

气候变化背景下北极航线综合评估模型研究

汪杨骏¹,张韧^{1,2},王哲¹,朱颖倩³

(1. 国防科技大学气象海洋学院 南京 211101; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044;
3. 南京师范大学文学院 南京 210023)

摘要:在全球持续变暖的影响下,北极部分地区夏季出现无冰期,北极航线具有更短的航运距离和相对稳定的地缘政治人文环境。文章从气候变化角度出发,构建包含航行环境模块、航迹规划模块和航线经济效益模块在内的综合评估模型,评估北极地区海冰、风、浪、流等气象水文地理要素对船舶航速的影响,确定北极地区的可航行天数;在此基础上,利用 A-Star 算法寻找北极航线的最优路径,并分析该路径上的航运经济效益;采用该评估模型对比在 RCP4.5 情景下 2050 年船舶往返欧亚大陆之间经东北航线与经苏伊士运河航线的经济效益,结果表明,苏伊士运河航线的经济效益更高,北极航线可作为替补航线。

关键词:北极航线;气候变化;航行速度;航线规划;经济效益

中图分类号:P731;U697

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2017)12-0118-07

Integrated Assessment Model of Arctic Routes with Climate Change

WANG Yangjun¹, ZHANG Ren^{1,2}, WANG Zhe¹, ZHU Yingqian³

(1. Institute of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. College of Liberal Arts, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the impact of global warming, parts of the Arctic region become ice free in summer. Comparing to the traditional sailing routes, the Arctic routes have shorter distance, more relatively stable geopolitical environment, which have stimulated people to explore the Arctic routes enthusiastically. This paper, from the perspective of climate change, built an integrated assessment model which contains navigation environment module, route planning module and economic profits module to assess the impact of meteorological and hydrological features such as the Arctic sea ice, wind, wave, flow and depth etc. on the sailing speed, to count the number of days that ships can navigate at the north pole. In the model, an A-Star algorithm was used to

收稿日期:2017-08-10;修订日期:2017-11-17

基金项目:“全球变化与海气相互作用”国家专项。

作者简介:汪杨骏,博士研究生,研究方向为海洋环境风险评估

通信作者:张韧,教授,博士生导师,博士,研究方向为海洋环境影响评估与决策

find the optimal path of Arctic routes and the economic profits of sailing on the Arctic routes had been calculated. The proposed model and algorithm was used to simulate an existing scenario (RCP4.5). The results showed that in the year of 2050, the economic benefits of the route through the Suez Canal will be higher, and the Arctic route can be used as a substitute route.

Key words: Arctic routes, Climate change, Navigation speed, Optimal routes, Economic profits

1 引言

海洋贸易是世界贸易中最主要的组成部分,近年来随着贸易运输需求的进一步增大,传统航线变得拥堵,加之自然灾害、地缘政治冲突、海盗袭击等的影响,人们开始寻找新的航运通道。20 世纪 80 年代初,Young 等^[1]就提出了“北极的生命周期”概念,强调了北极地区的战略重要性。21 世纪以来,在全球气候持续变暖的影响下,北极部分地区出现无冰,更短的航运距离和相对稳定的地缘政治人文环境,激发起人们探索开发北极航线的热情。IPCC 第五次评估报告指出,在极端情景下,到 21 世纪中叶北极夏季海域海冰将完全融化,到 21 世纪 70 年代末冬季海冰也将完全融化,北极实现通航不再是梦想。

北极航线,通常指穿过北冰洋,连接太平洋和大西洋的海上通道^[2]。主要分为 3 条航线:东北航线、西北航线以及中央航线。其中,东北航线从北欧出发,途经北冰洋的巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海,穿过新西伯利亚海和楚科奇海,抵达白令海峡;西北航线从白令海峡出发,沿阿拉斯加北岸,加拿大北极群岛,抵达戴维斯海峡;中央航线从白令海峡出发,直接穿越北冰洋中心区域抵达格陵兰海和挪威海(图 1)。

