

北极海冰消融情景下东北航道通航性能演变分析

黄季夏^{1,2}, 张天媛³, 曹云锋², 葛全胜¹, 杨林生¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 北京林业大学教育部森林培育与保护重点实验室, 北京 100083;

3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 全球气候增暖, 导致北极海冰消融加速, 冰上丝绸之路的开通逐渐提上日程。本文针对2030—2070年俄罗斯8个重要港口通过东北航道到达白令海峡的通航性能, 采用6种CMIP5气候模式在2种排放情景下的海冰数据, 以及PC6破冰船和普通商船2种船型, 分别对最优航线、通航时长、可通航里程以及通航成本4项要素进行研究。主要结论为: ① 随着时间变化, 各条最优通航线路逐渐集中有序, 普通商船的通航能力显著提高, 到2070年拥有和PC6近似相等的通航能力; ② 俄港口到白令海峡间的运输时长每过10 a下降14 h, 其中圣彼得堡港运输时长下降最为显著。到2070年, 俄港口与白令海峡的经度差每增加1°, 该港口的运输时长下降0.4 h; ③ 未来50 a, 东北航道可通航里程平均每隔10 a增加166 km, 其中圣彼得堡港可通航里程的变化模式和平均变化模式最为相近; ④ 从北冰洋港口出发的航线通航成本每10 a下降1万美元, 商船在高浓度排放情景下总通航成本的下降幅度最明显。结合海冰变化情况, 俄中西部港口具有巨大的资源运输潜力。本文量化并评估了东北航道在未来海冰消融情景下的通航性能演变态势, 为东北航道通航以及北极港口贸易情况提供了理论和数据支撑。

关键词: 全球气候增暖; 冰上丝绸之路; 东北航道; 通航性能

DOI: 10.11821/dlxb202105001

1 引言

随着全球气候持续变暖, 北极海冰逐渐消融, 为北极航道的开通提供了条件。在克服海冰障碍的情况下, 通过北极航道运输在时间、成本、安全性等方面要优于传统航道。北极航道分为东北航道和西北航道, 其中东北航道西起西北欧北部海域, 东至符拉迪沃斯托克(海参崴), 途径巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海、新西伯利亚海和白令海峡, 沿线国家有冰岛、瑞典、芬兰、俄罗斯等, 全线通航期2~3个月^[1]。东北航道是连接太平洋和大西洋最为便捷的海运路径, 比传统航线缩短1/3的航程^[2], 大幅减少了亚太与欧洲港口间的货运里程数。此外, 全球变暖导致冻土层消融, 北极地区的资源开采更加便利, 提高了资源的可用性, 结合东北航道的开通, 使能源供需国家间的能源贸易迎来了全新的局面。因此, 研究气候变化情景下东北航道的通航性能, 对于海上运输与国家贸易具有重要意义。

收稿日期: 2019-07-03; 修订日期: 2020-11-05

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-4); 中国科学院先导科技专项(XDA190705) [Foundation: The Key Project of the Chinese Academy of Sciences, No.ZDRW-ZS-2017-4; The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA190705]

作者简介: 黄季夏(1985-), 男, 安徽桐城人, 博士, 副教授, 主要从事空间数据分析。E-mail: huangjix@bjfu.edu.cn

通讯作者: 杨林生(1966-), 男, 河南唐河人, 博士, 研究员, 主要从事世界地理与环境健康研究。

E-mail: yangls@igsnrr.ac.cn

在现有关于北极地区海冰变化和北极航道适航性的研究中, Lei 等对 1979—2012 年的多源遥感数据进行了分析, 量化东北太平洋沿岸海冰条件的时空变化, 发现东北航道的航行开放期从 1980 年的 84 d 增加到 2012 年的 146 d^[3]。关于未来北冰洋航线的通航性, 有学者认为最早在 2030 年可能出现夏季北极高纬地区不需护航的情况, 而冬季航行可能仍需要破冰船的支持^[4]; Melia 通过量化预测海冰减少与航运过境北极地区的对应关系, 发现到 21 世纪中叶标准开放水域船只的通航频率将增加 1 倍, 横跨北极中部的航线也可通行^[5]。海冰—船速的关系表明, 到 21 世纪中叶从欧洲到亚洲的东北航线通常比其他航线快 10 d, 到 21 世纪末则快 13 d^[5-6]。Stephenson 等基于不同气候模型计算平均最小成本航线密度, 认为到 21 世纪中叶北极东部仍将是跨北极航运最可靠的可达海域^[4-5, 7]。国内的有关研究中, 王蔓蔓定量评估了 1979—2017 年航道开通日期和通航时长^[8]; 马龙等分析了东北航道的通航期及影响通航的关键水域^[9]。和国外相比, 国内有关北极航道通航情况未来年际变化的研究较少。

在有关北极航道经济成本的研究中, Schøyen 等对干散货分别通过东北航道和苏伊士运河 2 条航线运输的经济性进行了对比^[10]。Somanathan 等在考虑自然环境条件、冰情冰况、船舶等待时间等因素的前提下模拟了西北航道相对于巴拿马运河航线的经济优势^[11]。Nam 等建立的北极海冰过境模型中包括航速、燃料、破冰船费、经营和港口停靠等成本因素, 也包括海冰密度、海冰厚度及其他环境要素在内的影响航速的因素^[12]。李振福等对东北航线和传统航线的成本收益进行比较, 认为随着北极海域的航行条件逐渐改善, 东北航线运输成本会随之降低, 其经济优势将会更加突出^[13]。史义江从“冰区船舶在无冰航段航行不经济”这一角度出发, 提出在普通航段采用普通船舶运输、在冰区航段换用冰区船舶运输的方案^[14]。张侠等对比了中国分别通过北极航线和传统航线到达北美和欧洲的海运距离与成本^[15]; 郝增辉运用成本分析法对比了通航期内不同航线的成本构成, 发现燃油费、破冰引航费和船舶造价是影响北极航线航行经济性的 3 大因素^[16]。

可见, 现有研究主要集中于历史海冰数据的趋势评估, 或者未来气候变化下完整北极航线的通航时间预测。作为北极航线贸易的起止点, 有关东北航道各个关键港口的通航性能的研究较为缺乏, 尤其是在海冰消融情景下通航最优路径、通航时长、可通航里程及通航成本研究方面。针对上述问题, 本文重点分析 2030—2070 年海冰消融情况下东北航道的通航性能的变化趋势, 绘制不同船型与排放情景下 6 种气候模式的最优通行航线, 量化各航线通航时间的演变, 计算在冰况限制下各航线的可通航里程, 最后分析未来东北航道的通航成本变化。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

以海港规模、吞吐量、冻结程度等为重要参考指标, 选取俄罗斯地区北冰洋沿岸重要港口共 8 个, 名称及坐标位置见表 1。港口数据来源于 World Port Source 网站 (<http://www.worldportsource.com>)。

代表性浓度路径 (Representative Concentration Pathways, RCPs) 是政府间气候专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 为第 5 次评估报告而开发的排放情景, 该情景的开发结合了气候、大气循环、碳排放、社会经济等多种因素^[17], 能够为研究地区的气候变化对其影响做出具体分析。本文采用 RCP 4.5 和 RCP 8.5 典型排放情景^[17-18], 选择耦合模式比较计划第 5 阶段 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5,

