

研究论文

# 北极西北航道船舶通航风险分析

王发根<sup>1</sup> 胡甚平<sup>1</sup> 焦喜鑫<sup>2</sup> 付姗姗<sup>3</sup> 席永涛<sup>1</sup> 韩冰<sup>4</sup>

<sup>1</sup>上海海事大学商船学院, 上海 201306;

<sup>2</sup>上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306;

<sup>3</sup>上海海事大学交通运输学院, 上海 201306;

<sup>4</sup>上海船舶运输研究所, 上海 200135)

**摘要** 北极海冰的融化使得北极西北航道通航成为可能, 有必要探讨北极西北航道的安全通航风险控制问题。针对北极西北航道冰情和复杂通航环境下的船舶通航窗口期, 本研究采用时间维度上的过程风险评估方法, 构建了基于系统动力学的北极西北航道通航风险评估模型, 结合北极西北航道 6 条航线的场景条件, 通过 2015—2021 年 7 年间风、雾、浪、海冰的月平均变化的数据分析, 进行北极西北航道船舶通航过程风险仿真, 提出了北极西北航道船舶通航窗口期。仿真结果表明: 北极西北航道全年可通航的时间窗口为 8 月下旬至 9 月上旬, 而选择阿蒙森湾—威尔士亲王海峡—巴罗海峡—巴芬湾和阿蒙森湾—维多利亚海峡—皮尔海峡—巴芬湾两条航线的船舶通航风险相对较低, 从发展上看, 随着海冰快速融化北极西北航道具有较高的通航潜力。

**关键词** 北极 西北航道 风险评估 船舶通航 船舶通航窗口期 系统动力学

doi: 10.13679/j.jdyj.20220303

## 0 引言

北极海冰年平均的覆盖范围一直在稳步下降, 未来几十年夏季北极海冰完全消失的可能性大大增加<sup>[1]</sup>。这将形成北极水域西北航道、东北航道的常态化通航能力<sup>[2]</sup>。其中, 西北航道的开通会缩短中国与北美的贸易航程, 实现更经济的运营成本, 提高贸易频率, 降低能源消耗, 减少温室气体的排放。然而, 北极高密度海冰、高纬度的船舶航行环境以及难以预测的天气变化等风险因素, 船舶安全通航仍是北极水域利用的关键问题之一<sup>[3]</sup>。

鉴于船舶事故具有较大的经济损失、人员伤亡和社会影响等后果, 船舶通航风险一直是交通

运输工程研究者的关注焦点, 近年来在该领域的研究已取得了丰富成果。运用船舶领域模型<sup>[4]</sup>、AIS 数据<sup>[5]</sup>、船舶事故数据挖掘<sup>[6]</sup>等风险评估方法, 对船舶碰撞风险和指定水域的船舶通航风险进行评价; 基于马尔可夫模型<sup>[7]</sup>、贝叶斯网络<sup>[8]</sup>、系统动力学<sup>[9]</sup>等评估方法, 对船舶通航过程的动态风险进行评价。围绕北极航道的船舶通航风险评价, 也在理论技术与方法上取得了一定的成果。采用 IF-AHP 识别北极航道的危险因素<sup>[10]</sup>, 基于事故案例分析的北极航道建设决策建议<sup>[11]</sup>, 通过 Frank copula 模糊事件树分析法评估北极水域冰困事故的风险<sup>[12]</sup>, 利用贝叶斯网络建模的北极东北航线海上运输风险评估<sup>[13]</sup>, 运用马尔可夫-蒙特卡洛方法的云仿真模型, 分析夏季北极东北航道船舶航行的过程风险<sup>[14]</sup>。文献研究表明, 在北

[收稿日期] 2022 年 5 月收到来稿, 2022 年 7 月收到修改稿

[基金项目] 国家重点研发计划 (2021YFC 2801005)资助

[作者简介] 王发根, 男, 1990 年生。硕士研究生, 研究方向为水上交通安全。E-mail:202030110213@stu.shmtu.edu.cn

[通信作者] 胡甚平, E-mail:sphu@shmtu.edu.cn

极航道通航研究方向上, 偏向于东北航道的船舶通航动静态风险研究, 相对缺乏对西北航道的船舶通航安全研究。

西北航道具有岛屿水路特征, 海冰密集度高, 气候特征不确定程度较高, 且数据相对东北航道较少, 是世界上通航环境最复杂的海域之一。目前, 北极西北航道船舶通航风险的研究较少, 且仅局限于历史冰情分析<sup>[15]</sup>, 以及基于环境风险因素的通航风险评估<sup>[16]</sup>。因此, 北极西北航道仍处于初步探索阶段, 尚未常态化开通。诚然, 风险是多因素耦合涌现的结果, 考虑有限的风险因素不足以支持极地水域结构性的船舶通航安全风险评估。

综上所述, 为更加全面地评估北极西北航道通航过程的结构因素作用下的风险, 在辨识北极西北航道船舶通航窗口期的基础上, 引入系统动力学(System Dynamics, SD)的方法, 对北极西北航道船舶通航的风险机制分析, 建立多因素网络拓扑的SD数学模型, 结合场景条件, 实现对北极西北航道船舶通航过程风险的动态仿真, 研究不同时间下的船舶通航风险水平与可航窗口期。

## 1 北极西北航道船舶通航风险

### 1.1 北极西北航道

北极西北航道始于白令海峡, 经美国阿拉斯加和加拿大北极群岛, 最终进入大西洋。参考相关文献<sup>[15-16]</sup>以及由中华人民共和国海事局编著的《北极航行指南(西北航道)2015》(CNP2), 整理出由白令海峡出发的北极西北航道可能的6条航线(见图1)。

由于加拿大北极群岛是北极西北航道的主要组成部分, 北极西北航道是具有明显岛屿特征的航道。西北航道处于高纬度区域, 常年被冰雪覆盖, 只有在夏季有可能短暂通航, 是全球地形最复杂的海域之一。

