。

$$a_4 = \left(\frac{Q^2}{Q_{\min}^2}\right)^{\omega_3} \left(\frac{X_4}{Y_4}\right)^{\omega_4} \quad (3)$$

其中, Q_{\min} 为大风最小标准值, 为 10.8m/s。 Q 是风速大于 Q_{\min} 的平均值, X_4 是风速大于 Q_{\min} 的天数。 Y_4 表示总天数, 用德尔菲法确定大风强度和频率分别取为 0.5 和 0.5。

气温影响指数(a_5)用于评估气温对船舶航行的影响程度。温度越低, 危害越大。

$$a_5 = \begin{cases} 0 & T > 0^\circ\text{C} \\ \left| \frac{T}{0 - T_{\min}} \right| & T \leq 0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

其中, T_{\min} 是最低温度, T 是平均温度。

3.3. 地理环境风险指标

航道水深危险指数(b_1)用于评价航道水深对船舶的危险程度。水深越小, 船舶触礁搁浅的可能性越大, 风险也越大。

$$b_1 = \begin{cases} 0 & \frac{\text{Num}(\text{depth} \geq S)}{\text{Num}(\text{all})} \geq 0.6 \\ 1 - \frac{D}{S} & 0 < \frac{\text{Num}(\text{depth} \geq S)}{\text{Num}(\text{all})} < 0.6 \end{cases} \quad (5)$$

式中, depth 为实际水深, S 为安全水深, 取 $S = 50$ m 为参考值, D 为水深小于 50 米区域的平均值。 $\text{Num}(\)$ 是水深数据文件 NC 中网格点的数目。

航道宽度风险指数(b_2)用于评估航道宽度对被保险船舶的威胁。宽度越窄, 风险就越大。

$$b_2 = \begin{cases} 0 & W > H \\ 1 - \frac{W}{H} & 0 \leq W < H \end{cases} \quad (6)$$

其中, W 是通道的测量宽度。 H 为安全宽度, 取 $H = 50$ km 为参考值。同时 $W \geq 50$ km 时, 认为不利宽度的风险为 0, 或当 $W < 50$ km 时, 根据式(6)计算。

岛屿风险指数(b_3)评估岛屿对被保险船舶航行的威胁。价值越高, 岛屿越密集, 风险越大。

$$b_3 = \frac{A_I}{A} \quad (7)$$

其中, A_I 表示目标区域中的岛屿分布区域; A 表示目标区域的总面积。

礁石风险指数(b_4)评估礁石对危险船只的威胁。价值越高, 暗礁越密, 风险越大。

$$b_4 = \frac{A_u}{A} \quad (8)$$

其中, A_u 为目标区礁分布面积, A 为目标区总面积。

4. 模糊综合评价模型

4.1. 综合评价方法

模糊综合评价(FCE)是基于模糊数学的[17]。它应用模糊综合关系原理对一些定义不清, 或不易量化的因素进行量化。它是模糊数学在自然科学和社会科学领域的一个重要应用[21] [22] [23] [24]。根据模糊综合评价原理, 将多方案优化问题转化为求解评价向量 $B = A \cdot R$ 。因此, 如何确定模糊评价指标矩阵 R 和指标重要性向量 A 是多方案排序优化的关键。

4.2. 船型模糊综合评价模型

模糊综合评价方法包括三个部分。第一部分是一组备选方案, 称为方案集。第二部分由评价因素或指标构成, 称为指标集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。第三部分是单因素评价。在单因素评价的基础上, 进行模糊综合评价。还进一步确定了三种元素的类型。

1) 定义方案集

方案集由一系列设计方案组成 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。

2) 确定评价因子, 构建指标集

选择能反映方案质量的因素作为指标。这些指示器由指示器组组成, 表示为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。

