

北极东北航道航行风险的熵变权模糊综合评价

汪 恒

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对现有北极东北航道航行风险评价中存在的风险等级划分不严谨, 固定的风险指标权重未能反映航行风险变化等问题, 提出熵变权模糊综合评价模型。首先, 根据已有的文献资料和航行实际, 筛选风、气温、能见度、海冰等11项指标, 建立北极东北航道航行风险评价指标体系, 确定航行风险评价的因素集和评价集; 接着, 从单因素模糊评估出发, 得到模糊综合评价矩阵及熵权向量, 考虑风险指标权重与风险发生概率及危害后果的关联性, 建立风险状态变权系数向量及熵变权向量; 然后, 构建熵变权模糊综合评价模型, 进行模糊综合评价; 最后, 通过算例进行实证分析。结果表明: 该模型相比于常权模型具有更好的适应性及准确性, 可作为船舶航行风险评价的有效模型。

[关键词] 北极东北航道; 航行风险评价; 评价指标体系; 熵变权; 模糊综合评价

[中图分类号] U 698.6

Navigation Risk Assessment of the Northeast Passage Based on Entropy Variable Weight Fuzzy Comprehensive Evaluation

WANG Heng

(Navigation College of Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: For the problems of imprecise risk classification and fixed constant weight evaluation not reflecting the changing risks, the entropy variable weight fuzzy comprehensive evaluation model is proposed to evaluate the changing navigational risks in the the Northeast Passage. Based on existing literature and navigation practices, 11 indicators such as wind, temperature, visibility and sea ice are selected to establish the navigation risk assessment indicator system for the Northeast Passage. The factor set and evaluation set for navigation risk assessment are determined, and an entropy variable weight fuzzy comprehensive evaluation model is constructed. Starting from single factor fuzzy evaluation, a fuzzy comprehensive evaluation matrix and entropy weight vector are obtained. Considering the correlation between the risk index weight and the risk occurrence probability and hazard consequence, the risk state variable weight coefficient vector and entropy variable weight vector are established, and then fuzzy comprehensive evaluation is carried out. Finally, an empirical analysis is conducted through the example. The results show that the model has better adaptability and accuracy than the constant weight model, and can be used as an effective model for ship's navigation risk assessment.

Keywords: the Northeast Passage; navigation risk assessment; evaluation indicator system; entropy variable weight; fuzzy comprehensive evaluation

[收稿日期] 2024-08-05

[基金项目] 福建省教育厅面上项目 (JAT200276)