当前,国内外众多学者针对北极航线进行了研究,研究成果主要有 2 类:①从宏观角度综合研究北极航线问题。Trausti 等^[3]针对北极海冰融化的情景,分析了世界航运业格局的变化;戴晋^[4]对东北航道的发展前景进行了预测,分析了东北航道开通后我国航运业的机遇与挑战;Hong 等^[5]分析了北极航道开通对中国海运的影响及相关对策;解国强^[6]阐述了东北航线关键海区水文气象地理要素分布情况,并分析了影响船舶在该水域安全航行的潜在风险,在此基础上提出若干安全航行的建议。②从



图 1 北极航道

经济成本、海冰条件等要素出发,研究其对北极航道的影响。Stroeve 等^[7]基于 CMIP5、CMIP3 及观测数据,分析了北极地区海冰的年代际变化趋势及季节性变化规律,为研究北极通航提供了丰富的海洋数据;挪威船级社^[8]基于北极当前气候条件,对未来北极地区船舶活动量及二氧化碳的排放量进行了预测;Somanathan 等^[9]分析了不同情景下船只通过西北航道和巴拿马运河时的运费率和航行成本;Liu 等^[10]比较了干散货运输在东北航道和苏伊士运河的经济效益;Way 等^[11]采用概率方法对不同航速下通过北极航道与苏伊士运河的经济成本进行了模拟,分析得到最优的航行速度。

综上所述,对于北极航线自然环境(气象水文地理条件)的评估主要以描述为主,侧重于揭示北极航线上自然环境的现状与未来变化趋势。而对船舶在北极航线上的经济效益的分析中,自然环境常常只是假定的情景,少有文献进一步考虑自然环境变化对船舶经济效益的直接影响。

本研究从气候变化角度出发,构建包含航行环境模块、航迹规划模块、经济效益模块在内的综合评估模型,用以评估海冰、风、浪、流等气象水文地理要素对船舶航速的影响,判断北极可航行的天数;并在此基础上利用 A-Star 算法,寻找北极航行的最优路径;最后对该条最优路径上的航运经济效益进行分析。

2 模型构建

本评估模型主要分为 3 个模块:航行环境模块、航迹规划模块、航线经济效益模块(图 2)。在航行环境模块中,海冰情况、气象水文等要素被输入模型中,作为背景场分析其对不同类型船只航速的影响,同时输出北极航线可航行的天数。在航迹规划模块中,根据背景场修正的不同区域船只标准航速结合局地地理信息进行航迹规划,优选出航行时间最短的最优航线。最后,综合北极可航行天数以及最优航线,对北极航线的经济效益进行分析。

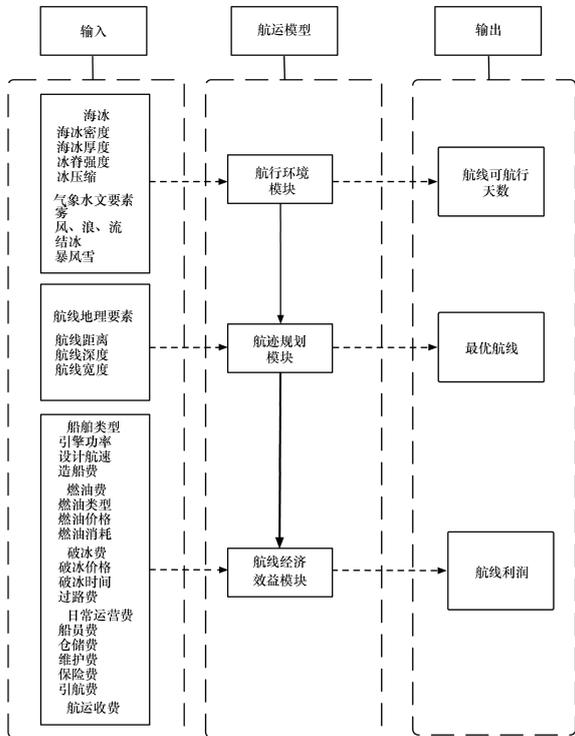


图 2 北极航线综合评估模型

2.1 航行环境模块

采用加拿大交通部 1998 年提出的北极冰况运输系统(AIRSS),用以评估不同类型的船舶(表 1)