3) 评价指标集

对于每个方案中的每个指标, 总是有一个期望值 q_i 和允许值 m_i 。对于任何模糊子集 A_i , 它被定义为其区间上的最优值。模糊子集 A_i 定义为

$$A_i = \int \frac{\mu_{A_i}(u_i)}{u_i} \quad (9)$$

其中 $\mu_{A_i}(u_i)$ 是满意度函数 u_i , 它的特征是相应评价指标的满意度。

当满意度随评价指标的增加而单调增加时, 其形式为 $\mu_{A_i}(u_i)$

$$\mu_{A_i}(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq m_i \\ L_i(u_i) & m_i < u_i < q_i \\ 1 & u_i \geq q_i \end{cases} \quad (10)$$

当满意度随评价指标的降低而单调递减时, 其形式为 $\mu_{A_i}(u_i)$

$$\mu_{A_i}(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \geq q_i \\ L_i(u_i) & q_i < u_i < m_i \\ 1 & u_i \leq m_i \end{cases} \quad (11)$$

通过对方案的各项评价指标进行评价, 得出方案的综合评价指标。在得到方案的综合评价指标后, 通过绘制满意度曲线, 得到方案的模糊指标。对于每个方案, 对每个评价指标进行评价, 得到模糊评价指标矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

在模糊矩阵 R 中，每一行的每个元素都表示为对应方案的一个评价指标的值，对应一个统一的评价标准。每一列的每个元素都表示为某一方案的每个评价指标的值。因此，每个模糊矩阵都是一个单因素评价表。

4.3. 综合评价

根据该模型，需要综合考虑多个评价指标和多个复杂因素，才能得到最优方案。因此，有必要对单因素评价后的各因素进行综合评价。由于不同因素(指标)的重要性不同，它们所代表的权重或程度也不同。

评价对象 S 有 n 个因子，各因子的评价值为 $(i=1,2,\dots,n)$ ，则 S 的总评价值为：

$$S = \sum_{i=1}^n a_i \tag{13}$$

其中， S 作为对象的评价标准。

综合评价法(或加权平均法)的加权和也被采用。对于评价对象 S 的评价因子 $a_i (i=1,2,\dots,n)$ ，如果根据各因子的重要性赋予其权重 $\lambda_i (i=1,2,\dots,n)$ ，则可以得到加权平均评价

$$S = \sum_{i=1}^n \lambda_i a_i \tag{14}$$

其中 $\lambda_i \geq 0$ ，同时 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 。

ω_i 表示为第 i 个因子的权重，其中 $\omega_i \geq 0 (i=1,2,\dots,n)$ 。如果 $\varpi = \sum_{i=1}^n \omega_i$ ，并且 $a_i = \omega_i / \varpi$ ，通过规范化 ω 可以得到一个模糊权重向量集 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ ，其中 a_i 定义为第 i 因子的重要度。

在确定了权重向量 A 和单因素评价矩阵 R 后，将模糊综合评价问题归结为一个模糊综合评价向量 B ，如下所示：

$$B = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = A \cdot R = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m) \tag{15}$$

其中， $b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij})$ ， $(j=1,2,\dots,m)$ ，符号 \vee 表示取小值运算。

为获得采样区最新的自然环境风险特征，数据时间序列为 2018 年 1~12 月。对于上面给出的每个指标，采用专家评分法获得指标体系权重，如表 1 所示。

Table 1. Index weight table
表 1. 指标权重表

指标	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_1	b_2	b_3	b_4
权重	0.28	0.11	0.21	0.10	0.19	0.11	0.00	0.00	0.00

海冰密度、海风和海面温度的数据来源于 ECMWF。数据为高精度网格点为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的日均数据(<http://apps.ecmwf.int/datasets/>)。水深、岛屿和珊瑚礁数据来自 <http://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client/>，美国地球物理发布中心。能见度数据来自美国国家海洋和大气管理局(<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=clim&cfg=cdo&theme>)。

根据上述计算公式, 得到指标体系权重, 如表 2 所示。

Table 2. Monthly average risk index value of general aviation in 2018

表 2. 2018 年每月通航平均风险指数值

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
风险指数值	0.873	0.786	0.699	0.611	0.524	0.480	0.437	0.393	0.349	0.507	0.620	0.786