[通信作者] 汪恒 (1982—), 讲师, 从事海上交通安全评价与风险控制方向研究。E-mail: subey_wh@126.com

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

0 引言

随着全球气候变暖, 北极海冰逐渐消融, 东北航道的通航时间将越来越长^[1]。相比传统航线, 北极东北航道既具有缩短航程、节省时间和燃油、降低运输成本等优势, 还可避免如马六甲海峡、苏伊士运河等敏感水域的航行风险。作为穿越北冰洋连接亚洲与西欧的最短海上通道, 其商业和战略价值不可估量。但由于受海冰、低温、高纬度等不利自然条件的影响, 东北航道安全通航仍存在诸多困难, 对航经东北航道的船舶进行航行风险评估, 并据此制定周密的应对预案, 有利于降低船舶航行北极的安全风险。目前, 针对水域船舶的航行风险评价, 主要侧重于构建风险评价模型和确定评价指标权重两个方面。李壮等^[2]考虑海冰等风险因素, 提出基于客观检测数据的贝叶斯动态风险评估方法, 实现船舶北极航行的动态风险评价; 常安^[3]从水文气象、航道状况、助航设施、船舶结构等方面构建评价指标体系, 采用层次分析法、熵值法及模糊综合评价法, 实现对北极东北航道通航安全性的评价; 张志瑞^[4]选择气象环境、水文环境、地理环境、交通管制环境、助航设施及信息情报环境、地缘政治环境 6 个一级指标建立评价指标体系, 采用可拓法和云模型相结合的方法对北极东北航道通航环境进行评价; 刘晓佳等^[5]确定能见度、风、流速、航道长度等 11 个风险因素, 提出基于组合赋权的改进灰云聚类综合评价模型, 对港口水域的通航环境危险度进行评价; 汪恒等^[6]考虑自然、航道、交通和管理 4 个因素, 构建基于区间直觉模糊集的风险评价模型, 通过区间直觉模糊数的相似度判定船舶航行风险等级。总体来看, 传统的航行风险评价模型在确定指标权重时主观性强, 权重确定与风险评价各用一套数据, 缺乏关联性, 且权值均为固定不变的常权。常权评估模型未充分考虑影响指标权值的因素, 而且对现有模型进行测试, 发现存在着风险指标值改变极大却对风险评估结果影响很微弱的不合理现象。但航行风险评价有其特殊性, 当某一指标的风险值过高且会带来严重后果时, 其对整体风险等级的判定具有决定性的影响。例如, 当海上风力达到 7 级时, 船舶应采取停航措施, 且风力越大, 风险程度呈指数倍增加。因此, 随着船舶航行风险的不断变化, 需要对相应的风险评价指标权重进行适当调整。熵变权的基本思想是以熵权为基础, 考虑指标的风险发生概率和危害后果, 确定熵变权的基本公式, 将常权修正为变权。而模糊综合评价则能较好地处理航行风险因素评价边界模糊的问题, 将风险发生概率及危害后果以隶属度的形式体现。本文拟将二者结合, 针对北极东北航道航行风险建立一种新的航行风险评价模型。

1 北极东北航道航行风险评价指标体系的确立

为构建合理的评价指标体系, 首先, 要全面分析影响北极东北航道航行风险的各种因素, 包括水文气象、航道状况、助航设施、船舶冰级、船员素质等诸多方面; 然后, 深入了解中远海运特运有限公司近年来完成的多个北极航次所遇到的实际航行风险情况, 并对东北航道近 20 年海难事故原因^[7]进行分析和总结; 最后, 对现有文献中关于航行风险的评价指标进行梳理。

考虑北极东北航道的特殊性, 在遵循目标导向、科学严谨性、系统性、可衡量性及独立性等原则的基础上, 初步筛选出风、海浪、气温、能见度、海冰、海流、航道宽度与深度、交通流量、碍航物、破冰船引航、通信导航设备、船舶冰级、船员技能素质共 13 个评价指标。将上述 13 个指标的选取及增补情况形成调查问卷, 征集了 25 位行业内专家的调查结果, 最终删除了“海浪”及“交通流量”两个得票率最低的指标。删除“海浪”的理由为: 风是产生海浪的主要原因, “海浪”与“风”有指标重复之嫌; 而删除“交通流量”的原因是: 在北极东北航道的开阔水域, 交通流量对船舶航行安全的影响很小。最终的评价指标体系共包括 11 个评价指标, 各指标的含义如表 1 所示。

1) 风。大风容易造成船舶摇摆、偏航、碰撞、搁浅、能见度下降等情况, 风还会吹动浮冰对极地航行船舶带来潜在威胁。其对船舶航行安全的影响不容忽视, 且风力越大, 航行风险急剧增加。根据北极科考观测数据, 北极水域风速不大, 平均风速在 4 级 (4 ~ 6 m/s) 左右; 但在喀拉海西部及楚科奇海附近的洋面, 冬季大风出现的频率非常高, 每月大风日可达 10 ~ 14 d。

表 1 北极东北航道航行风险评价指标及其含义

Tab.1 Navigation risk assessment indicators and their meanings in the Arctic Northeast Passage