表1 俄罗斯重要港口基本信息
Tab. 1 Basic information of important ports in Russia

港口中文名称	港口英文名称	纬度	经度
阿尔汉格尔斯克	ARKHANGELSK	64°32'0"N	40°31'0"E
迪克森	DIKSON	73°30'27"N	80°23'47"E
哈坦加	KHATANGA	71°58'57"N	102°28'17"E
摩尔曼斯克	MURMANSK	68°58'21"N	33°2'46"E
佩韦克	PEVEK	69°42'6"N	170°16'59"E
萨别塔	SABETTA	71°15'0"N	72°6'10"E
圣彼得堡	ST. PETERSBURG	59°55'38"N	30°13'48"E
季克西	TIKSI	71°38'35"N	128°52'35"E

CMIP5) 中的6种全球气候模式的海冰密集度和厚度数据 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>), 数据格式为NetCDF。目前东北航道在冬季开通较为困难, 因此本文将时间范围限制为2026—2075年每年的5月1日—10月31日, 时间分辨率为1 d。各CIMP5模式数据的具体信息见表2。

表2 6种CMIP5全球气候模式数据基本信息
Tab. 2 Basic information of six CMIP5 global climate models data

模式名称	所属国家	格点数(经向×纬向)
CNRM-CM5	法国	362×292
GFDL-CM3	美国	360×200
HadGEM2-ES	英国	360×216
IPSL-CM5A-LR	法国	182×149
MIROC-ESM	日本	256×192
MPI-ESM-MR	德国	802×404

2.2 研究方法

本文的整体思路为: 首先对研究数据进行预处理, 计算北极地区各栅格格网的航行安全指数, 然后采用基于航行安全指数的Dijkstra最短路径算法, 计算各港口到白令海峡的最优航线, 根据最优航线距离及船速生成通航时间, 最后完成各港口出发最优航线的通航成本计算。

2.2.1 数据处理与航行安全指数计算 选择2030年、2040年、2050年、2060年和2070年5个年份作为典型的时间节点, 考虑到海冰融化和水域开放时间, 将每个时间节点的前后5 a、每年5月1日—10月31日的海冰数据进行均值处理, 作为该时间节点的海冰数据, 然后按照EASE-Grid北半球方位角等积投影的方式对重采样后的栅格数据投影为360×360个像元网格, 像元大小为25 km×25 km^[19]。

使用北极通航可行性模型(Arctic Transport Accessibility Model, ATAM)对通航性进行量化, 该模型采用了北极冰区航运系统(Arctic Ice Regime Shipping System, AIRSS)中冰乘数的概念。基于冰型和船级的冰乘数(Ice Multiplier, IM)是一系列从-4~2的非零整数, IM值越高, 航行风险越低。IM值小于0, 表示该冰区存在重大危险, 应该避免在此处航行^[6]。本文选择破冰船(PC6)和普通商船(OW)2种船级分别计算IM值, 计算方法如公式(1)所示^[6]:

$$IM_{PC6} = \begin{cases} 2, & 0 \leq T < 70 \\ 1, & 70 \leq T < 120 \\ -1, & 120 \leq T < 151; \\ -3, & 151 \leq T < 189 \\ -4, & T \geq 189 \end{cases}; \quad IM_{ow} = \begin{cases} 2, & T = 0 \\ 1, & 0 \leq T < 15 \\ -1, & 15 \leq T < 70 \\ -2, & 70 \leq T < 120 \\ -3, & 120 \leq T < 151 \\ -4, & T \geq 151 \end{cases} \quad (1)$$

式中: IM_{PC6} 为PC6对应IM值; IM_{ow} 为普通商船对应IM值; T 为海冰厚度 (cm)。

在 AIRSS 框架下, 本文中冰类型被简单划分为 2 种: 冰和海洋。因此, 船舶航行安全指数 (Ice Numeral, IN) 如下:

$$IN = (C_{\text{冰}} \times IM_{\text{冰}}) + ((1 - C_{\text{冰}}) \times IM_{\text{海洋}}) \quad (2)$$

式中: $C_{\text{冰}}$ 是冰的密集度 (取值 0~1); $IM_{\text{冰}}$ 是冰的乘数; $IM_{\text{海洋}}$ 为海洋的乘数。

参考公式 (1) 中 IM 值的取值范围, 将陆地的 IM 值定为 -5, 海洋的 IM 值定为 3。按照上述原理将 2030—2070 年的海冰密集度与厚度数据代入计算, 得到各时段不同模式在不同排放情景下 2 种船型对应的 IN 值。

2.2.2 最优航线计算 本文采用 Dijkstra 最短路径算法计算从白令海峡到北冰洋沿岸各港口之间最短的路线距离, 使用该算法时不考虑实际航行过程中遇到的状况, 假定航行安全指数大于 0 的地方的北极海域均可通行, 路线完全由海冰状况决定。Dijkstra 最短路径算法如下:

(1) 对于源像元 s , 定义 d_s 为 s 到目标像元 j 的最短路径距离, 规定到源像元自身的最短路径距离 d_s 为 0。对于其他像元 i , $d_i = \infty$ 。标记源像元 s 为已搜索像元 k ;

(2) 计算已标记像元 k 到其直接连接的未标记像元 i 之间的距离 $d_i = \min[d_i, d_k + l_{ki}]$ 。式中: l_{ki} 是像元 k 到像元 i 的直接连接距离;

(3) 在所有未标记像元中选择 d_i 最小且航行 $IN > 0$ (可通行) 的像元 i 作为下一个选择像元, 标记像元 i 为最短路径中的一个像元;

(4) 从未标记的像元中找到直接连像元 i 且 IN 值大于 0 的像元 h , 计算 $d_h^* = d_i + d_{ih}$, 其中 d_{ih} 为像元 i 与像元 h 之间的距离 (如果 2 个像元 i 、 h 直向相连, $d_{ih} = 1$; 如果 2 个像元 i 、 h 像元斜向相连, 则 $d_{ih} = 1.4$)。将 d_h^* 与原来的 d_h 相比, 如果 $d_h^* < d_h$, 则修改 d_h 为 d_h^* , 标记点 h 为最短路径中的一点;

(5) 如果所有像元都被标记, 则算法完成, 否则返回第 (2) 步^[20]。该最短路径即为最优航线。按照上述方法生成 2030—2070 年 PC6 和 OW 船从各港口到白令海峡在不同情景不同模式下的通航路线图, 将同一模式同一港口的 OW 船航线置于 PC6 航线之上, 确保能够体现不同船型通航能力的差异变化。

2.2.3 通航时间计算 北冰洋沿岸港口到白令海峡冰区通航时长计算过程如下: ① 确定 IN 值对应的航速^[21]; ② 航线栅格像元大小为 25 km×25 km, 非直线航行时取对角线长度为 25 km×1.4 = 35 km, 对于每个航线栅格, 航行时间=像元大小 (或对角线长度) /IN 值对应船速; ③ 将航线上所有栅格的航行时间相加, 得到该航线的总通航时长。