5. 航线评价

表 2 给出了 2018 年各月的航行风险指数值。从每个月的风险值可以看出, 一年中最适合航行的月份是 7 月左右, 风险值在 0.35~0.45 之间。航行经验表明, 北极东北航线适合 7 月至 10 月航行, 与航行经验相符。其次, 根据风险值的变化趋势线, 如图 1 所示, 北极(研究区)全年风险呈现先降后升的趋势, 风险值在 9 月份降至最低, 在 12 月份和 1 月份达到最高。

DNV 和 GL 船级社分区图的风险值也呈现“西低东高”的形式, 即巴伦支海教育海西部风险相对较低, 卡拉海、拉普捷夫海和东西伯利亚海东部风险相对较高, 风险分区结果最低九月, 其次是八月和七月, 一月最高。本文的研究也与之有很好的一致性。

以上分析表明, 在东北航道通航月份, 通航风险最低的是 9 月份, 其次是 6、7 月份, 最高的是 1 月份。

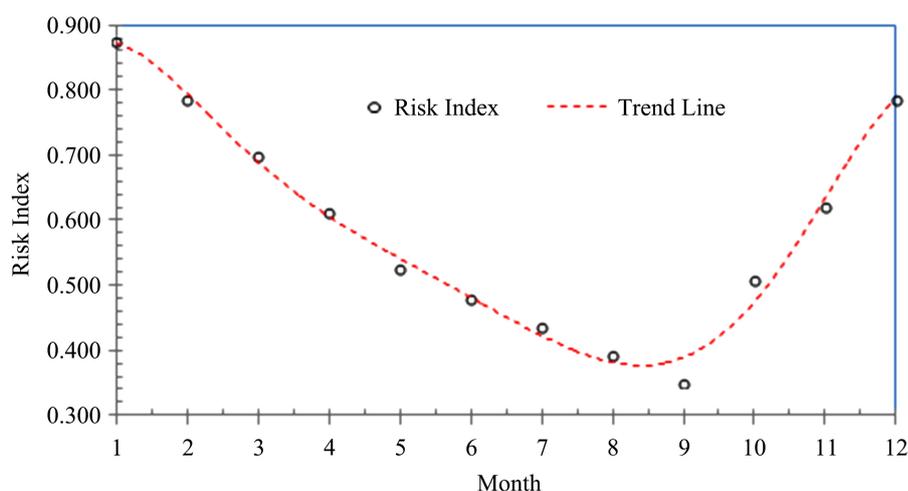


Figure 1. Monthly general navigation risk index value in 2018

图 1. 2018 年每月通航风险指数值

6. 敏感性分析

在航道风险因素中, 航道水深、岛礁等地理因素相对固定。一旦它们固定下来, 风险值就相对固定了。气候影响因素对航行风险更为敏感。选取以下三个风险因子, 温度、海冰密度和风速作为因子变化的敏感度, 来评价风险指标的影响。

图 2(a)~图 2(c)和图 2(d)分别为 2018 年 7 月、8 月、9 月和 10 月的月平均气温。研究区巴伦支海区总体气温高于其他海区, 7~9 月三个月内研究区气温基本在 0°C 以上, 可见 7~9 月气温风险接近零。仅在 10 月份, 卡拉海、拉普捷夫海和东西伯利亚海海域的温度大概 -5°C~0°C, 低于 0°C, 因此温度对综合风险的贡献相对较小。