评价指标	指标含义
风	风力越大,航行风险越大,一般认为 7 级以上大风为高风险
气温	气温越低,航行风险越大,气温 -2 ℃ 以下将增加海面结冰风险
能见度	能见度越低,航行风险越大,一般定义能见度小于 1 nmile 为不良
海冰	海冰越厚,冰龄越大,航行风险越大,且海冰密集度达到 4 级以上时,航行有障碍
海流	流速越大,航行风险越大,一般认为流速 2 ~ 3 m/s 时风险较大
航道宽度与深度	航道越窄越浅,航行风险越大,通常用船舶富余宽度和深度衡量
碍航物	碍航物离航道越近,航行风险越大,当距离小于 50 m 时有较高风险
破冰船引航	破冰船破冰能力越强,航行风险越小,通常要结合冰情来考虑
通信导航设备	通信导航设备覆盖范围越大,使用正常率越高,航行风险越小
船舶动力及冰级	船舶动力及破冰能力越强,航行风险越小,通常要结合冰情来考虑
船员素质和技能	船员素质和技能越高,航行风险越小,通常以评判者的主观评价为主

2) 气温。低温易使海面结冰,还会影响船舶主机的正常运行,也会给船舶操纵人员带来负面影响,很容易产生风险事故。北极水域冬季气温较低,最低温度可低至零下 40 ℃;夏季气温较高。每年的 7—9 月是航行北极东北航道的“黄金”时段。

3) 能见度。海上航行时的能见度一般指正常目力所能见到的最大水平距离,主要受雾、雨、雪等因素影响。能见度不良容易带来偏航、搁浅、触碰冰山等重大险情。北极水域的平流雾在夏季比较常见,特别是在东西伯利亚海和楚科奇海的开放海域,夏季的月雾日数为 15 ~ 20 d。另外,风吹雪也会带来能见度下降。

4) 海冰。北冰洋的海冰是影响航行安全的首要因素。海冰形成的时间越久、厚度越厚、密集度越大,船舶航行风险越大,必要时需借助破冰船引航。巴伦支海和喀拉海的海冰平均厚度冬春季为 0.71 m,夏秋季为 0.34 m,是东北航道中受海冰影响较小的海域;而楚科奇海、拉普捷夫海和东西伯利亚海的海冰较厚,覆盖面积较大,多年冰占比较高^[8]。

5) 海流。海流会给船舶操纵带来困难,可能造成船舶发生偏转、岸吸、岸推等风险。在东北航道的扬斯克海峡和维利基茨基海峡,海流流速时常会高达 5 kn 以上,对船舶航行安全影响较大。

6) 航道宽度与深度。适宜的航道宽度和深度是船舶安全航行的基本保障,狭窄的、富余水深不足的航道容易造成船舶碰撞、搁浅等事故的发生。北极东北航道海峡最窄处的宽度大于 1 nmile,航行风险相对较小;但冰情较好的近岸航道存在水深不足现象,有些海域水深只有 10 ~ 15 m,则影响船舶安全通航。

7) 碍航物。该指标可用碍航物到航道边线的距离来衡量,距离越近,航行风险越大。东北航道的碍航物主要有马托奇金海峡西部海域的暗礁、喀拉海峡东北区域的岛屿与礁石等。

8) 破冰船引航。在冰区航行,破冰船的作用巨大。破冰船产生的风险主要来自其破冰能力及编队航行状况,一旦遇到严重的冰情或编队内任一船舶故障,就容易造成船舶“追尾”。

9) 通信导航设备。通信及导航设备是保障船舶按照规划航线航行并及时规避风险的重要手段,可从覆盖范围、使用正常率等方面评估其对船舶航行的影响。在北极的高纬度水域,由于通信设备的使用效率存在不确定性,磁罗经和陀螺罗经也会出现航向数据偏差,对船舶安全航行产生较大影响。

10) 船舶动力及冰级。在极地水域,救援及岸基保障能力匮乏,船舶动力系统一旦发生无法排除的故障,后续处理工作将困难重重。同时,船舶的冰级等级决定着船舶的冰区航行能力,对航行安

全产生较大影响。冰级船应在船舶结构、部件和主机功率等方面进行加强和改进，以适应冰区的不同冰情^[9]。

11) 船员素质和技能。北极东北航道通航环境特殊，海图等航行资料及助航设施尚不够完善，低温及高纬度环境对船舶部分设备还存在不良影响，因此，航行北极航线的船员在开航前需经过严格的培训，以良好的心理素质和技能确保航行安全。