在北极地区不同海冰状况下(表 2)的航行情况。

表 1 船舶类型

船舶类型	描述
CAC 1	可在北极任意多年冰条件中航行的破冰船
CAC 2	商业货物运输船,可在北极任意海冰条件下航行;航行路线选择最短路线
CAC 3	商业货物运输船,可在北极任意海冰条件下航行;但会尽量避开多年冰地区
CAC 4	商业货物运输船,可在任意一年冰条件中航行,在多年冰地区航行非常缓慢
Type A	可在 thick first year ice 条件下航行
Type B	可在 medium first year ice 条件下航行
Type C	可在 thin first year ice 条件下航行
Type D	可在 grey-white ice 条件下航行
Type E	可在 grey ice 条件下航行

表 2 海冰类型

海冰类型	特征
new ice	刚形成的新冰,包含冰凌、油脂状冰、碎冰团等;这些类型的冰只是松散地冻结在一起,只有在漂浮过程中能看到
grey ice	年轻的冰,厚度在 10~15 cm;比尼罗冰弹性低,膨胀易碎
grey-white ice	年轻的冰,厚度在 15~30 cm
thin first year ice	1 年冰,成形时间不超过 1 个冬天;厚度在 30~70 cm
medium first year ice	1 年冰,厚度在 70~120 cm
thick first year ice	1 年冰,厚度在 120~200 cm
second year ice	成年冰,至少经历了 1 个夏天的融化;厚度在 200~300 cm
multiyear ice	多年冰,至少经历了 2 个夏天的融化;厚度在 300 cm 以上

在这套系统中,综合考虑了能见度、航行速度、破冰船的能动性、工作人员的熟练度等,并采用 IN 指数反映特定船只在特定冰况下当日可航行情况:

$$IN = (C_a IM_a) + (C_b IM_b) + \dots + (C_n IM_n) \quad (1)$$

式中: C_a 代表 a 类海冰密度; IM_n 代表 n 类海冰的

海冰乘子,用以计算该类海冰在影响船舶可航行时的权重(表 3)。当 IN 指数大于 0 时,表示该类船舶可在该类海冰区域中安全航行;当 IN 指数小于 0,则该类船舶不能在该类海冰区域中航行。

表 3 海冰乘子

kn/h

海冰类型	船舶类型						
	CAC 3	CAC 4	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
open water	2	2	2	2	2	2	2
grey ice	2	2	2	2	2	2	1
grey-white ice	2	2	2	1	1	1	-1
thin first year ice 1 st stage	2	2	2	1	1	-1	-1
thin first year ice 2 nd stage	2	2	2	1	-1	-1	-1
medium first year ice	2	2	1	-1	-2	-2	-2
thick first year ice	2	1	-1	-2	-3	-3	-3
second year ice	1	-2	-3	-4	-4	-4	-4
multiyear ice	-1	-3	-4	-4	-4	-4	-4

2.2 航迹规划模块

基于全球气象水位地理要素建立船舶航行速度在全球范围内的分布,基于航行时间最短的判别准则,采用 A-Star 算法寻找目的地间的最优航线。

2.2.1 海冰条件对航速的影响

海冰条件是影响船舶在北极地区航行速度的关键因素。海冰越厚、海冰越密集对船舶航行速度

的减弱程度越大。最糟糕的航行情景是不得不租用破冰船来帮助航行,这无疑会增加整个航线的航运成本。海冰密度和海冰厚度与航速之间的关系如表 4 所示。其中,DS 指船舶的设计速度,在无冰或者海冰密度小于 30% 的水域,不考虑其他气象水文要素,船舶以设计速度航行;此外斜体部分的数值是指在采用破冰船引航后船舶的航速。

表 4 海冰条件与船速的关系^[12]