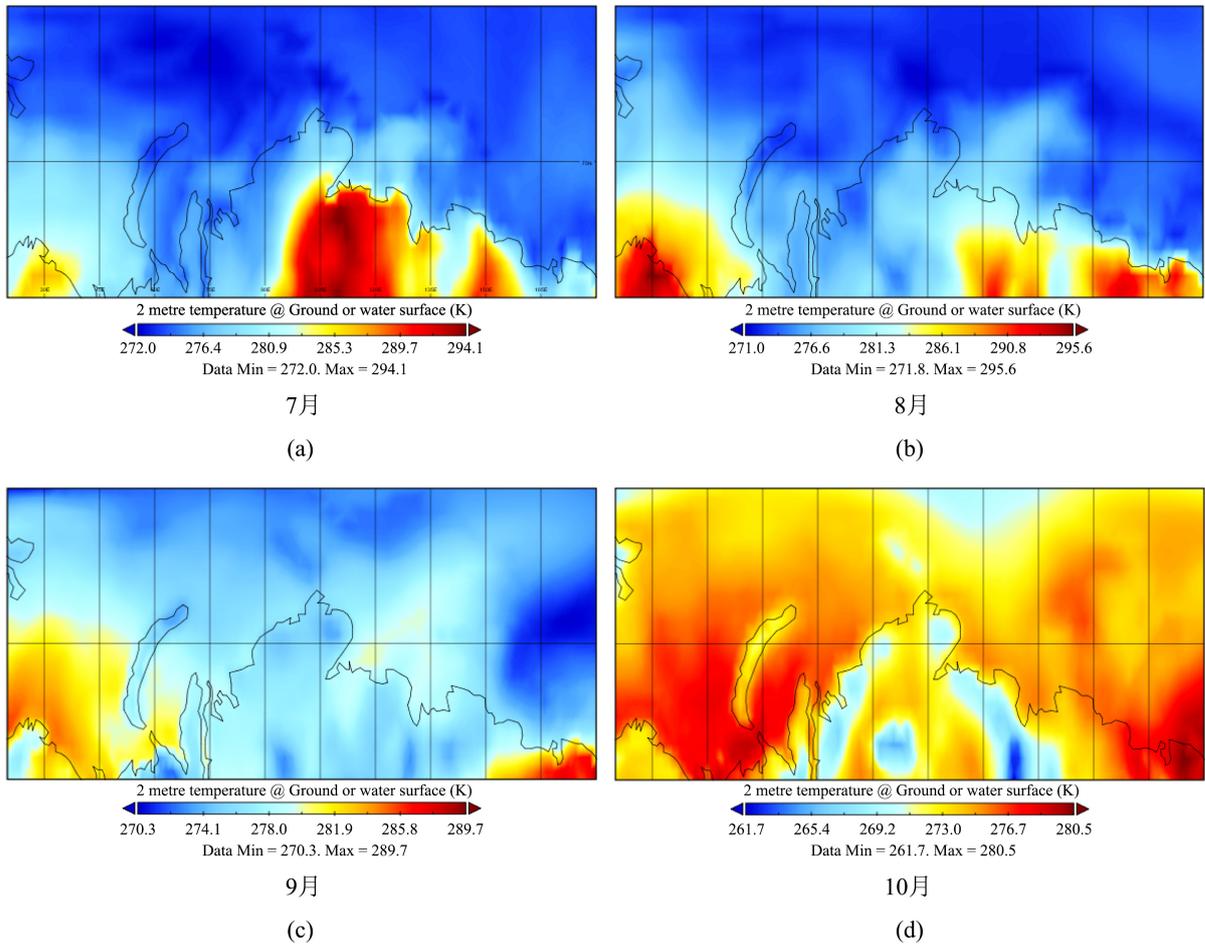
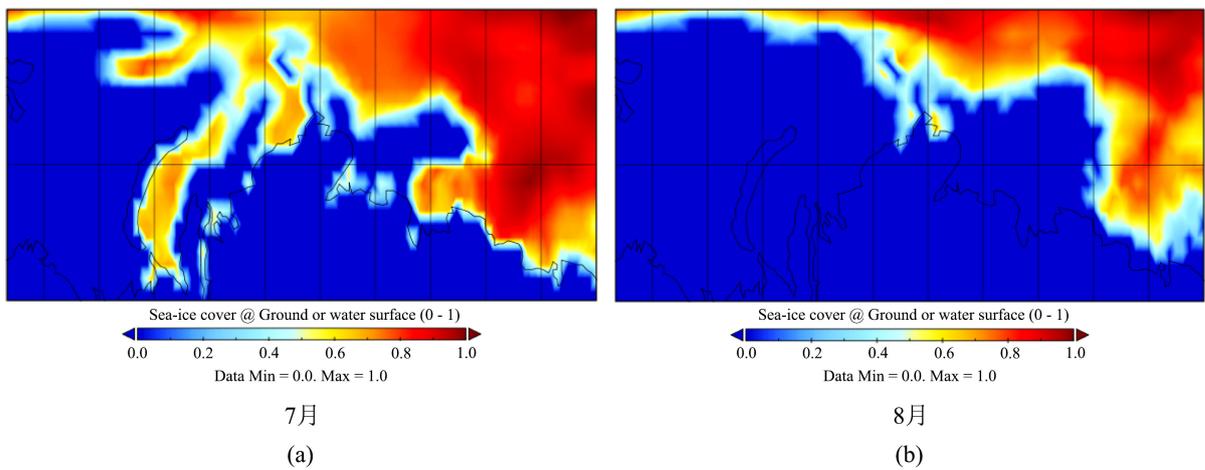