2 熵变权模糊综合评价的航行风险评价模型构建

熵变权模糊综合评价模型涉及 5 个基本要素：因素集、评价集、权重集、单因素模糊评估及模糊关系合成运算。在对各指标进行单因素评估的基础上，构建模糊关系的隶属度矩阵，利用熵权法确定各指标的变异程度，并计算各指标的熵值及权重。考虑风险指标变权的基本原理，将熵权向量转化为熵变权向量，再利用模糊合成算子，进行最终的模糊综合评价。其模型构建过程如图 1 所示。

2.1 确定航行风险评价的因素集

因素集 U 是以影响评价对象的 m 种因素为元素所组成的普通集合，可表示为： $U = \{U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_m\}$ ，其中，元素 U_i 代表影响评价对象的第 i 个因素， $1 \leq i \leq m$ 。根据已确立的评价指标体系可知，航行风险评价的因素集共有 11 个影响因素，即 $m = 11$ ，因素集 U 具体可表示为 $U = \{\text{风 } U_1, \text{气温 } U_2, \text{能见度 } U_3, \text{海冰 } U_4, \text{海流 } U_5, \text{航道宽度与深度 } U_6, \text{碍航物 } U_7, \text{破冰船引航 } U_8, \text{通信导航设备 } U_9, \text{船舶冰级 } U_{10}, \text{船员技能素质 } U_{11}\}$ 。

2.2 建立评估对象分级的评价集

评价集 V 是评价者对评价对象可能判定的 n 种结果所组成的普通集合，可表示为： $V = \{V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_n\}$ ，其中，元素 V_j 代表第 j 种评价结果， $1 \leq j \leq n$ 。一般情况下，对航行风险评价可分为 5 个等级，即 $n = 5$ ，评价集 V 具体可表示为 $V = \{\text{低风险 } V_1, \text{较低风险 } V_2, \text{中等风险 } V_3, \text{较高风险 } V_4, \text{高风险 } V_5\}$ 。

2.3 单因素模糊评估

单独从因素集中的一个因素出发，确定该评估指标对评价集 V 的隶属程度，称为单因素模糊评估^[10]。设 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 为第 i 个因素的评估向量，则 m 个评价指标的评估向量组成模糊综合评价矩阵 $R_{m \times n}$ 。即

$$R_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{m \times n} \end{bmatrix}。$$

(1)

其中： $r_{ij}(j = 1, 2, \dots, n)$ 表示评估因素 U_i 在评价子集 V_j 上的隶属度。隶属度的确定因指标边界的模糊性及评判者的理解不同而有所差异，可采用模糊统计法确定，有 $r_{ij} = d_{ij}/D$ ，且有 $\sum_{j=1}^n r_{ij} = 1$ 。其中：

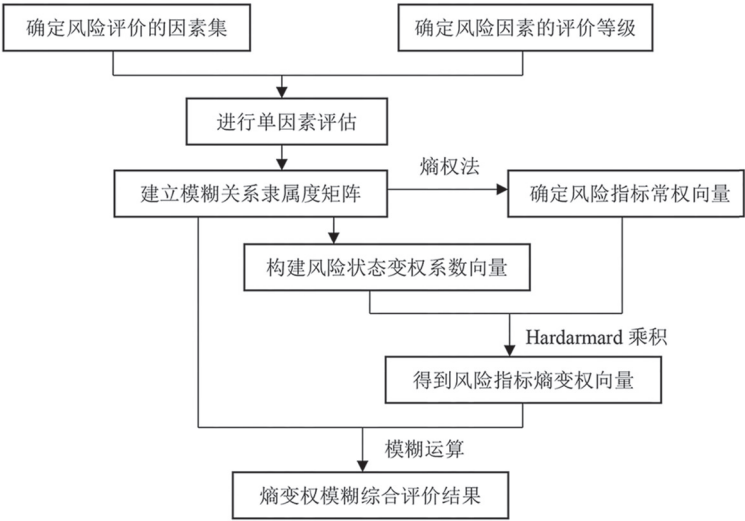


图 1 熵变权模糊综合评价模型构建过程
Fig.1 The construction process of entropy variable weight fuzzy comprehensive evaluation model