海冰密度/%	船速/(kn·h ⁻¹)				
	冰厚小于 30 cm	冰厚 30~120 cm	冰厚 120~180 cm	冰厚 180~240 cm	冰厚大于 240 cm
无冰	DS				
<30	DS	10	8	8	6
30~60	DS×0.8	8	8	7	6
60~80	DS×0.6	6	10	10	8
80~100	DS×0.5	8	6	6	4

2.2.2 海流场、风场、浪高对船速的影响

在北极地区的无冰水域,船舶航速还受到环境要素,如风、浪、流的影响。这些影响因子对船速的影响取决于这些影响因子的数值大小以及其与船舶航行方向之间的夹角。如,若船舶航行方向与风和流的方向一致,则风和流对航速起着促

进作用;反之,则阻碍船舶航行。此外,浪越高,船舶航行越困难,航速越慢。风、浪、流与船速之间的关系如表 5 所示。其中,DS 指设计速度,VC 指洋流速度,顺向指的是船速与风向的夹角小于 30°,逆向指船速与风向的夹角大于 150°,其余都为侧向;此外,当海冰密度超过 30% 时,这些要素

的影响可以被忽略。

表 5 海流、风速风向、浪高等要素与船速的关系

海冰密度/%	浪高/m	不同风和流向的船速/(kn · h ⁻¹)		
		逆向	侧向	顺向
无冰	<3	DS-1-VC	DS	DS+1+VC
	3~5	DS-2-VC	DS	DS+VC
	>5	DS-6-VC	DS-3	DS-3+VC
<30	<1		10	
	1~2		8	
	2~3		6	
	3~5		5	
	5~7		4	
	>7		3	
>30	0		DS	

2.2.3 A-Star 算法

A-Star 算法是由 P. E. Hart, N. J. Nilsson 和 B. Raphael 共同提出的一种静态路网中寻找最优路径的有效搜索方法^[13]。常规算法(如 Dijkstra 算法)能够确保找到最短路径但需要遍历整个网格,效率较低;贪心算法搜索速度快,但并不能保证寻找到最优路径。相比于 Dijkstra 算法和贪心算法, A-Star 算法建立在启发式算法之上,既能保证搜索速度,也能在启发式算法的基础上保证搜索的全局最优性,其算法具体流程为 6 步。

(1) 确定起始点 start, 目标点 end, 开启列表 open, 闭合列表 close。

(2) 使用启发式算法计算 start 点的效用函数 $f(n)$, 并将 start 点存入 open 列表中。

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (2)$$

式中: $f(n)$ 是从初始状态经由状态 n 到目标的估计代价值; $g(n)$ 是在状态空间中从初始状态到状态 n 的真实代价值; $h(n)$ 是从状态 n 到目标状态的最优路径估计代价值。

(3) 将 open 列表中效用函数最小的节点取出, 作为当前状态 n 节点, 将该节点存入 close 列表中。

(4) 若 n 节点就是 end 节点, 则算法结束, 退出算法。否则, 继续执行。

(5) 考察 n 节点的所有可通行邻节点, 若 close 表中存在该节点, 则跳过; 若 open 表中不存在该节点, 则计算该节点的效用函数 f , 该节点的父节点赋值为 n 节点, 并将该节点加入 open 列表中; 若 open 列表中已存在该节点, 重新计算该节点的效用函数 f , 比较 2 次的效用函数 f , 用较小的 f 值替换较大的 f 值, 并将父节点设为 n 节点。

(6) 若 open 列表不空, 则回到步骤(3)。否则, 路径寻找失败, 起始点与目的地之间没有可通行路径。

2.3 航线经济效益模块

经济效益从运费、燃油费、船舶折旧费、常规费用及过路费 5 个方面进行评定, 即

$$\text{经济效益} = \text{运费} - \text{燃油费} - \text{船舶折旧费} - \text{常规费用} - \text{过路费}^{[10]} \quad (3)$$