Figure 2. Temperature factor
图 2. 温度因子

图 3(a)~图 3(c)和图 3(d)分别是 2018 年 7 月、8 月、9 月和 10 月的月平均海冰密度分区。9 月份，研究区海冰密度最低，其次是 8 月份，7、10 月份相对严重。巴伦支海和卡拉海的大部分地区几乎没有海冰。可见，海冰密度对拉普捷夫海区和东西伯利亚海区的综合风险贡献很大。



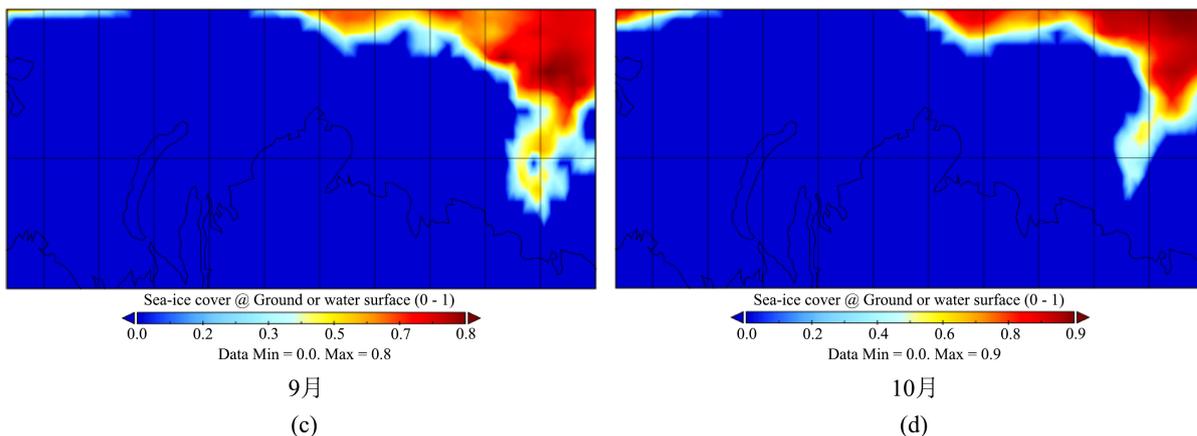


Figure 3. Sea ice density factor
图 3. 海冰密度因子

图 4(a)~图 4(c)和图 4(d)分别是 2019 年 7 月、8 月、9 月和 10 月的月平均风速分区。可见，7、8 月份的总体风速相对较小，基本在 6 米以下。9 月和 10 月，总体风速较大，巴伦支海区和卡拉海区风速最大。风速对综合风险的主要贡献区是巴伦支海和卡拉海。船舶航行到上述区域时，必须防止大风可能带来的航行风险。