d_{ij} 表示指标 $U_i \in V_j$ 的次数； D 表示对 U_i 评价的总次数。

2.4 确定评估指标的熵变权向量

熵是系统无序程度的一个度量。熵权法基本原理是：如果某个指标的信息熵越小，就表明其指标值的变异程度越大，提供的信息量越大，在综合评价中所起的作用越大，则其权重也应越大；反之，其权重应越小。结合式（1）的模糊关系矩阵，确定评估指标的熵权向量 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \cdots, w_i, \cdots, w_m)$ ，其中 w_i 为第 i 个指标的权重。设 E_i 为第 i 个指标的信息熵值，有 $E_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n (r_{ij} \ln r_{ij})$ ，若 $r_{ij} = 0$ ，定义 $\lim_{r_{ij} \rightarrow 0} \ln r_{ij} = 0$ ，有 $w_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^m (1 - E_i)}$ 。熵权法在确定权重时仅考虑指标的变异程度，而未

考虑风险指标的发生概率及危害后果，这与实际不相吻合。

熵变权的基本原理是：如果某个指标的风险发生概率越大，产生的危害后果越严重，在风险评价中的重要性就越大，则其权重也应越大；反之，其权重应越小。因此，指标的风险状态不同，权重也应随之变化。记 $\mathbf{S} = (S_1, S_2, \cdots, S_i, \cdots, S_m)$ 为风险状态变权系数向量，则第 i 个指标的风险变权系数 S_i 为

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^n (j \cdot r_{ij})^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (j \cdot r_{ij})^2} \tag{2}$$

其中， j 代表第 i 个指标的风险等级。由式（2）可理解为： j 值越大，风险等级越高，发生的危害后果就越严重，则变权系数越大； r_{ij} 值越大，风险发生的概率就越大，则变权系数越大。

用 $\mathbf{S} \cdot \mathbf{W}$ 代表向量 \mathbf{S} 与向量 \mathbf{W} 的 Hardarmard 乘积^[11]，有 $\mathbf{S} \cdot \mathbf{W} = (S_1 \cdot w_1, S_2 \cdot w_2, \cdots, S_m \cdot w_m)$ 。向量 \mathbf{S} 的作用就是对常权向量 \mathbf{W} 进行变权，即根据风险指标的发生概率及危害后果对其进行修正。

设 $\mathbf{W}' = (w'_1, w'_2, \cdots, w'_i, \cdots, w'_m)$ 为评估指标的熵变权向量，其中 w'_i 为第 i 个指标的熵变权重，有

$$w'_i = \frac{S_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^m (S_i \cdot w_i)} \tag{3}$$

2.5 熵变权模糊综合评价

利用指标的熵变权向量 \mathbf{W}' 和隶属度模糊关系矩阵 $\mathbf{R}_{m \times n}$ 进行模糊关系合成运算，得出最终的船舶航行风险评价向量 $\mathbf{B}' = (b'_1, b'_2, \cdots, b'_n)$ 。即

$$\mathbf{B}' = \mathbf{W}' \circ \mathbf{R}_{m \times n} = \left(\sum_{i=1}^m w'_i r_{i1}, \sum_{i=1}^m w'_i r_{i2}, \cdots, \sum_{i=1}^m w'_i r_{in} \right) \tag{4}$$

其中，运算符“ \circ ”称为模糊算子。考虑模糊推理过程中运算的合理性，采用“积－和”模糊算子较优。

3 算例分析

基于本研究建立的航行风险评价指标体系和熵变权模糊综合评价模型，在某特定时间对北极东北航道的指定水域进行船舶航行风险评价。

3.1 算例背景资料

拉普捷夫海峡是东北航道上的重要海峡之一，位于俄罗斯大陆与大利亚霍夫岛之间，连接拉普捷夫海与东西伯利亚海，全长 70 nmile，最窄处的宽度约为 27 nmile，深度 50 ~ 63 m，海峡东部入口处有深度 3.5 m 左右的浅滩。海峡地处纬度 74.1°N，海域气候严寒，冬季 1 月份平均气温 -31 ~ -28 ℃，