北极西北航道各航线涉及的关键节点如下: 1)航线1中的关键节点为麦克卢尔海峡和梅尔维尔子爵海峡; 2)航线2中的关键节点为维多利亚海峡和皮尔海峡; 3)航线3中的关键节点为梅尔维尔子爵海峡和威尔士王子海峡; 4)航线4中的关键节点为维多利亚海峡和麦克林托克海峡; 5)航线5中的关键节点为维多利亚海峡、拜洛特海峡以及利金特王子湾; 6)航线6中的关键节点为维多利亚海峡、拜洛特海峡以及弗瑞赫克拉海峡。

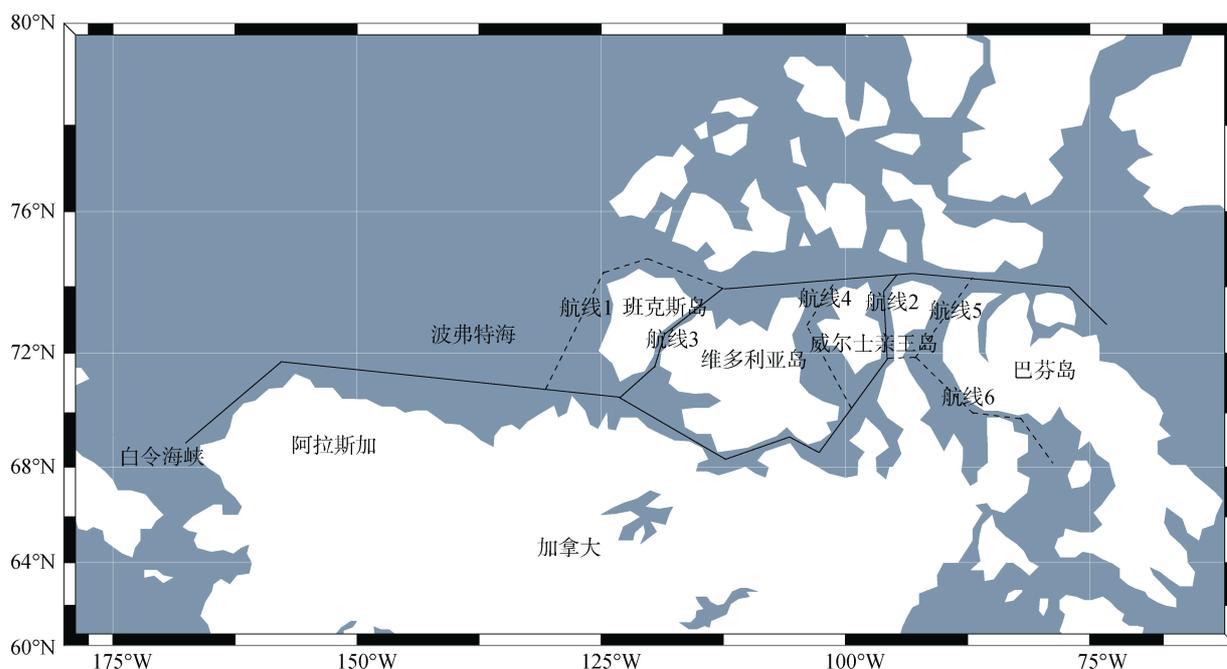


图1 北极西北航道概况

Fig.1. Overview of the Northwest Passage

## 1.2 北极西北航道船舶通航过程风险

通航风险是船舶航行过程中发生损失的可能性及后果性的组合,是外在环境与内在因素之间耦合演化的表现。因此,风险的表现形式会随着时间的变化呈现出动态演化的过程。其数学关系满足公式(1):

$$R_t = f_t(e_1, e_2, e_3, \dots, e_n) \quad (1)$$

式中:  $R_t$  表示  $t$  时刻下的风险值;  $f_t$  表示风险因

子  $t$  时刻下的函数关系;  $e_n$  表示  $t$  时刻下风险因子的表现。

北极西北航道船舶通航的过程风险是与时间相关的风险因素在时间轴上所发生的特征演化,其风险表现在时空中呈现连续性和一致性。鉴于海冰密集度对船舶航行风险的影响,通过参考已有文献<sup>[12]</sup>,借鉴国际气象组织(WMO)对海冰密集度的定义,结合专家意见,设定了风险的划分标准(表 1)。

表 1 北极西北航道通航风险评价标准

Table 1. Navigation risk assessment criteria for the Northwest Passage

风险程度	高风险	较高风险	一般风险	低风险
对应通航性	无法通航	通航性困难(需要破冰船护航)	通航性一般(可能需要破冰船护航)	通航性好
赋值	>0.3	0.2~0.3	0.1~0.2	<0.1

在船舶通航风险  $R$  的评价中,一般用因素权重构建因素间的数学关系。其数学关系满足下式:

$$R = \sum_i W_{ai} A_i + \sum_j W_{pj} P_j, \sum_i W_{ai} = 1, \sum_j W_{pj} = 1 \quad (2)$$

式中:  $A$  表示流入  $R$  的中间节点;  $P$  表示流入  $R$  的基础节点;  $i$  为流入  $R$  中间节点  $A$  的个数;  $j$  为流入  $R$  基础节点  $P$  的个数;  $W_a$ 、 $W_p$  分别对应  $A$ 、 $P$  的权重系数。

$$A_M = \sum_j \gamma_j P_j \quad (3)$$

式中:  $A_M$  表示第  $M$  个中间节点;  $j$  为与  $A_M$  存在因果关系的基础节点  $P$  的个数;  $\gamma_j$  为  $A$  与  $P$  存在的关联系数。

## 1.3 北极西北航道的船舶通航风险机制

为了评估北极西北航道的船舶通航风险,首先需要定义可以表征系统的风险因素。通过对相关文献<sup>[12]</sup>的研究,结合极地航行安全领域专家的意见,从环境风险、人员风险、船舶风险以及管理风险分析了北极西北航道船舶通航风险机制的形成。