经过上述计算之后, 可以得到 2030—2070 年俄罗斯北冰洋沿岸各港口到白令海峡航行时长的变化趋势。

2.2.4 通航成本计算 为方便计算, 本文统一以航次 (单次航行的天数) 为单位计算航运成本, 载货船型设置为 4100 TEU 抗冰型集装箱船^[22]。在此前提下, 构建航运成本体系 (图 1), 依据该体系计算不同冰级船型—排放情景中航运成本的变化。

参考已有研究^[22-23], 本文定义航运成本模型包括:

(1) 资本成本: 资本成本仅包括船舶租金 TU_j , 具有抗冰能力的 4100 TEU 集装箱船日租金为 2.6 万美元^[22]。

(2) 运营成本: ① TCr_j 为船员费, 年船员费为 172.8 万美元, 折合到日工资为 4734.25 美元; ② TR_j 为修理维护费, 年度修理维护费用为 14.3 万美元, 折合成日修理维护费 391.78 美元; ③ TP_j 为保险费, 抗冰型集装箱船年度的保险费为 21 万美元, 折合日保险费为 575.34 美元; ④ TM_j 为管理费, 日管理费设定为船员工资的 1/2, 为 2367.13 美元; ⑤ TS_j 为其他运营费, 设定为管理费的 2%, 因此日其他运营费为 47.34 美元^[22]。

(3) 航次成本: ① TF_{ij} 为燃料费, 等于主机燃料消耗 \times 燃料油价格。而主机燃料消耗率和船只的航行速度密切相关, 具体公式为:

$$F = FP \times BHP = FP \times m \times V^3 \quad (3)$$

式中: F 为主机燃料消耗率 (t/h); FP 为主机单位功率燃料消耗率; BHP 为主机制动马力; 抗冰型船只 BHP 为 4.68 万 kw, FP 为 187 g/(h kw); V 为航速 (kn); m 为比例系数, 由公式 (3), $m = BHP/V_{\max}^3$ 。本文设定在水域航行的速度 16 n mile/h 为最大速度, 因此 $m = 11.42$ 。一条航线的各栅格中, IN 值和对应的速度均有所不同, 因此各栅格的航行时间与主机燃料消耗率也不同。取燃料重油价格为 600 美元/t, 最终和主机燃料消耗率、航行时间共同计算得出逐栅格相加后的总燃料费^[22]。

② TB_{ij} 为破冰护航费, 根据俄罗斯北方海航道管理局 (<http://www.nsra.ru>) 的有关规定, 单次航行的破冰护航费与船舶总吨位、破冰船等级、航行季节及穿越海域的数量有关。在北方海航道管理局网站的破冰船价值估算工具中, 设置具体参数如下。船舶总吨位: 一艘 4100 TEU 集装箱船的最大载箱量为 2850 TEU, 设每个集装箱装载 14 t 货物, 则总货物装载量为 3990 万 t^[22]。破冰船等级: 本文中的 PC6 级 (国际船级社协会规定的极地船级) 破冰船与《芬兰—瑞典冰级规则》中的 IA Super 船级接近^[24], 且由 Baltic Sea Ice Service (<http://www.bsis-ice.de>) 处的《芬兰—瑞典规则冰类与其他船级社冰类的近似对应表》(下称“近似对应表”) 得到 IA Super 船级对应于俄罗斯船舶登记局规定的 Arc5; 而 OW 船级和加拿大极地航行防污染规则中的 Type E 相对应, 由近似对应表可得该船级对应于俄罗斯船舶登记局规定的 Ice1 船级。因此, 在破冰护航费计算中分别选择 Arc5 和 Ice1 船级进行计算。航行季节: 由研究连贯性, 取海冰较少的夏季—秋季作为主要航行季节。穿越海域数量: 俄罗斯北方海航道管理局将北方海区划分成 7 个海域, 从不同的港口出发, 穿越的海域数量不同, 需缴纳的破冰护航费也不同。设定上述参数之后, 计算得出从不同港口出发的航线所需缴纳的破冰护航费。

③ TD_{ij} 为折旧费, 一般一艘造价 7150 万美元的抗冰型 4100 TEU 集装箱船使用寿命为 25 a, 因此年折旧费为 7150 万/25 = 286 万美元, 折合日折旧费为 8 千美元^[23]。

综上, 总航运成本的计算公式为:

$$T_{ij} = TU_{ij} + TCr_{ij} + TR_{ij} + TP_{ij} + TM_{ij} + TS_{ij} + TF_{ij} + TB_{ij} + TD_{ij} \quad (4)$$

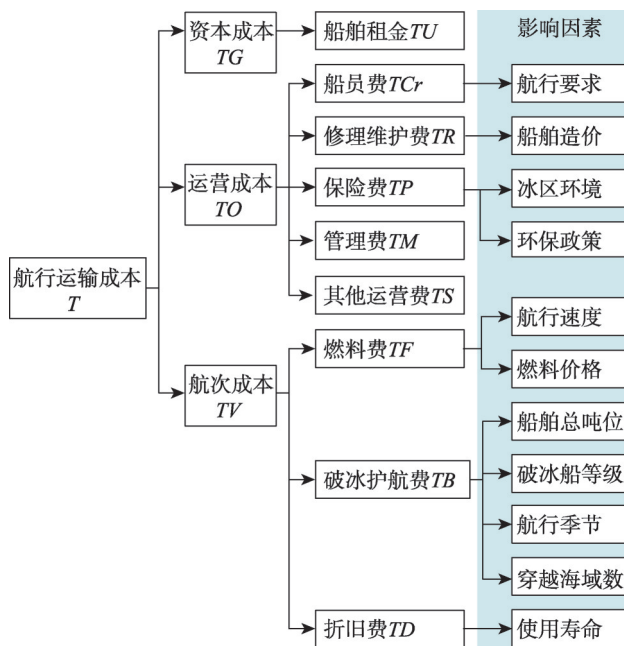


图1 航运成本体系

Fig. 1 Shipping cost system

3 结果分析

3.1 2030—2070年东北航道通航路线变化

以 2030 年、2040 年、2050 年、2060 年、2070 年 5 个时间节点作为未来气候变化情景

的研究阶段, 绘制出在 RCP 4.5、RCP 8.5 温室气体排放情景下 PC6 和 OW 船级在各 CMIP5 模式中的最短航线 (图2), 起点为8个东北航道沿线 (北冰洋沿岸) 港口, 终点为白令海峡。该研究区域涵盖了东北航道冰区, 航行路线充分按照冰区的冰情冰况规划, 其中冰情冰况用海冰密集度和海冰厚度综合计算, 并以航行安全指数的形式表达。随着时间变化, 各航线变得逐渐集中有序, 各类型船只都能逐渐按照最短路径航行; 并且 OW 船型航线颜色也逐渐向蓝色统一, 说明 OW 船在良好的冰况下可以拥有和 PC6 同等的通航能力。在2种排放情景下, 随着排放浓度上升, OW 船的通行能力显著提高, 并增加了新的可通行航线。