常见暴风雪；夏季气温相对较高，但 7 月份的最低气温仍在 $-3 \sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，夏季还有雪、雹和雾。海面冰封期达 9 个月以上，海峡内每年 10 月初开始结冰，即使夏季海冰解冻，海面仍有浮冰会影响航行安全。

现以中远海运特运公司的天祺轮为例，评估其于 11 月中旬航经东北航道拉普捷夫海峡时的航行风险。天祺轮总长 189.99 m，型宽 28.50 m，型深 15.80 m，结构吃水 11.00 m，CCS Ice Class B 级，可在轻微冰况下航行，必要时需破冰船辅助；船员均通过了冰区航行相关评估及培训；引航破冰船的冰区加强等级为 IACS PC5，艏向破冰（当年冰）能力为 $0.7 \sim 1.2\text{ m}^{[12]}$ 。拉普捷夫海峡内有少量季节性航标，难以满足船舶的正常助航需求。

3.2 算例航行风险评价

针对上述算例，邀请具有东北航道航行经验的船员或从事北极航行风险研究的专家，对因素集 $U = \{U_1, U_2, \cdots, U_{11}\}$ 中的每个风险评估因素，按照 5 级评价集 $V = \{V_1, V_2, \cdots, V_5\}$ 进行单因素模糊评估。根据 25 份评估调查数据，得到各指标的单因素模糊评估结果（见表 2）。

表 2 各指标的单因素模糊评估结果
Tab.2 Single factor fuzzy evaluation results of each indicator

指标	V_1		V_2		V_3		V_4		V_5	
	d_{i1}	r_{i1}	d_{i2}	r_{i2}	d_{i3}	r_{i3}	d_{i4}	r_{i4}	d_{i5}	r_{i5}
U_1	0	0.00	2	0.08	6	0.24	15	0.60	2	0.08
U_2	0	0.00	1	0.04	3	0.12	14	0.56	7	0.28
U_3	1	0.04	2	0.08	8	0.32	11	0.44	3	0.12
U_4	0	0.00	0	0.00	2	0.08	5	0.20	18	0.72
U_5	4	0.16	8	0.32	10	0.40	3	0.12	0	0.00
U_6	5	0.20	8	0.32	10	0.40	2	0.08	0	0.00
U_7	3	0.12	3	0.12	9	0.36	8	0.32	2	0.08
U_8	0	0.00	4	0.16	4	0.16	10	0.40	7	0.28
U_9	3	0.12	3	0.12	8	0.32	6	0.24	5	0.20
U_{10}	0	0.00	6	0.24	6	0.24	9	0.36	4	0.16
U_{11}	0	0.00	6	0.24	10	0.40	9	0.36	0	0.00

由表 2 可知，模糊综合评价矩阵为：

$$\boldsymbol{R}_{11 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.08 & 0.24 & 0.60 & 0.08 \\ 0.00 & 0.04 & 0.12 & 0.56 & 0.28 \\ 0.04 & 0.08 & 0.32 & 0.44 & 0.12 \\ 0.00 & 0.00 & 0.08 & 0.20 & 0.72 \\ 0.16 & 0.32 & 0.40 & 0.12 & 0.00 \\ 0.20 & 0.32 & 0.40 & 0.08 & 0.00 \\ 0.12 & 0.12 & 0.36 & 0.32 & 0.08 \\ 0.00 & 0.16 & 0.16 & 0.40 & 0.28 \\ 0.12 & 0.12 & 0.32 & 0.24 & 0.20 \\ 0.00 & 0.24 & 0.24 & 0.36 & 0.16 \\ 0.00 & 0.24 & 0.40 & 0.36 & 0.00 \end{bmatrix}。$$

由此计算得出：

熵权向量 $\boldsymbol{W} = (0.131, 0.128, 0.070, 0.199, 0.077, 0.083, 0.039, 0.070, 0.017, 0.062, 0.125)$ 。
熵变权向量 $\boldsymbol{W}' = (0.134, 0.144, 0.049, 0.431, 0.026, 0.026, 0.019, 0.054, 0.008, 0.034, 0.075)$ 。
熵变权模糊综合评价结果 $\boldsymbol{B}' = (0.015, 0.075, 0.176, 0.343, 0.391)$ 。