1. 冰、雾、浪、风等自然环境因素的变化都可能增加船舶通航风险,导致船舶事故的发生;航道宽度、碍航物、航道弯曲度、交通密度等决定着航道是否适航。

2. 人员安全意识水平、人员身心素质、人员业务水平、人员从业时间、人员疲劳水平、周围态势感知水平等决定着船舶驾驶人员能否胜任船舶的安全航行。

3. 船速、船舶设备故障、船舶尺寸以及船舶冰级等表征船舶本身特征是否可能增加船舶的通航风险水平。

4. 北极航行安全教育培训、北极航行规则制度、北极西北航道周边应急等关系着北极西北航道船舶通航风险的管控问题,影响北极西北航道的通航风险水平。

不同类型风险因素之间与不同属性风险因素间产生或直接或间接的耦合联系,因此,有必要对风险因素间的关联成因进行分析。

北极海域的夏季由于受暖气流的影响,在其冰冷的海面上容易生成平流雾,导致能见度变差。能见度的降低会影响船舶驾驶员对周围事物发展态势的感知,从而增加人员风险。因此,雾会对人员风险产生影响。

海冰的出现会增加船舶机械故障发生的可能性,如主机、螺旋桨等,导致船舶风险的增加。与此同时,海冰会使实际可用航道宽度变得狭窄,增加航道环境风险,导致叠加的环境风险。因此,海冰对船舶风险和航道风险产生了影响。

北极航行安全培训是为了提高船舶驾驶人员的业务水平、安全意识以及情景应变能力。当北极航行安全培训作为管理风险中的一个风险因素时,会对人员风险产生影响。

根据上述描述,从人员、环境、船舶和管理 4 个方面对所涉及的因素进行分析,形成完整的北极西北航道通航风险评估网络图(图 2),其中“+”表示流进。

## 2 北极西北航道船舶通航过程风险评估模型

### 2.1 北极西北航道环境条件数据

北极西北航道相关海域冰情与气象信息对于船舶通航风险的影响较大, 且这些参数在实际情况下存在不确定性, 随着时间的变化而不断变化, 这里对雾  $N_1$ 、浪  $N_2$ 、风  $N_3$  和海冰  $N_4$  进行函数假

设, 各变量方程如下:

$$Y_i = a_0 + a_1 \cos(\omega x) + b_1 \sin(\omega x) + a_2 \cos(2\omega x) + b_2 \sin(2\omega x) \quad (4)$$

$$Z_i = a_1 \exp\{-(x - b_1)/c_1\}^2 + a_2 \exp\{-(x - b_2)/c_2\}^2 \quad (5)$$

式(4)和(5)中:  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  为常系数,  $x$  为时间变量。

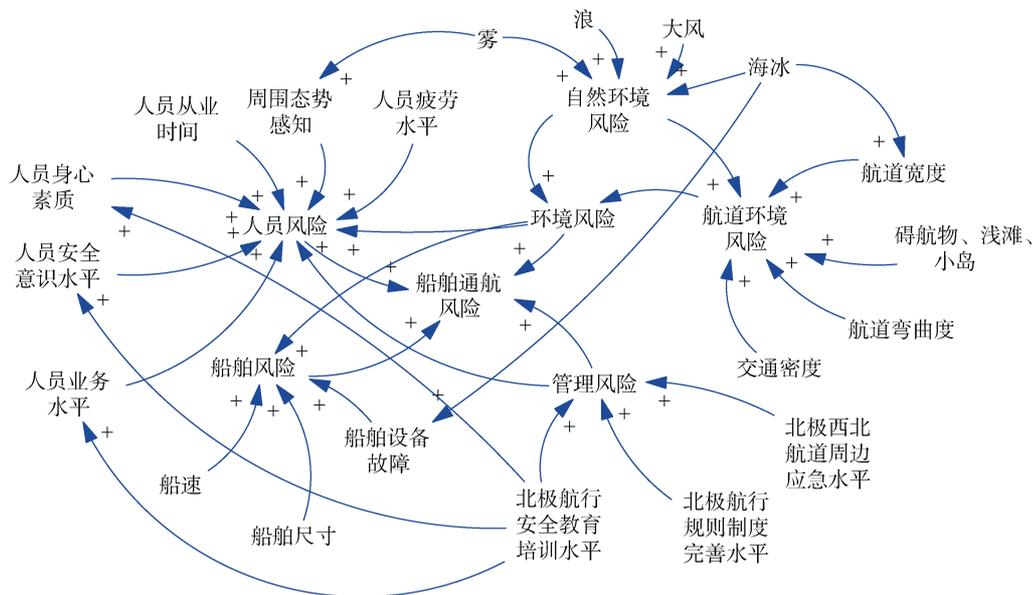


图 2 北极西北航道通航风险因素网络图

Fig.2. Network map of risk factors for navigation of the Northwest Passage

通过访问提供北极西北航道相关海域冰情与气象信息的机构网站, 获取北极西北航道 2015—2021 年的海冰、风、雾、浪的气象信息, 分析海冰与航道宽度的函数关系, 确定变量参数。

1. 通过对 2015—2021 年北极西北航道相关海域的冰情的收集, 选择 40% 的海冰密集度作为海冰覆盖率统计的阈值<sup>[15]</sup>, 统计了北极西北航道 6 条航线所经区域的海冰月平均覆盖率, 即月平均不小于 40% 海冰密集度的覆盖率, 见图 3a。该曲线可以使用公式(4)进行数据拟合, 从而获得样本函数。

2. 通过对北极西北航道所经海域的 2015—2021 年历史气象资料的分析, 对 6 级及 6 级以上的风、5 级及 5 级以上的浪和雾天发生情况进行统计梳理, 发现各航线水域的上述气象因素月平

均发生率差别不明显, 因此, 在各航线的通航过程风险的仿真中采用相同的参数, 见图 3b、3c、3d。涉及风和浪的数据曲线可以使用公式(4)进行数据拟合, 从而获得样本函数。而对于雾的数据曲线可以使用公式(5)进行数据拟合, 从而获得样本函数。