式中: 运费由货物装载量及在不同航道下年往返次数所决定。不同航道中的往返次数又与通过各航道的等待时间、船速及不同航道的路程所决定。北极海域海冰条件决定了北极航道的通航时间及航道积冰情况, 与船舶性能共同决定了航速的快慢, 从而影响航道总的航行路程和年往返次数。各要素计算方法为:

$$\text{船速} = \begin{cases} v_1, \text{设计速度} \\ v_2, \text{修正速度} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{年往返次数} = \frac{365}{[(\text{各航线路程} / \text{船速}) \times 2 + \text{等待时间}]} \quad (5)$$

$$\text{运费} = \text{载货量} \times \text{年往返次数} \times \text{运费单价} \quad (6)$$

总燃油费由航行中燃油消耗量与燃油单价共同决定, 其中燃油消耗量是船速和航行总路程的函数。关系表达为:

$$\text{燃油消耗量} = \sum_{i=1}^N F(\text{船速}, \text{各航线路程}) \quad (7)$$

式中: N 为年往返次数。

$$\text{总燃油费} = \text{燃油消耗量} \times \text{燃油单价} \quad (8)$$

船舶折旧费指的是船舶在使用过程中的年折损费用。常规费用是指船舶航行过程中的管理维修费用、保险费用及人工费用。而过路费是指通过不同航道所需缴纳的费用, 如经过东北航道要缴纳破冰费, 而经过苏伊士运河也要缴纳一定的过路费。

3 数据与分析

3.1 数据来源

海冰密度和海冰厚度数据来自于美国国家大气科学中心(NCAR)提供的 CCSM4 模式在 RCP4.5 情景下的 2006—2010 年逐日数据,格点数为 360×180 。

风场数据来自于美国国家海洋与大气管理局(NOAA)提供的 GFDL-ESM2G 模式在 RCP4.5 情景下的 2006—2010 年逐月数据,格点数为 360×210 。

流场数据来自于 1993—2014 年法国国家空间研究中心(CNRS)提供的 AVISO+多卫星融合逐日数据,格点数为 480×241 。

海浪资料来自于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 1979—2017 年全球大气再分析产品 ERA-Interim 逐日数据,精度为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。

地形数据来自于美国地球物理中心(NGDC)提供的 ETOPO 数据,精度为 $30'$ 。

船舶信息、燃油费、过路费、日常运营费用以及航运收费数据来自于北极航线相关文献。

3.2 数据分析

由于不同气象数据以及地理信息数据的精度不同。首先要对数据的空间尺度进行归一化处理。本研究以地形数据空间尺度为基准,将不同空间尺度的气象水文要素数据插值到地形数据中。

4 数值仿真

本研究以苏伊士运河航线作为对照组,运用上述模型,对北极航线东段即东北航线进行评估。

航行方案设定为:①船舶只在苏伊士运河航线航行;②在北极航线开通的时间内在北极航线上航行,其余时间在苏伊士运河航线上航行。起点和终点为大连(亚洲)—鹿特丹(欧洲)。

以 4 300TEU 的集装箱船为例,具体评估流程为:①利用全球气象水文地理环境数据建立影响船舶航行的环境背景场。②利用航迹规划模块优化从大连到鹿特丹的东北航线(图 3),得到航线距离和各水域航速。③利用航行环境模块,计算该优化航线上的年均可航行天数(在本研究中,当且仅当最优航线上所有格点的 IN 指数均大于 0 时,才可

被记为可安全航行)。④利用航线经济效益模块分析航行采用方案 1 与方案 2 的经济效益(表 6)。

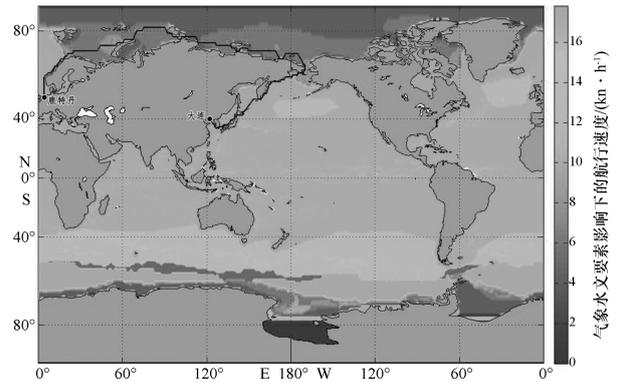


图 3 气候变化背景下 2050 年东北航线航迹规划(最优航线)