以从圣彼得堡港通往白令海峡的航线为代表分析图2, 在研究时段前期能够行驶该航线的船只大多是 PC6, OW 出现概率较小。RCP 4.5 情景下, 2030 年少有几种模式的 OW 船可以从圣彼得堡港到白令海峡, 但花费的路程明显大于 PC6 (图2a)。而同年在 RCP 8.5 情景 (图2b) 中能够通行的 OW 船在相同航段通行的距离明显缩减, PC6 则全部以最短路程航线 (下称“主要航线”) 行驶。RCP 8.5 情景下, 到2050 年主要航线基本全部为蓝色, 大多模式的 OW 船都可以和 PC6 一样走通, 但红色航线还可见 (图2f); 到2070 年 OW 船则实现了完全通行 (图2j)。从佩韦克和季克西港出发的两条路线距离普遍较短, 各模式、各船型之间的航线差异不大; 从迪克森、萨别塔和哈坦加港出发的路线随年代和情景的变化冰况逐渐处于稳定状态。摩尔曼斯克和阿尔汉格尔斯克2个港口的路线情况相对复杂, 从这2个港口出发到经度位置相近于季克西和哈坦加港的海区, 该航段的航线比较混杂, 不同模式下的不同船型根据其具体的海冰情况开辟了多条航线, 但随着时间和情景变化, 冰况统一, 该段航线也逐渐集中, 出现了比较清晰的界限。

总体而言, 研究时段越往后、温室气体排放浓度越高, 冰况由复杂变为单一, 各港口到白令海峡的航线相应由繁杂到统一。在冰况变化过程中, 出现了新的可通行的模式与船型, 并在一段时期内出现了新的航线, 不过由于之后冰况趋于统一, 航线最终也向距离最短的情况集中合并。最后, OW 船型和 PC6 船型在通航能力上的差别消失, 各港口到白令海峡的航线趋向稳定。

3.2 2030—2070 年东北航道通航时间趋势演变

按照船型与情景将各种气候模式下的航线分成4类, 计算不同气候模式在2030—2070 年的通航时间均值, 得到不同排放情景下各船型从北冰洋沿岸港口到白令海峡通航时间 50 a 内的变化趋势图 (图3)。总体而言, 8 个港口的航行时间随着年代变化整体呈下降趋势。在 RCP 8.5 情况下, OW 航行时间的下降趋势变的比较明显 (图3b)。2 种排放情景下 OW 航行时长最大值 (从圣彼得堡出发) 小于 650 h, 而 RCP 4.5 情景下的 PC6 时长最大值小于 490 h, RCP 8.5 情景下则减少到 440 h。不同的排放浓度对航行时长的下降幅度具有明显的影响, 排放浓度越高, 航行时长下降幅度越大。

将4种船型—情景组合数据综合整理, 得到总体航线时长变化趋势 (图4)。圣彼得堡港到白令海峡的时长位于8个港口之首, 2030 年时长可达 544 h (22.7 d), 到2070 年下降为 463 h (19.3 d), 时长下降幅度在北冰洋沿岸所有8个港口中最大, 减少了 3.4 d; 阿尔汉格尔斯克和摩尔曼斯克港相比于圣彼得堡港花费时间较少, 其中摩尔曼斯克港口的时长随年代下降的幅度为 3.1 d, 仅次于圣彼得堡; 萨别塔和迪克森港的整体走向相近且平行, 时长下降幅度不超过 3 d; 哈坦加和季克西港到白令海峡的耗时相对较短, 不超过 10 d; 佩韦克港到白令海峡距离较短、冰况良好, 在2030—2070 年航线长度维持较为平稳, 且在所有中到白令海峡耗时最少 (5 年平均航行时长 3.6 d)。港口平均每 10 a 通航时间下降 14 h, 最西部的圣彼得堡港下降最快, 每 10 a 变化 20 h; 最东部的佩韦克港下降

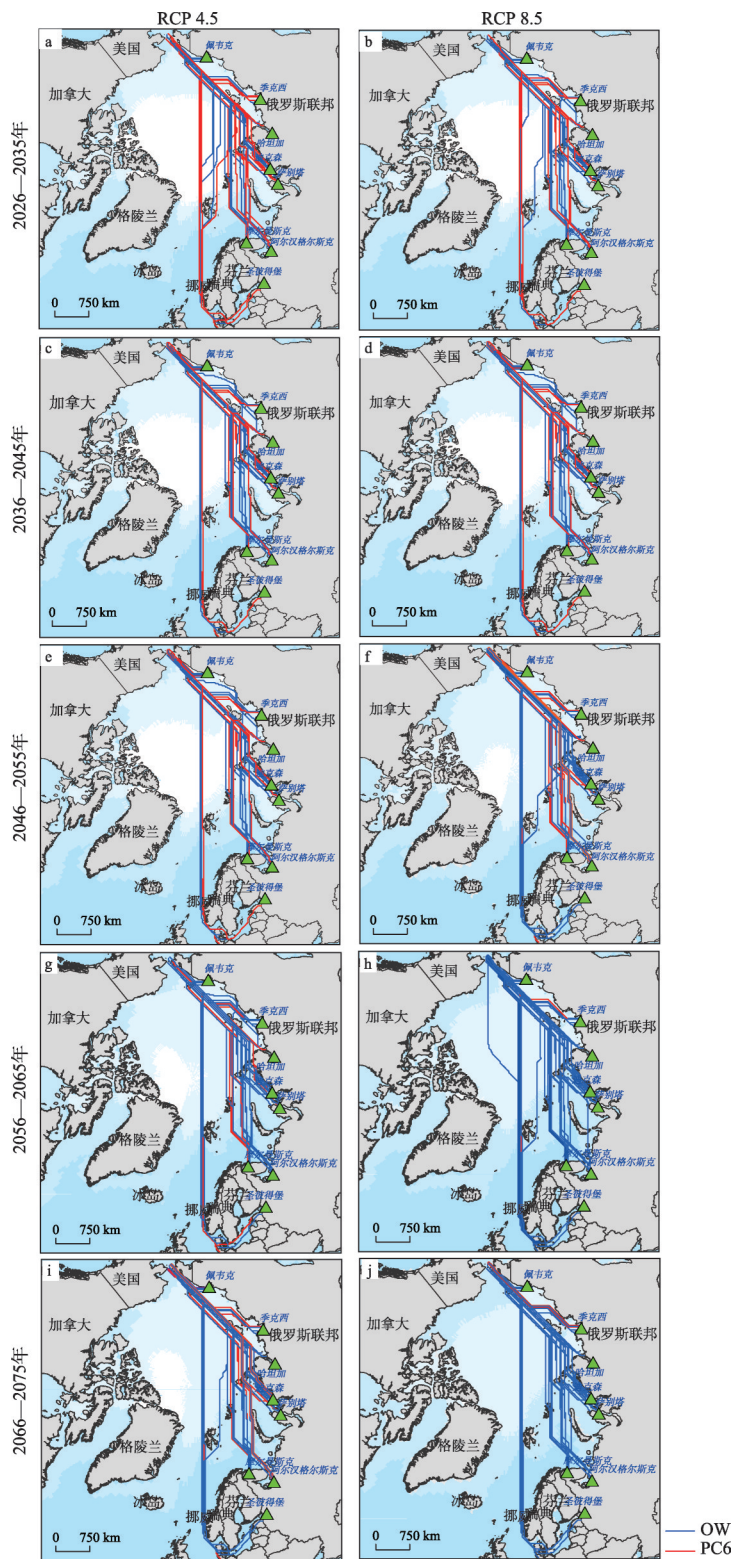


图2 2030—2070年PC6和OW船型不同排放情景与气候模式下最优航线
Fig. 2 Optimal navigation routes under different RCPs and climate patterns of PC6 and OW in 2030-2070