3. 考虑到北极西北航道具有的岛屿特征, 海冰的出现对航道的可航宽度产生较大的影响。通过选取北极西北航道中较窄的航道作为采样点, 结合具体的气象数据及海图信息, 统计分析海冰的密集度与可用航道宽度的关系, 北极西北航道各航线航道宽度的变化用  $\gamma_{cn}/(1 - N_4)$  来表示。其中,  $\gamma_{cn}$  表示海冰对航道宽度的影响系数,  $N_4$  表示海冰的变化。

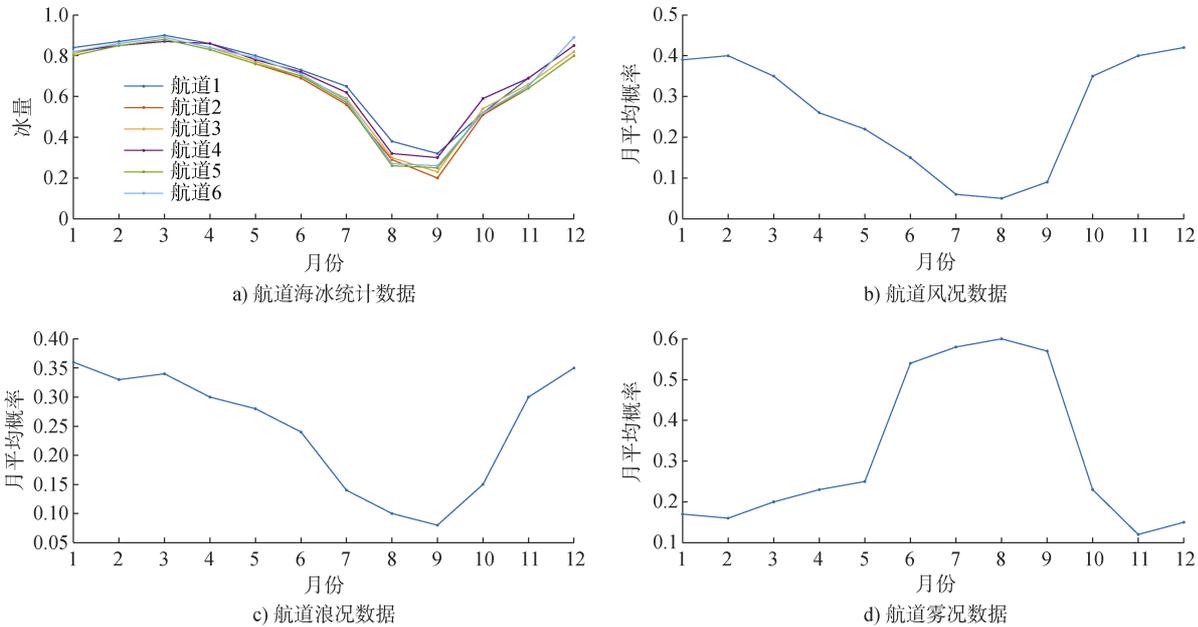


图 3 不同航道上的海冰、风、浪和雾的月平均变化图

Fig.3. Average monthly variation of sea ice, wind, wave and fog on different routes

### 2.2 北极西北航道通航过程风险的系统动力学模型

系统动力学是由美国麻省理工学院 Forrester 教授于 1956 年提出的一种动态的系统方法。它以系统论为基础, 通过对系统结构的深度剖析, 呈现事物内部的结构特征, 融合了控制论与信息论, 实现对系统基于时空维度的变化模拟, 解决复杂动态的系统问题。例如, 用 SD 解决可持续供水问题, 城市供水系统是一个复杂的综合系统, 通过构建 SD 模型, 对供水系统的可持续性问题进行评价<sup>[17]</sup>。

系统动力学模型是依据模型中信息流的反馈作用实现系统功能。模型中变量包含状态变量  $VarS$ 、速率变量  $VarR$ 、辅助变量  $VarA$  以及常量  $VarP$ 。状态变量  $VarS$  是系统整体或部分的末节点,

表示一定时间内信息流的存量。速率变量  $VarR$  是系统结构中的信息流节点, 表示  $t$  时刻下流经的信息流, 可以清晰地反映节点状态随时间的变化趋势。辅助变量  $VarA$  是系统结构中的信息节点, 体现系统结构中变量与变量间、变量与外部间具有因果关系的节点。常量  $VarP$  是系统模型的基础节点, 是系统的基础结构的重要组成。

通过对北极西北航道船舶通航风险的分析, 结合对系统动力学的描述, 为了更加直观地反映北极西北航道船舶通航过程风险的变化, 模型中的主要风险节点采用速率变量的表达形式。鉴于选取 40% 的海冰密集度作为海冰覆盖率统计的阈值, 对应冰级 PC7 的船舶<sup>[15]</sup>。因此, 在建模过程中不考虑船舶冰级的影响。模型中各变量性质见表 2。

表 2 北极西北航道船舶通航风险变量集

Table 2. Risk variable set of ship navigation in the Northwest Passage of the Arctic

变量类型	变量名称
速率变量 $VarR$	北极西北航道船舶通航风险水平 $L$ , 人员风险水平 $H$ , 环境风险水平 $E$ , 管理风险水平 $M$ , 船舶风险水平 $V$ , 自然环境风险 $N$ , 航道环境风险 $C$
辅助变量 $VarA$	人员业务水平 $H_1$ , 人员身心素质 $H_2$ , 人员安全意识水平 $H_3$ , 周围态势感知水平 $H_6$ , 雾 $N_1$ , 浪 $N_2$ , 风 $N_3$ , 海冰 $N_4$ , 航道宽度 $C_4$ , 船舶设备故障 $V_1$
常量 $VarP$	人员从业时间 $H_4$ , 人员疲劳水平 $H_5$ , 交通密度 $C_1$ , 航道弯曲度 $C_2$ , 碍航物、浅滩、小岛 $C_3$ , 船速 $V_2$ , 船舶尺寸 $V_3$ , 北极航行安全教育水平 $M_1$ , 北极航行规则制度完善水平 $M_2$ , 北极西北航道周边应急水平 $M_3$