按照最大隶属度原则，11月中旬北极东北航道拉普捷夫海峡的航行风险等级为“高风险”。

3.3 评价模型的效果分析

如果按照熵权向量 W 进行传统的熵权模糊综合评价，其结果为： $B = (0.038, 0.135, 0.245, 0.348, 0.234)$ 。按照最大隶属度原则，航行风险等级为“较高风险”。而熵变权模糊综合评价的航行风险等级为“高风险”。

若以 $f = (1, 2, 3, 4, 5)$ 分别代表评价集中5个评价等级的分值，分值越大，风险等级越高，对上述评价结果进行去模糊化处理，可得熵权模糊综合评价的风险分值为3.61，熵变权模糊综合评价的风险分值为4.02。

从各指标去模糊化结果来看，熵权模糊综合评价的各指标风险值由高到低排序前5位的依次是：海冰（4.64）>气温（4.12）>破冰船引航（3.80）>风（3.68）>能见度（3.52）。高风险的“海冰”和“气温”对航行风险评价结果具有重大影响，按照变权理论，应适当调整其权值。按公式（3）将关键风险指标“海冰”的权重从0.199调整为0.431，将风险指标“气温”的权重从0.128调整为0.144，使得熵变权模糊综合评价的风险等级要高于传统熵权模糊综合评价。

实际情况是：每年11月初开始，由于海冰及低温的影响，北极东北航道的航行船舶数量急剧减少，而且，中远海运特运有限公司以往在北极东北航道的最后一趟航次是10月份，还未曾于11月中旬有过航次。这也说明熵变权模糊综合评价模型在风险指标变权上具有较好的效果。

4 结束语

构建合理的风险状态变权系数向量是变权评价模型的关键，在模糊综合评价法和熵权法基础上进行的变权设计是一种创新。本研究构建的熵变权模糊综合评价模型，综合考虑评价中的不确定性及模糊性，在确定单因素模糊评估向量及指标熵权的基础上，重点考虑风险指标值对指标权重的影响，利用风险状态变权系数，对“高风险”的关键指标进行加权，对“低风险”的一般指标进行减权，以提高评价结果的合理性。算例分析结果也表明熵变权模糊综合评价模型的风险等级及分值均高于熵权模糊综合评价模型，这更加接近实际情况，反映出变权模型比常权模型具有更好的适应性及准确性，可作为船舶航行风险评价的有效模型。

[参考文献]

[1] 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.

[2] 李壮, 付姗姗, 高郭平, 等. 海冰影响下船舶北极水域航行风险评估方法[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(3): 92-98.

[3] 常安. 北极东北航道通航安全评价研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.

[4] 张志瑞. 基于可拓云模型的北极东北航道通航环境评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.

[5] 刘晓佳, 张荀, 汪强, 等. 基于灰云聚类的港口水域通航环境危险度评价[J]. 中国航海, 2019, 42(3): 55-61.

[6] 汪恒, 兰培真. 区间直觉模糊集的港口水域船舶航行环境风险评价[J]. 中国航海, 2021, 44(2): 38-44, 52.

[7] LAURENT F, OLIVIER F, LAURENT E, et al. Application of the IMO taxonomy on casualty investigation: analysis of 20 years of marine accidents along the North-East Passage [J]. Marine Policy. 2024, 162: 10, 60-61.

[8] 王宜涵. 基于动态贝叶斯网络的北极东北航道航行安全评估[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.

[9] 曹晶, 王刚. 极地船舶规范及其主要技术发展[J]. 船舶, 2023, 34(1): 61-71.

[10] 胡雪雯, 李云安, 范志高. 基于变权模糊综合评判理论的桩基下岩溶顶板稳定性评价研究[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 1-11.

[11] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII): 变权综合原理[J]. 模糊系统与数学, 1995, 29(3): 1-9.

[12] 杨帆. 北极东北航道的航行分析及建议研究[J]. 中国海事, 2022(8): 69-72.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)