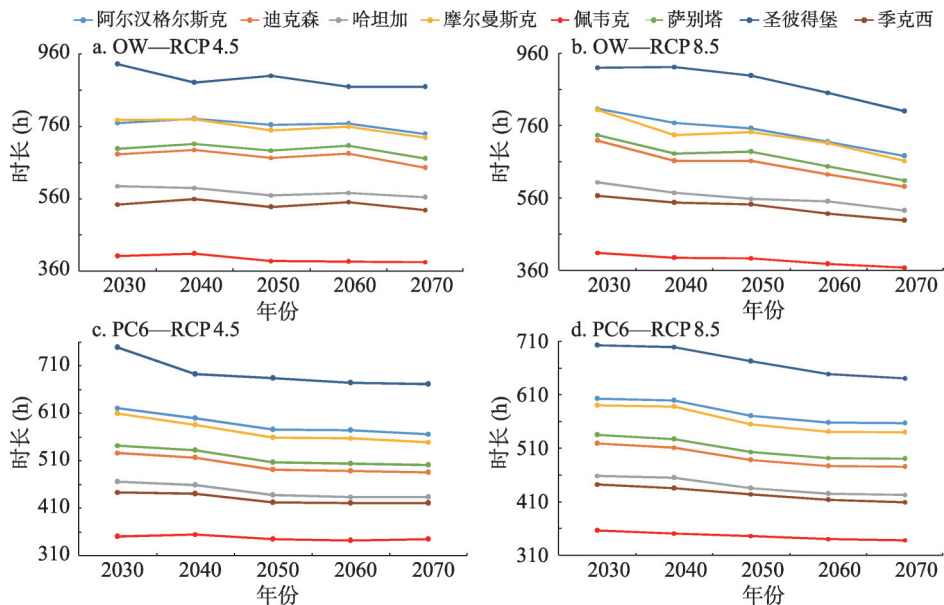


图3 不同船型—情景组合下东北航道沿线港口到白令海峡时长变化
Fig. 3 Changes of the time between ports along the Northeast Passage and Bering Strait under different ship class-RCPs combination

最慢，每10 a变化5 h。萨别塔港的10 a变化水平最接近于平均水平。

此外，各港口到白令海峡的航行时长变化幅度与该港口到白令海峡这一航段的冰况变化密切相关，港口到白令海峡的经度差与其通航时长变化幅度呈现出了明显的相关关系。将各北冰洋沿岸港口同白令海峡的经度差作为横轴，2030年、2070年港口到白令海峡通航时长之差作为纵轴，绘制港口航行时长下降幅度与港口—白令海峡经度差关系图（图5），并选择用一次线性趋势线拟合。从图5中可以发现，不同港口到白令海峡途径海域冰情的变化是不同的，越远离白令海峡的港口途径海域冰况变化越大，相同研究时段内通航时长缩减的越多：出发港口到白令海峡的经度差每增加1°，航线的航行时长对应下降0.4 h。总体一次趋势拟合线的 R^2 为0.9619，接近于1，说明拟合程度优良，该规律适用于各种情况下的通航路线。

3.3 2030—2070年东北航道可通航里程变化趋势

将海冰密集度15%以上的地区划为海冰冰区^[25]，当海冰密集度 $\leq 15\%$ 时，船只通过该区域不需要破冰措施协助通行。本文将一段航线中海冰密集度 $\leq 15\%$ 的航段里程总和称为可通航里程。按照这一规则，将从各北冰洋港口出发的航线中海冰密集度 $\leq 15\%$ 的里程数提取出来，得到不同船型—情景组合下2030—2070年东北航道可通航里程数变化趋势（图6）。

首先，RCP 8.5情景（图6b、6d）的变化程度要更剧烈，各港口出发的航线可通航

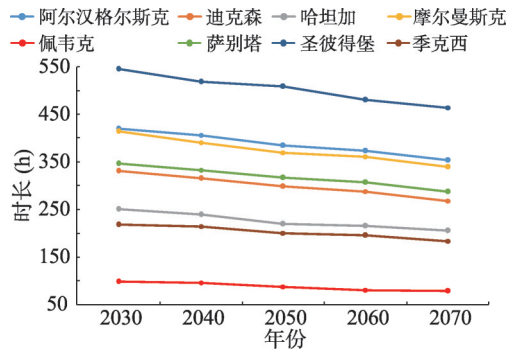


图4 东北航道沿线港口到白令海峡时长总体变化
Fig. 4 General changes of the time between ports along the Northeast Passage and Bering Strait

里程上升趋势都较为明显。RCP 4.5 情景下的变化则相对比较平稳, 趋势的波动性较弱。其次, 在 RCP 4.5 情景中, 从东部港口(哈坦加、季克西和佩韦克港)出发的航线可通航里程相互差距不明显, 萨别塔和迪克森的可通航里程数和这3个港口也从2050年开始才逐渐拉开差距。而RCP 8.5情景下, 东部港口的可通航里程在2060年产生了差距, 萨别塔和迪克森两港对于它们的差距从2030年开始就已经拉大。总体而言, 从2050年起, 萨别塔和迪克森两港的通航能力将显著提升, 有利于港口的建设和发展。西部港口(圣彼得堡、阿尔汉格尔斯克和摩尔曼斯克港)通航里程远超出其他港口且稳步上升。此外, 在RCP 8.5情景下, 阿尔汉格尔斯克和摩尔曼斯克港相对于圣彼得堡港的可通航里程差距逐年减小, 到2070年仅差约1000 km, 而RCP 4.5情景下OW通航里程的差距甚至逐年扩大(图6a)。

综合各船型—情景组合, 各港口可通航里程总体变化如图7所示。对各航线而言, 可通航的里程从2050年开始快速上升, 平均从2030年的962 km上升到2070年的1626 km, 每隔10 a变化166 km。圣彼得堡港的变化模式和平均变化模式最为相近(每10 a变化172 km)。摩尔曼斯克的变化最明显, 每10 a可通航里程增加232 km。东部3个港口的可通航里程50年内变化相对不大, 每年可通航里程变化最少的是佩韦克港, 10 a仅增加76 km, 说明越远离白令海峡的海区, 海冰融化受干扰的因素越少, 融化速率更加稳定。

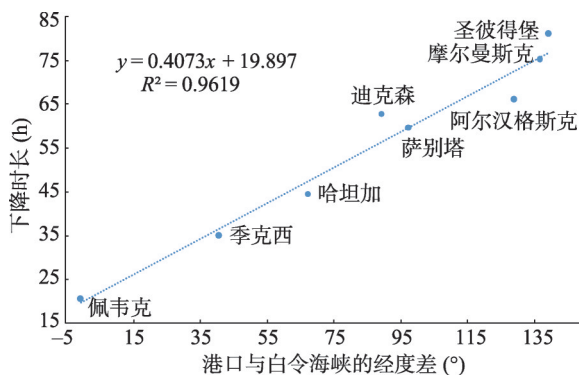


图5 港口总体航行时长下降与到白令海峡经度差关系

Fig. 5 General relationship between the decline of port navigation time and longitude difference to the Bering Strait