为实现模型的动态变化特征, 表征北极西北航道船舶通航的过程风险, 设定模型中随时间变化的量来反映系统行为, 分别是雾、浪、风以及海冰。基于对北极西北航道船舶通航过程风险机制的分析, 结合上述变量性质的确定, 建立北极西北航道船舶通航过程风险的系统动力学模型, 见图 4。

### 2.3 北极西北航道通航变量之间的相互关系

基于上文对模型及模型变量关系的描述, 确

定模型中变量的系统动力学方程式。鉴于上述环境因素与北极西北航道的通航风险存在着强烈的连续线性关系, 因此将上述自然风险因素随时间变化的客观数据作为与时间相关变量的输入参数。模型中变量关系之间的数学表达可以有多种形式, 结合公式(2)、(3)以及表 2 中定义的变量, 主要的数学方程如下:

$$L = w_1 \times H + w_2 \times E + w_3 \times V + w_4 \times M, \sum_i w_i = 1 \tag{6}$$

$$\begin{cases} H = w_{h1} \times H_1 + w_{h2} \times H_2 + w_{h3} \times H_3 + w_{h4} \times H_4 + w_{h5} \times H_5 + w_{h6} \times H_6, \sum_{i=1}^6 w_{hi} = 1 \\ V = w_{v1} \times V_1 + w_{v2} \times V_2 + w_{v3} \times V_3, \sum_{i=1}^3 w_{vi} = 1 \\ M = w_{m1} \times M_1 + w_{m2} \times M_2 + w_{m3} \times M_3, \sum_{i=1}^3 w_{mi} = 1 \\ E = w_5 \times N + w_6 \times C, \sum_{i=5}^6 w_i = 1 \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} N = w_{n1} \times N_1 + w_{n2} \times N_2 + w_{n3} \times N_3 + w_{n4} \times N_4, \sum_{i=1}^4 w_{ni} = 1 \\ C = w_{c1} \times C_1 + w_{c2} \times C_2 + w_{c3} \times C_3 + w_{c4} \times C_4, \sum_{i=1}^4 w_{ci} = 1 \end{cases}$$

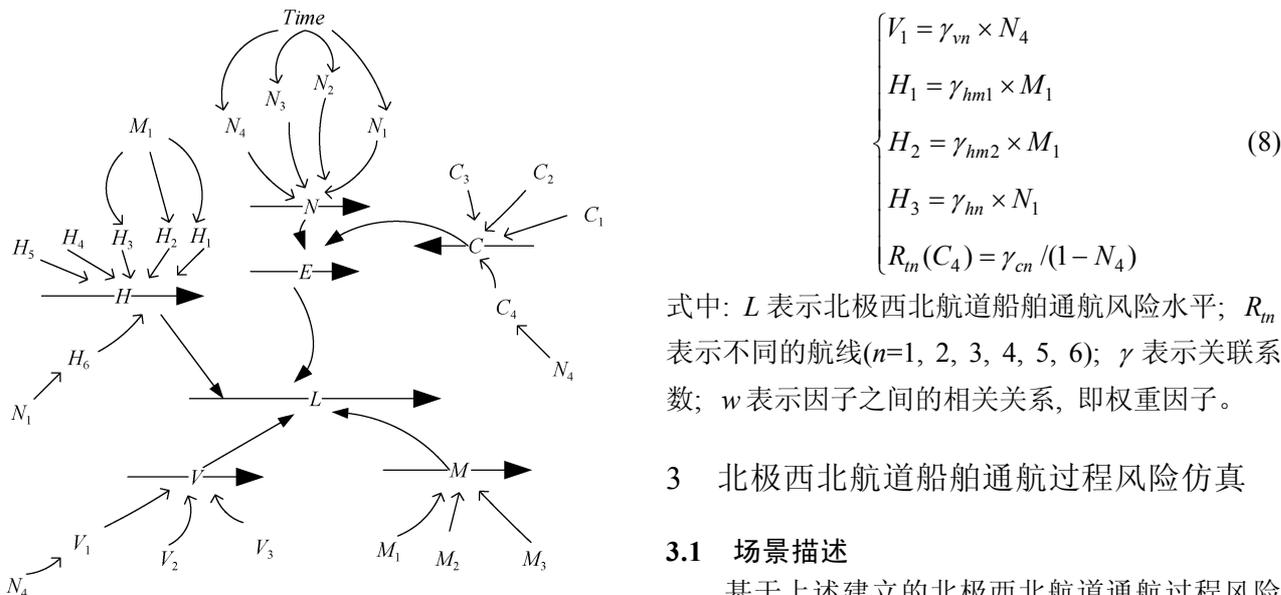


图 4 北极西北航道船舶通航过程风险的系统动力学模型  
Fig.4. A dynamic model of the risk system of ship navigation in the Northwest Passage of the Arctic

式中:  $L$  表示北极西北航道船舶通航风险水平;  $R_{tn}$  表示不同的航线( $n=1, 2, 3, 4, 5, 6$ );  $\gamma$  表示关联系数;  $w$  表示因子之间的相关关系, 即权重因子。

## 3 北极西北航道船舶通航过程风险仿真

### 3.1 场景描述

基于上述建立的北极西北航道通航过程风险的系统动力学模型, 对 6 条航线的船舶通航过程风险进行仿真。通过船舶通航风险的动态评估, 确定全年中一段时间内的最低通航风险水平, 辨

识北极西北航道的通航窗口期。

北极西北航道全程约为 800 海里, 采用不同航线的航程, 会有所差别。这里以 2013 年首艘穿越北极东北航道的中国商船“永盛”轮(冰级 PC7) 作为研究对象, 设置模型初始时间为 1 月, 结束时间为 12 月, 步长设为 0.5 m。

### 3.2 信息收集及变量参数确定

通过分析海冰、风、浪、雾的变化对船舶通航风险的影响程度, 结合已有文献<sup>[18]</sup>以及相关极地领域的专家讨论, 制定北极西北航道通航风险的评价标准, 确定风险因子的影响程度和模型中的相关参数。