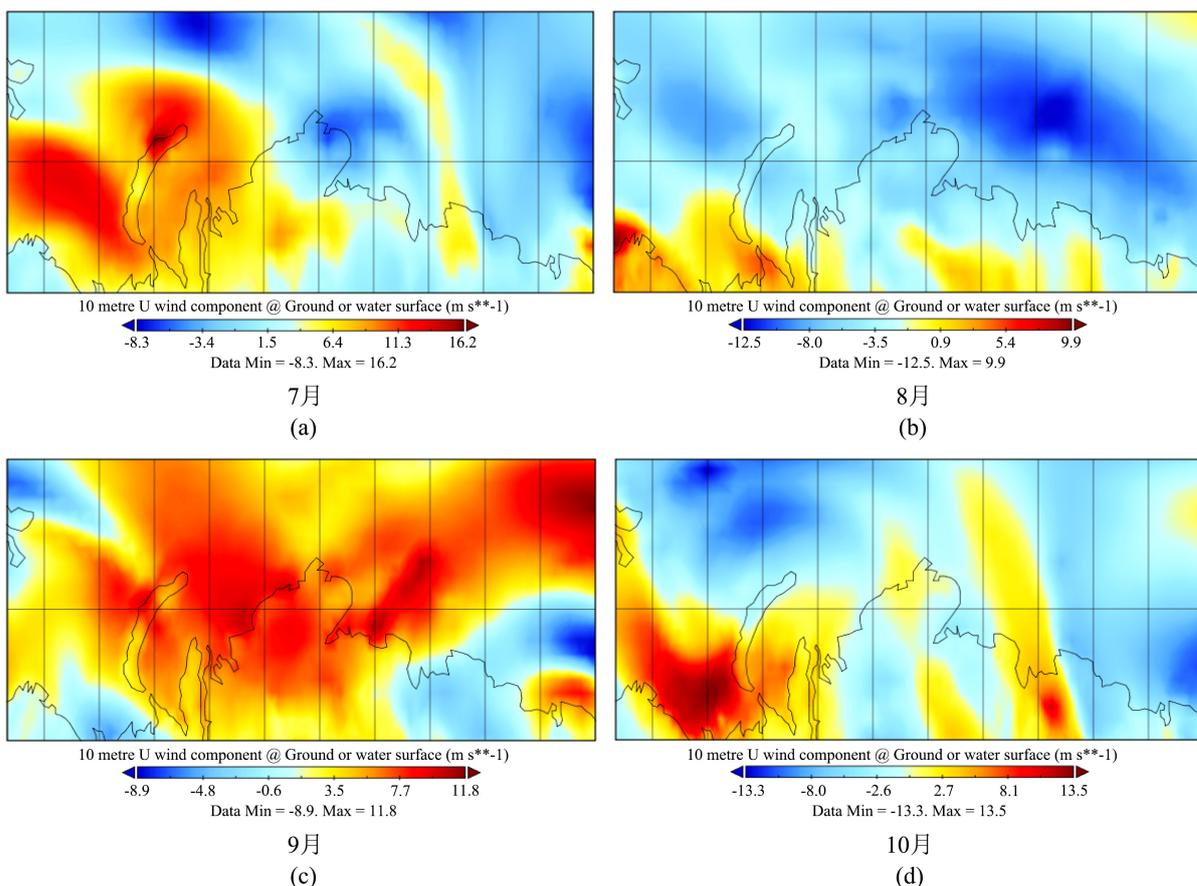


Figure 4. Wind speed factor
图 4. 风速因子

6. 结论

通过以上研究, 可以得出以下结论:

- 1) 通过定量分析发现, 7~10 月份自然环境风险较其他月份最低。适当的通航月份已核实。
- 2) 通航月份, 不同月份的风险不同, 综合风险最低的月份是 9 月份, 其次是 8 月份, 最高的月份是 10 月份。
- 3) 本文从自然环境的角度研究了北极东北航道部分海域的航行风险。根据敏感性分析, 海冰对综合风险贡献最大, 风速和水深次之, 气温对综合风险贡献最小。

然而, 北极航道的安全航行不仅涉及到自然环境的风险, 还涉及到北极目前所处的政治、经济风险乃至人为风险等。所以在系统研究北极航道过程中, 不仅要同时对北极航道的各种自然环境进行深入、全面的研究, 而且要结合现有的全球化形势下的传统能源航道和国际形势等作为一个系统进行研究。

基金项目

广东省教育科学“十三五”规划课题(2020GXJK140), 2020 年度广东省普通高校特色创新项目(2020KTSCX109), 2019 年广东省高等教育教学改革项目(460), 广州市教育科学规划 2020 年度课题(202012530), 广州市高等学校第十一批教育教学改革研究项目(服务于粤港澳大湾区邮轮全产业链的“双创”型人才培养模式改革与实践), 广州市教育局 2020 年高校科研项目(202032775), 2021 年广州市教学成果培育项目(2020123241)。