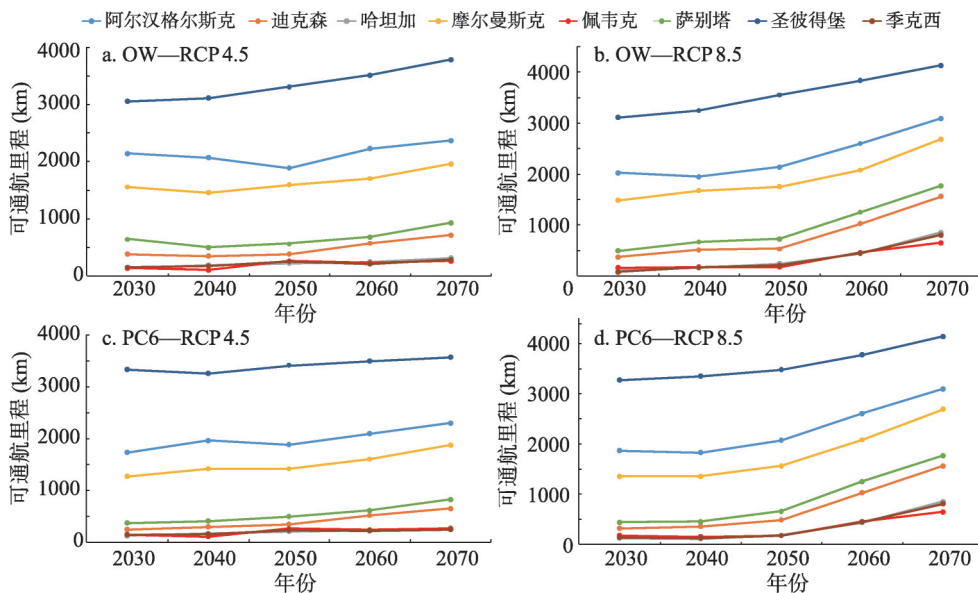


图6 不同船型—情景组合下可通航里程变化

Fig. 6 Changes in navigable mileage under different ship class-RCPs combination

3.4 2030—2070年东北航道的通航成本变化

根据2.2.4的方法计算俄罗斯北冰洋沿岸8个港口到白令海峡的通航成本,不同的船型—情景组合的成本变化趋势如图8所示。可知,圣彼得堡港的运输成本最高,佩韦克港的运输成本最低;阿尔汉格尔斯克和摩尔曼斯克港、萨别塔港和迪克森港、哈坦加港和季克西港两两运输成本十分相近,并且在50 a间成本变化走向相同。从船型—情景组合来看,OW的运费普遍比PC6的运费高出20万美元左右。分船型对不同排放情景下的运费展开讨论,对于PC6而言(图8c、8d),RCP 8.5情景下的运费要比RCP 4.5低1万美元左右。OW(图8a、8b)的费用变化要相对明显,且RCP 8.5情景下运费的下降趋势最为显著。由于OW的船速不如PC6快,燃料费上涨的幅度不明显,航行时间减少导致的运输成本下降幅度更大,在RCP 8.5情景下尤其得到体现。因此,在平稳的航行速度下,结合OW运输货物量大的特性,可以认为OW在未来海冰消融情景下的北极航道运输中具有较大潜力。

综合不同的船型情景组合,得到各港口总体通航成本变化趋势(图9)。圣彼得堡港费用在8个北冰洋沿岸港口中最高,且远高于其他港口的费用,2070年运费为170万美元;从佩韦克港出发的航线为运费最少,且远小于其他港口,2070年运费为44万美元。圣彼得堡港和佩韦克港的运费和其他港口的运费差距很大,与运费第二高(低)的港口间运费差距分别可以达到30万美元以上。8个港口平均通航成本每10 a下降1万美元,摩尔曼斯克的运费变化最为明显,接近1.5万美元/10 a,其次是阿尔汉格尔斯克和圣彼得堡。这3个西部港口通航成本普遍较高,然而下降程度也比较明显。东部港口的成本下降幅度比较小,均不超过1万美元。萨别塔港的成本下降幅度最接近于平均水平。

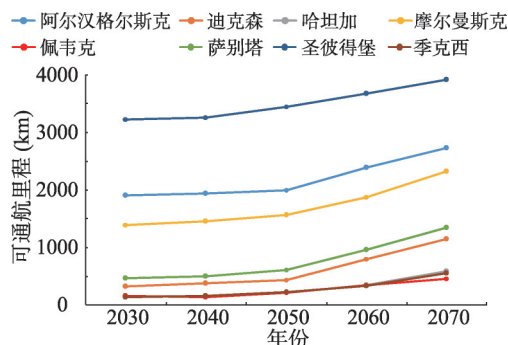


图7 东北航道可通航里程总体变化

Fig. 7 General changes in navigable mileage

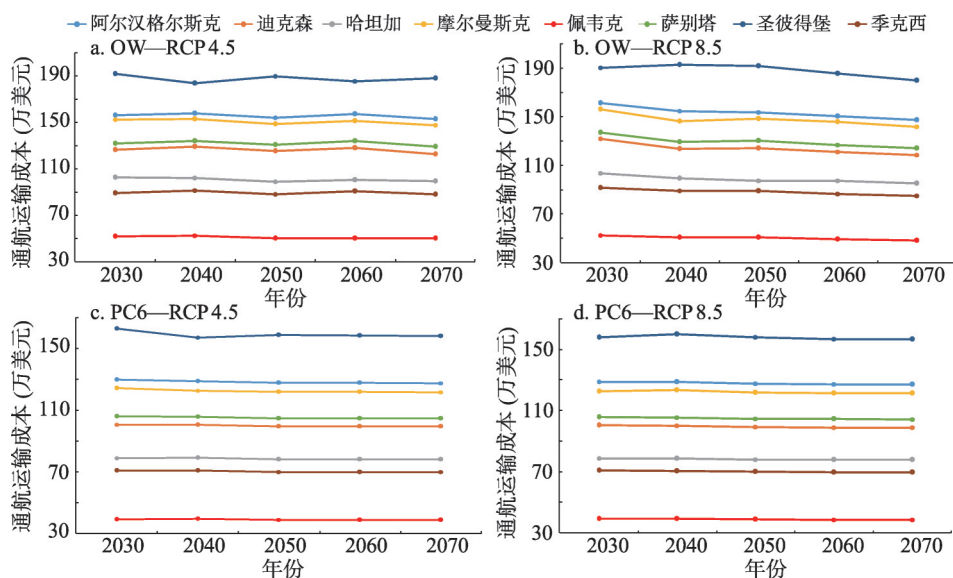


图8 不同船型—情景组合下各航线的通航成本变化

Fig. 8 Changes in navigation costs of each route under different ship class-RCPs combination

将各气候模式、各船型、各排放情景下从各港口出发的航线数据平均化, 得到气候变化情景下2030—2070年东北航道重要港口总体通行性能量化指标(表3)。

4 分析与讨论

通过研究2030—2070年北冰洋沿岸港口到白令海峡的航线变化结果, 可以得出以下结论: ① 横向对比RCP 4.5和RCP 8.5情景下的通航结果, 在相同时段下前者的通航路径比后者要复杂, 而高浓度的