SD 模型中因素间的关联系数和模型运行的初始变量设置涉及以下几个方面。

1. 海冰对船舶设备故障的影响系数  $\gamma_{vm}$ 。基于采用文献<sup>[19]</sup>对北极事故数据的统计, 船舶机损占北极事故总数的 46.2%, 因此, 海冰对船舶设备故障的影响系数  $\gamma_{vm}$  取值 0.46。

2. 雾的发生对人员的周围态势感知的影响系数  $\gamma_{hm}$ 。根据《国际避碰规则》中对正规瞭望的定义, 明确了目视瞭望是正规瞭望最基本的手段, 因此, 这里采用二八原则, 目视瞭望在整个瞭望中起主要作用, 取值占比 80%, 其他手段占 20%。因此, 雾天对人员的周围态势感知的影响系数  $\gamma_{hm}$  取值 0.8。

3. 海冰对航道宽度的影响系数  $\gamma_{cn}$ 。船舶在北极航行中, 船舶的实际可用航道宽度与海冰覆盖率

高度相关。对 CNP2、相关海图、冰情进行综合分析以及与极地方面的专家探讨后, 确定海冰对各航线  $R_m(m=1, 2, 3, 4, 5, 6)$  可航宽度的影响系数  $\gamma_{cn}$  分别取 0.092、0.09、0.08、0.085、0.095 和 0.1。

4. 基于上述的风险评价标准, 通过专家打分赋值法, 获取常量  $VarP$  的赋值, 见图 5a。

5. 鉴于北极西北航道的 6 条航线对应不同的航道环境条件, 通过模拟画出各航线的具体走向, 统计各航线的转向点, 以及航道所经区域出现的各种碍航物的数量, 采用模糊数学及归一化处理的方法, 从而获取针对不同航线  $R_m$  相应的  $C_2$ 、 $C_3$  的赋值, 见图 5b。

6. 权重的获取。各风险因素的风险因子之间的相互关系, 通过熵权法结合算术平均法的主客观综合权重法获取, 见图 6。

### 3.3 北极西北航道船舶通航窗口期分析

运用系统动力学模型, 对北极西北航道船舶通航过程风险进行仿真, 分别输入航线 1~6 的变量参数, 运行模型, 运行结果见图 7。从仿真结果得出如下结论。

1. 全年的北极西北航道船舶通航过程的风险, 在 1—7 月时通航风险水平变化小, 进入 7 月以后通航风险水平下降变快, 在 8 月、9 月最低。进入 9 月后, 由于气温下降, 北极冬季的来临, 通航风险水平呈现迅速上升的趋势, 符合北极航道通航风险的一般规律。

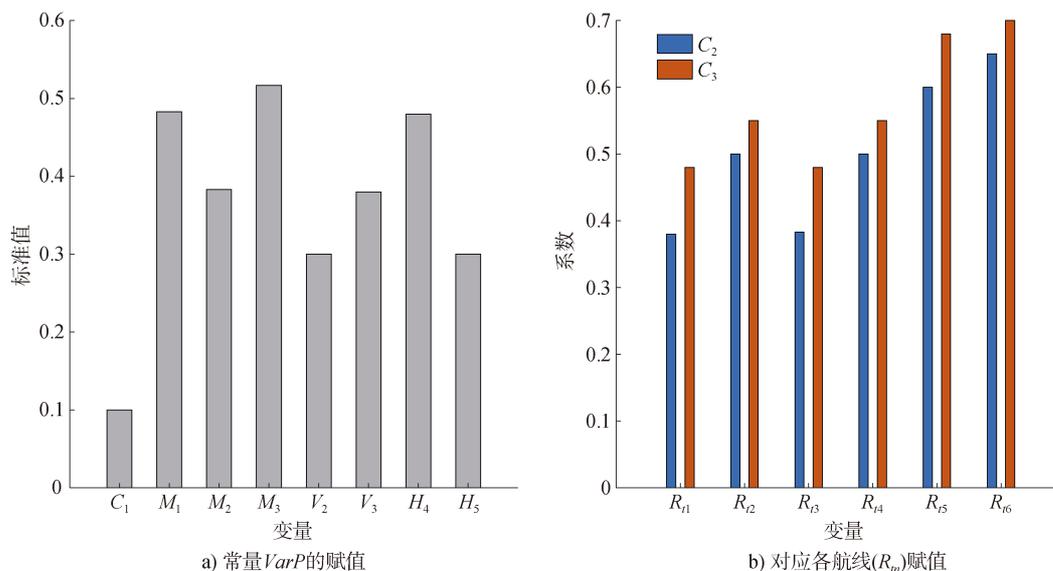


图 5 常量的赋值(初始数值)

Fig.5. The assignment of constant (initial value)