参考文献

- [1] 2019 年我国外贸进出口总值 31.54 万亿元人民币, 同比增长 3.4%[EB/OL]. <http://news.cctv.com/2020/01/14/ARTIqTBcz4SBFi7kSpoOk2j200114.shtml?spm=C94212.P4YnMod9m2uD.ENPMkWvfnaiV.6>, 2020-01-14.
- [2] 习近平出席中国-东盟商务与投资峰会开幕式并致辞[EB/OL]. http://www.gov.cn/ldhd/2012-09/21/content_2230641.htm, 2012-09-21.
- [3] 习主席是“一带一路”伟大筑梦者[EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/politics/2018-09/22/c_1123470306.htm, 2018-09-22.
- [4] 李克强出席中国-东盟博览会并演讲[EB/OL]. http://www.gov.cn/jrzq/2013-09/04/content_2480860.htm, 2013-09-04.
- [5] Bai, J. (2015) The IMO Polar Code: The Emerging Rules of Arctic Shipping Governance. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, **30**, 674-699. <https://doi.org/10.1163/15718085-12341376>
- [6] Dnv, G.L. (2016) The Arctic Risk Map. <https://maps.dnvgl.com/arcticriskmap>
- [7] 付强. 北极西北航道通航关键海区海冰变化规律研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [8] 曹玉墀. 北冰洋通航可行性的初步研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [9] 李振福, 王文雅, 尤雪, 等. 中国北极航线战略环境的模糊综合评价[J]. *中国航海*, 2015, 38(3): 126-130.
- [10] 王泽林. 北极航道法律地位研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
- [11] Sahin, B. and Kum, S. (2015) Risk Assessment of Arctic Navigation by Using Improved Fuzzy-AHP Approach. *International Journal of Maritime Engineering*, **157**, 241-250. <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2015.a4.337>
- [12] Kum, S. and Sahin, B. (2015) A Root Cause Analysis for Arctic Marine Accidents from 1993 to 2011. *Safety Science*, **74**, 206-220.
- [13] Haas, C. and Howell, S.E.L. (2015) Ice Thickness in the Northeast Passage. *Geophysical Research Letters*, **42**, 7673-7680.
- [14] 杨理智, 张韧, 葛珊珊, 等. 基于气候变化背景下西北航道自然环境风险评估[C]//中国气象学会. 第 30 届中国气象学会年会论文集. 2013: 696-702.
- [15] Yang, M.Q., Ge, S.S., Zhang, R., et al. (2016) Climate Change and Arctic Response—Opportunities, Challenges and

Risks. *China Soft Science*, No. 6, 17-25.

- [16] 汪杨骏, 张韧, 钱龙霞, 等. 北极海冰消融情景下环北极国家利益争端的动态博弈建模技术[J]. 极地研究, 2016, 28(2): 257-266.
- [17] 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.
- [18] 李珍. 北极航道开通与中国的潜在经济利益研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [19] 刘惠荣, 刘秀. 西北航道的法律地位研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2009(5): 1-4.
- [20] 刘文生, 吴作启, 崔铁军. 基于三角模糊数的 AHP-TOPSIS 村庄下开采接续方案优选方法研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(2): 458-461.
- [21] Christer, C. and Robert, F. (1996) Fuzzy Multiple Criteria Decision Making: Recent Developments. *Fuzzy Sets and Systems*, **78**, 139-153.
- [22] Liao, H.C. and Xu, Z.S. (2013) A VIKOR-Based Method for Hesitant Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, **12**, 373-392.
- [23] Liao, H.C. and Xu, Z.S. (2014) Satisfaction Degree Based Interactive Decision Making under Hesitant Fuzzy Environment with Incomplete Weights. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, **22**, 553-572.
- [24] Wang, J.-Q., Nie, R.-R., Zhang, H.-Y. and Chen, X.-H. (2013) Intuitionistic Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Method Based on Evidential Reasoning. *Applied Soft Computing*, **13**, 1823-1831.