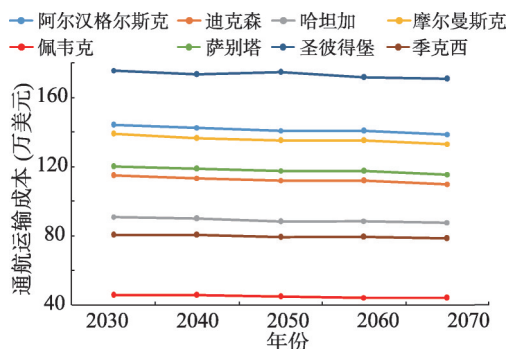


图9 东北航道沿线港口到白令海峡通航成本总变化
Fig. 9 General changes of the navigation cost between ports along the Northeast Passage and Bering Strait

表3 2030—2070年东北航道重要港口通行性能量化指标

Tab. 3 Quantitative index of Northeast Passage performance in 2030-2070

通航性能指标	2030年	2040年	2050年	2060年	2070年	10 a变化
航行时间(h)	327.01	313.23	297.19	286.59	271.51	13.88
航行天数(d)	13.63	13.05	12.38	11.94	11.31	0.58
可通航里程(km)	961.84	991.59	1083.56	1336.05	1626.47	166.16
通航成本(万美元)	113.61	112.24	111.31	110.81	109.46	1.04

排放增加了海冰消融, 使得通航路径朝耗时最短的方向统一; ② 纵向对比年代变化, 随着时间推移航道逐渐趋向统一, 且OW能够走通的航线增多, 呈现“泛蓝化”现象, 最终接近于PC6的通航结果。RCP 8.5情景下2070年实现了所有船型全部以最短路径通航(全部蓝色)。在此基础上, 得到了50 a内北冰洋沿岸港口到白令海峡之间运输时长的变化情况, 研究发现: ① 所有港口的运输时长整体上均呈下降趋势, 在PC6—RCP 8.5情景下(海冰冰况最佳), 从圣彼得堡港出发的航线下落的时长最多, 可达3.4 d; ② 港口的通航时长平均每10 a下降14 h; ③ 港口与白令海峡之间的经度差每增加1°, 对应的航行时间下降0.4 h。另外, 各港口2030—2070年的可通航里程数均呈现上升态势, 排放情景对可通航里程的上升幅度影响作用明显。结合西部和中部港口的资源优势 and 港口建设优势, 认为在海冰稳定减少的情况下, 从西部和中部港口出发的航线能够提供更多的货源, 借助破冰措施航行的航段大量减少, 成本相对降低, 有利于北极航运的效率提高。关于港口到白令海峡各航线2030—2070年的通航成本, OW的运费普遍比PC6高20万美元, 但由于航行速度稳定、货物运载量大, OW航线在运费降低方面具有更大的潜力, 在高排放情景下该优势更加明显。除东部港口以外, 其余港口的航运成本下降均比较明显。

根据上述研究结果, 分析不同港口的通航性能差异。萨别塔港以西的港口到达白令海峡的时长变化可能主要取决于海冰消融情况, 从图2中可以看出, 从这些港口开始航行的船只在必经的高纬度海区冰况变化较大, 航行安全指数也发生了相应的变化, 导致速度迅速增加, 通航时长下降幅度较大。而萨别塔港以东的港口情况比较复杂。本文研究时间为每年的融冰期半年, 相对应的气温上升、径流量变大, 对白令海峡海区的气候调节与径流汇入产生较大影响^[26]。有研究认为, 在汇入北冰洋的淡水构成中, 河水组分逐年上升(在西伯利亚地区主要来源为阿纳德尔河), 和增加的太平洋入流一起共同影响北冰洋的海冰变化^[27]。其中, 来自阿纳德尔海峡的低温高盐水在夏季不断向北输送, 使

该海域海冰融化更加容易^[28-29]。而且通过白令海峡水道的热通量增加将造成海冰减少,海冰减少反过来会促进热通量的增加^[30]。白令海峡周围不稳定的气候环境对近白令海峡的航段通行时长的影响机制是复杂的,而随着距离的增加,远离白令海峡的航段冰况受不确定性因素的影响减少,单纯受水文汇入与排放浓度增加的升温影响,海冰融化趋势显著。因此,在不同水文气候条件影响下,北冰洋东西部海域的海冰消融情况不均一,在不同的地理位置海冰消融情况对航行时长缩短的作用大小不一致。这可以作为对航行时长下降幅度与港口地理位置之间呈线性关系的合理解释。

从“冰上丝绸之路”的角度考虑,俄罗斯港口中可作为欧亚连接中转港的有萨别塔、摩尔曼斯克以及符拉迪沃斯托克(海参崴)。萨别塔港所在的亚马尔地区是中俄合作的战略点,以西西伯利亚平原的油气作为主要的资源供给,具有良好的资源和战略区位条件。摩尔曼斯克港气候条件较好,是东欧重要的交通、资源与贸易枢纽,中国货物可经由此港将贸易扩散至欧洲地区。符拉迪沃斯托克(海参崴)港资源连接度较好,如果中俄自由贸易区建成,其贸易影响将辐射到东北亚国家^[31]。结合本文关于各港口通航性能的研究结果,从萨别塔港出发的航段通航能力在未来有明显提升,通航成本在所有研究港口中较为合适,综合其资源战略优势,可将萨别塔港作为未来中俄贸易合作的重点港口。

本文有以下几点不足需要进一步完善:首先,本文对海冰数据进行了大量的均值化处理,简化了研究数据的复杂性,但同时出现了平均数据差异性的问题。气候模式数据本身的准确程度也决定了研究结果的准确性。其次,对于没有可通航路线的最短路径结果,本文尝试过几种补充缺失值的方法,最终考虑到数值体现实际情况的准确程度,放弃了缺失值的填充,导致在海冰消融不显著的排放情景和船型情况下通航性能随年代的变化不甚明显。

本文采用CMIP5计划中6种不同国家机构建立的气候模式对北冰洋海域2030—2070年的海冰情况进行分析,在数据的基础上刻画北冰洋港口到白令海峡的航线变化,分别从最优通航路线、通航时间、可通航里程和通航成本4个方面分析东北航道未来的通航性能演变态势,为欧亚国家进行北极海上贸易运输提供了数据和理论支持。

参考文献(References)

- [1] Wang Dan, Zhang Hao. Impact of the Arctic Passage's opening on Chinese northern ports and China's response. *China Soft Science*, 2014(3): 16-31. [王丹, 张浩. 北极通航对中国北方港口的影响及其应对策略研究. *中国软科学*, 2014(3): 16-31.]
- [2] Li Xinqing, Cheng Xiao, Hui Fengming, et al. Analysis of sea ice conditions in the Arctic Northeast Passage in summer 2014. *Chinese Journal of Polar Research*, 2016, 28(1): 87-94. [李新情, 程晓, 惠凤鸣, 等. 2014年夏季北极东北航道冰情分析. *极地研究*, 2016, 28(1): 87-94.]
- [3] Lei R, Xie H, Wang J, et al. Changes in sea ice conditions along the Arctic Northeast Passage from 1979 to 2012. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 119: 132-144.
- [4] Smith L C, Stephenson S R. New trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury. *PNAS*, 2013, 110(13). DOI: 10.1073/pnas.1214212110.
- [5] Melia N, Haines K, Hawkins E. Sea ice decline and 21st century trans-Arctic shipping routes. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(18): 9720-9728.
- [6] Melia N, Haines K, Hawkins E, et al. Towards seasonal Arctic shipping route predictions. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(8): 084005. DOI: 10.1088/1748-9326/aa7a60.
- [7] Stephenson S R, Smith L C. Influence of climate model variability on projected Arctic shipping futures. *Earth's Future*, 2015, 3(11): 331-343.
- [8] Wang Manman. Research on sea ice condition of Arctic Passage in 1979-2017 [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018. [王蔓蔓. 1979—2017年北极航道冰情变化研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.]