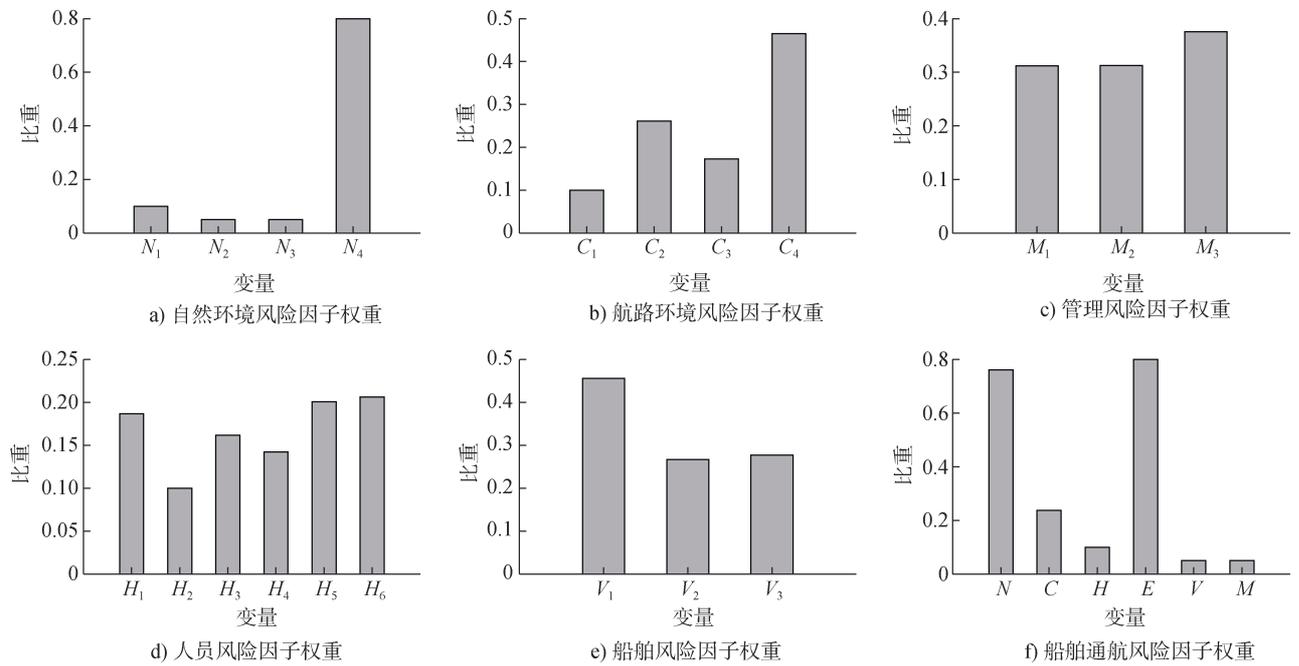


图 6 各风险因子的权重

Fig.6. The weight of each risk factor

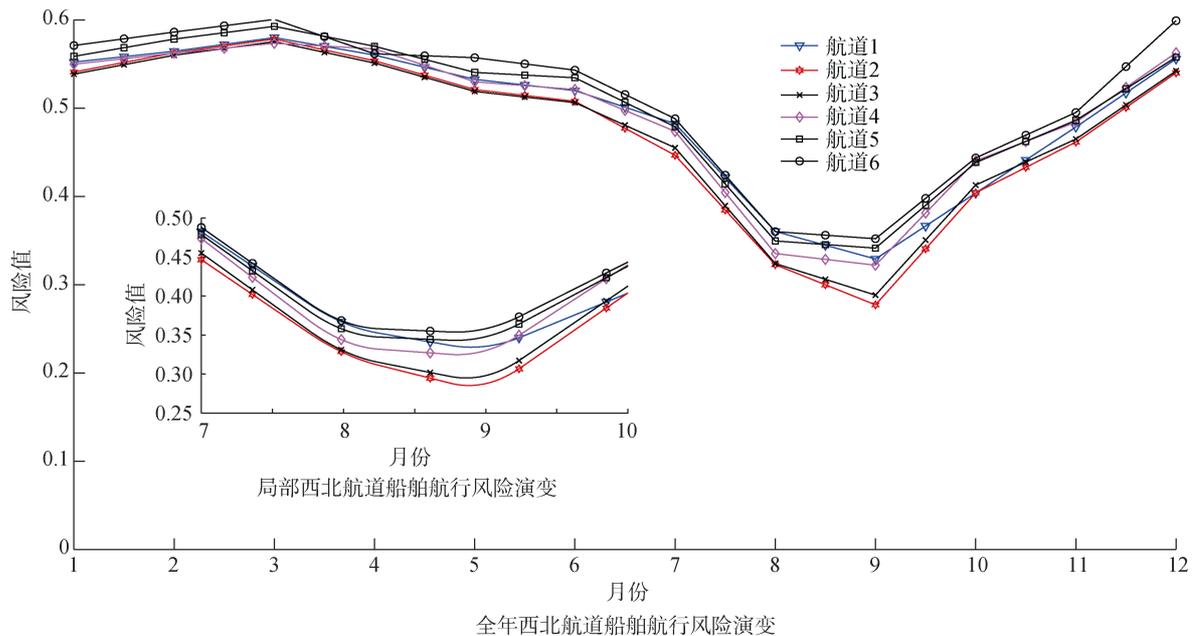


图 7 北极西北航道船舶通航过程风险

Fig.7. Risks in the navigation process of ships in the Northwest Passage of the Arctic

2. 基于海冰冰情分析, 阈值 40% 的海冰密集度适用于冰级 PC7 的船舶通过, 从北极西北航道船舶通航过程风险结合风险评价标准来看, 北极西北航道对于冰级 PC7 的船舶全年可通航的时间窗口为 8 月下旬至 9 月上旬, 平均不足一个月的

时间。考虑北极西北航道的现状, 较短暂的船舶通航窗口期是影响北极西北航道船舶通航可行性的关键因素之一。

3. 通过对比 6 条航线的船舶通航过程风险, 发现在北极西北航道 6 条航线中, 目前仅航线 2 与

航线 3 存在通航窗口, 结合通航性评价标准的定义, 其通航级别为困难, 即船舶利用这一窗口过境北极西北航道需要破冰船的护航。由于北极西北航道缺乏后勤保障设施, 如航行支持设施、应急设施等对支持商船过境的基础建设, 因此, 这是影响北极西北航道商业开通的另一个关键因素。

4. 在北极西北航道 6 条可能的航线中, 选择航线 2(阿蒙森湾-维多利亚海峡-皮尔海峡-巴芬湾)和航线 3(阿蒙森湾-威尔士亲王海峡-巴罗海峡-巴芬湾)两条航线的船舶通航风险相对较低。在通航窗口期内, 航线 2 的船舶通航风险要小于航线 3。这是由于航线 3 所经区域北路偏多, 而航线 2 南路偏多, 由于南路冰情要好于北路, 因此, 目前航线 2 在通航窗口期内的船舶通航风险相对较小。但是, 南路所经峡湾众多, 航道相对于北路较复杂, 在未来的通航过程中, 会涉及到船舶会遇, 船舶操纵, 船舶应急等一系列非特定情景, 对于航线 2 和航线 3 的优劣还需要作进一步的研究。