表 6 北极航线评估信息

参数	东北航线	苏伊士运河
可航行天数/d	152	365
距离/n mile	8 056(7 931)	10 907
单次航行时间/d	35(33)	48
船舶类型	ICE 1B 集装箱船	常规集装箱船
船舶基准航速/($\text{kn} \cdot \text{h}^{-1}$)	14	14
船舶折旧费/(万美元 $\cdot \text{a}^{-1}$)	528	440
燃油费/(美元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	350	350
过路费/(美元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	—	240 800
破冰费/(美元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	446 000	—
常规费用/(美元 $\cdot \text{d}^{-1}$)	8 925	6 100
航运收费/(美元 $\cdot \text{TEU}^{-1}$)	1 200	1 200
经济效益/(美元 $\cdot \text{a}^{-1}$)	4 398 400	4 623 100

注:东北航线中括号内数字为 2013 年中远集团永盛轮从中国大连出发到荷兰鹿特丹,顺利完成北极东北航道首航任务实测数据。

综合评估模型模拟的结果显示:在 RCP4.5 情景下,2050 年该条北极航线在 1 a 中有 152 d 可航行;最优航线长度为 8 056 n mile,相比于苏伊士运河 10 907 n mile,该航线距离更短,航行时间可节省 13 d。这与 2013 年中远集团永盛轮从中国大连出发到荷兰鹿特丹,顺利完成北极东北航线首航任务的实测数据相当接近。经济效益方面:采用方案 1 的年收益为 4 623 100 美元,而采用方案 2 的年收益为 4 398 400 美元。因此,在 RCP4.5 情景下,2050 年

从大连(亚洲)到鹿特丹(欧洲),苏伊士运河航线仍然是主要航运枢纽,比北极航线有更高的经济效益;但未来北极航线在可航行时段将成为重要的替补航线,用以缓解苏伊士运河航线日益拥挤的情况。

参考文献

- [1] YOUNG O R. The age of the arctic[J]. *Foreign Policy*, 1986, 61:160—179.
- [2] 郭培清. 北极航道的国际问题研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [3] VALSSON T, ULFARSSON G F. Future changes in activity structures of the globe under a receding Arctic ice scenario[J]. *Futures*, 2011, 43(4):450—459.
- [4] 戴晋. 浅谈东北航道对我国航运业的影响[J]. *中国远洋航务*, 2010(4):70—71.
- [5] HONG N. The melting Arctic and its impact on China's maritime transport [J]. *Research in Transportation Economics*, 2012, 35(1):50—57.
- [6] 解国强. 北极东北航道航行环境及安全航行研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [7] STROEVE J C, KATTSOV V, BARRETT A, et al. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(16):16502.
- [8] DNV. 2010, shipping across the Arctic Ocean. A feasible option in 2030—2050 as a result of global warming? [R]. *Research and Innovation*, 2010:4.
- [9] SOMANATHAN S, FLYNN P, SZYMANSKI J. The Northwest passage: a simulation[J]. *Transportation Research Part A Policy & Practice*, 2009, 43(2):127—135.
- [10] LIU M, KRONBAK J. The potential economic viability of using the Northern Sea Route (NSR) as an alternative route between Asia and Europe[J]. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(3):434—444.
- [11] WAY B, KHAN F, VEITCH B. The Northern Sea Route vs the Suez Canal Route: an economic analysis incorporating probabilistic simulation optimization of vessel speed[C]// *ASME 2015, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2015:V008T07A010.
- [12] NAM J H, PARK I, LEE H J, et al. Simulation of optimal arctic routes using a numerical sea ice model based on an ice-coupled ocean circulation method[J]. *International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering*, 2013, 5(2):210—226.
- [13] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for heuristic determination of minimum path cost[C]// *Sequences, Subsequences, & Consequences*, 1968.