5. 总体来看, 北极西北航道整体的船舶通航风险水平处于较高水平, 符合目前北极西北航道处于初步探索阶段的定位, 尚不具备商船的安全通航条件。

## 4 结束语

本文针对北极西北航道船舶通航问题, 提出 6 种不同航线的场景假设, 通过航线上环境特征和船舶航行需求的过程风险分析, 得出北极不同航线下的船舶通航风险特征, 进而辨识北极西北航道通航窗口期。就目前条件而言, 北极西北航道全年可通航的时间窗口为 8 月下旬至 9 月上旬, 选择阿蒙森湾-威尔士亲王海峡-巴罗海峡-巴芬湾和阿蒙森湾-维多利亚海峡-皮尔海峡-巴芬湾两条航线的船舶通航风险相对较低。

引入系统动力学理论, 结合北极航道各航线海冰、雾、风和浪的时空信息, 通过函数拟合、风险因子之间的相互关系分析, 建立基于多因素网络拓扑的船舶通航风险动力学分析模型, 对北极西北航道船舶通航过程风险进行仿真。仿真结果表明, 基于系统动力学模型的船舶通航风险分析是有效的。环境条件对于船舶通航风险的影响是较为明显的。

鉴于北极西北航道船舶通航风险是一个复杂的复杂系统, 具有不确定性和信息不完整性的特征。因此, 还需要进一步研究北极航道船舶通航高风险的形成机制, 为未来北极西北航道的常态化运营奠定基础。

## 参考文献

- 1 SCREEN J A, DESER C. Pacific Ocean variability influences the time of emergence of a seasonally ice-free Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(4): 2222-2231.
- 2 KHON V C, MOKHOV I I, LATIF M, et al. Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the twenty-first century[J]. *Climatic Change*, 2010, 100(3): 757-768.
- 3 KHAN B, KHAN F, VEITCH B, et al. An operational risk analysis tool to analyze marine transportation in Arctic waters[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2018, 169: 485-502.
- 4 ZHANG L Y, MENG Q. Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106130.
- 5 NIEH C Y, LEE M C, HUANG J C, et al. Risk assessment and traffic behaviour evaluation of inbound ships in Keelung harbour based on AIS data[J]. *Journal of Marine Science and Technology-Taiwan*, 2019, 27(4): 311-325.
- 6 WANG Z C, YIN J B. Risk assessment of inland waterborne transportation using data mining[J]. *Maritime Policy & Management*, 2020, 47(5): 633-648.
- 7 JON M H, KIM Y P, CHOE U. Determination of a safety criterion via risk assessment of marine accidents based on a Markov model with five states and MCMC simulation and on three risk factors[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 236: 109000.
- 8 YU Q, TEIXEIRA Â P, LIU K Z, et al. An integrated dynamic ship risk model based on Bayesian Networks and Evidential Reasoning[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 216: 107993.
- 9 曹久华, 席永涛, 胡甚平, 等. 基于系统动力学的港口船舶通航风险成因耦合模型[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(3): 65-71.
- 10 SAHIN B, KUM S. Risk assessment of Arctic navigation by using improved Fuzzy-AHP approach[J]. *Transactions of the Royal Institutions of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering*, 2015, 157(4): 241-250.

- 11 BENZ L, MÜNCH C, HARTMANN E. Development of a search and rescue framework for maritime freight shipping in the Arctic[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2021, 152: 54-69.
- 12 FU S S, ZHANG D, MONTEWKA J, et al. A quantitative approach for risk assessment of a ship stuck in ice in Arctic waters[J]. *Safety Science*, 2018, 107: 145-154.
- 13 LI Z, HU S P, GAO G P, et al. Decision-making on process risk of Arctic route for LNG carrier via dynamic Bayesian network modeling[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 71: 104473.
- 14 胡甚平, 轩少永, 刘宇, 等. 北极冰区船舶安全航行过程风险动态仿真[J]. *极地研究*, 2019, 31(1): 84-93.
- 15 LIU X H, MA L, WANG J Y, et al. Navigable windows of the Northwest Passage[J]. *Polar Science*, 2017, 13: 91-99.
- 16 余梦珺, 张韧, 葛珊珊, 等. 北极西北航道自然环境危险性评估及航线优选[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(4): 614-628.
- 17 CHUNG G, KIM J H, KIM T W. System dynamics modeling approach to water supply system[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2008, 12(4): 275-280.
- 18 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.
- 19 付姗姗, 刘燕平, 席永涛, 等. 北极水域船舶事故特征及关联规则分析[J]. *极地研究*, 2020, 32(1): 102-111.

## Analysis on the navigable window period of ships in the Northwest Passage of the Arctic

Wang Fagen<sup>1</sup>, Hu Shenping<sup>1</sup>, Jiao Xixin<sup>2</sup>, Fu Shanshan<sup>3</sup>, Xi Yongtao<sup>1</sup>, Han Bing<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

<sup>2</sup>College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

<sup>3</sup>College of Transportation and Communication, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

<sup>4</sup>Shanghai Ship and Shipping Research Institute, Shanghai 200135, China)

### Abstract

Melting of Arctic sea ice makes navigation of the Arctic Northwest Route (ANR) possible, and it is necessary to determine the navigable window of the ANR. Focusing on the ice conditions and the complex navigation environment of the ANR, a navigation risk assessment model was constructed based on system dynamics, and the process risk assessment method in the temporal dimension was proposed for determining the navigable window for shipping on the ANR. Six routes were established as simulation scenarios, and in combination with objective data of monthly average changes in wind, fog, waves, and sea ice during 2015–2021, the navigability risk for shipping on the ANR was simulated. Results showed that the navigable window of the ANR is from late August to early September; and that the optimal route is via Amundsen Bay–Prince of Wales Strait–Barrow Strait–Baffin Bay and Amundsen Bay–Victoria Strait–Peel Strait–Baffin Bay. The navigability risk for shipping on the two routes is relatively low. Overall, the ANR generally has a relatively high level of navigability.

**Keywords** Arctic, Northwest Passage, risk assessment, ship navigation, navigable window period, system dynamics