- [9] Ma Long, Wang Jiayue, Liu Xinghe, et al. Research in navigable windows of the northwest Passage. *Marine Forecasts*, 2018, 35(1): 52-59. [马龙, 王加跃, 刘星河, 等. 北极东北航道通航窗口研究. *海洋预报*, 2018, 35(1): 52-59.]
- [10] Schøyen H, Bråthen S. The northern sea route versus the Suez Canal: Cases from bulk shipping. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(4): 977-983.
- [11] Somanathan S, Flynn P C, Szymanski J. The northwest Passage: A simulation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2009, 43(2): 127-135.
- [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. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2013, 5(2): 210-226.
- [13] Li Zhenfu, You Xue, Wang Wenya, et al. Economic analysis of the container shipping on the Arctic Northeast route. *Journal of Jimei University (Philosophy and Social Sciences)*, 2015, 18(1): 34-40. [李振福, 尤雪, 王文雅, 等. 北极东北航线集装箱运输的经济性分析. *集美大学学报(哲学社会科学版)*, 2015, 18(1): 34-40.]
- [14] Shi Yijiang. Study on transportation port selection and distribution along Northeast Arctic route [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018. [史义江. 北极东北航线沿线中转港选取及布局研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.]
- [15] Zhang Xia, Tu Jingfang, Guo Peiqing, et al. The economic estimate of Arctic sea routes and its strategic significance for the development of Chinese economy. *China Soft Science*, 2009(Suppl.2): 86-93. [张侠, 屠景芳, 郭培清, 等. 北极航线的海运经济潜力评估及其对我国经济发展的战略意义. *中国软科学*, 2009(Suppl.2): 86-93.]
- [16] Hao Zenghui. The economic analysis and sharing rate prediction of the Arctic Passage [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. [郝增辉. 北极航线航行经济性分析与运输分担率预测[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.]
- [17] Gao Chao, Zhang Zhengtao, Chen Shi, et al. The high-resolution simulation of climate change model under RCP4.5 scenarios in the Huaihe River Basin. *Geographical Research*, 2014, 33(3): 467-477. [高超, 张正涛, 陈实, 等. RCP4.5情景下淮河流域气候变化的高分辨率模拟. *地理研究*, 2014, 33(3): 467-477.]
- [18] Wang Lin, Liu Yipeng, Wang Jian, et al. Simulations and estimates of low latitude highland temperature by 5 CMIP5 models. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2015, 37(6): 851-860. [王麟, 刘毅鹏, 汪健, 等. 5个CMIP5模式对低纬高原气温的模拟和预估. *云南大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(6): 851-860.]
- [19] Bin Chanjia, Qiu Yubao, Niu Jingjing, et al. Validation impact analysis of snow water equivalent product using EASE-grids projection over Tibetan Plateau. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(1): 96-100, 106. [宾婵佳, 邱玉宝, 牛静静, 等. EASE-Grid投影对青藏高原雪水当量产品的验证影响分析. *遥感信息*, 2015, 30(1): 96-100, 106.]
- [20] Yue Yang, Gong Jianya. An efficient implementation of shortest path algorithm based on Dijkstra algorithm. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1999, 24(3): 209-212. [乐阳, 龚健雅. Dijkstra最短路径算法的一种高效率实现. *武汉测绘科技大学学报*, 1999, 24(3): 209-212.]
- [21] McCallum J. Safe speed in ice: An analysis of transit speed and ice decision numerals. *Ship Safety Northern (AMNS)*. Ottawa: Transport Canada, 1996.
- [22] You Xue. The study on container shipping economy through Northeast Passage [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. [尤雪. 北极东北航线集装箱运输经济性的仿真研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.]
- [23] Qian Zuoqin, Xu Li, Yan Xinping, et al. Navigation strategy and economic research of the Northeast Passage in the Arctic. *Chinese Journal of Polar Research*, 2015, 27(2): 203-211. [钱作勤, 徐立, 严新平, 等. 北极东北航道通航策略及经济性研究. *极地研究*, 2015, 27(2): 203-211.]
- [24] Wang Yanwu, Zhang Daxun. Analysis and suggestion on the definition of ice class. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2010(4): 54-58. [王燕舞, 张达勋. 冰级定义的有关分析及建议. *船舶与海洋工程*, 2010(4): 54-58.]
- [25] Cavalieri D J, Parkinson C L, Gloersen P, et al. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensor data sets. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C7): 15803-15814.
- [26] Li Pixue. Dominant climate factors influencing the Arctic runoff and association between the runoff and Arctic sea ice [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [李丕学. 北极径流变化的关键气候因子及其对北冰洋海冰变化影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]
- [27] Pan Hong, Chen Min, Tong Jinlu, et al. Spatial and temporal variations of freshwater components at a transect near the Bering Strait during 2003-2012. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(11): 135-146. [潘红, 陈敏, 童金炉, 等. 2003—2012年间白令海峡断面淡水构成的时空变化. *海洋学报*, 2015, 37(11): 135-146.]
- [28] Wang Yingjie, Liu Na, Lin Lina, et al. Characteristics of temperature and salinity distribution around the Bering strait in summer of 2012. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(1): 40-52. [王颖杰, 刘娜, 林丽娜, 等. 2012年夏季白令海峡附近海域温盐分布特征分析. *海洋科学进展*, 2017, 35(1): 40-52.]
- [29] Gao Guoping, Zhao Jinping, Dong Zhaoqian, et al. Distribution and variation of temperature and salinity around the Bering strait. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16(3): 229-239. [高郭平, 赵进平, 董兆乾, 等. 白令海峡海域夏

- 季温、盐分布及变化. 极地研究, 2004, 16(3): 229-239.]
- [30] Li Qiang. The water exchange in Bering strait and its effects on Arctic sea ice [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [李蔷. 白令海峡水交换及其对北极海冰的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [31] Wang Zhimin, Chen Yuanhang. Opportunities and challenges for China and Russia to build "Silk Road on Ice". Northeast Asia Forum, 2018, 27(2): 17-33, 127. [王志民, 陈远航. 中俄打造“冰上丝绸之路”的机遇与挑战. 东北亚论坛, 2018, 27(2): 17-33, 127.]

The evolution of navigation performance of Northeast Passage under the scenario of Arctic sea ice melting

HUANG Jixia^{1,2}, ZHANG Tianyuan³, CAO Yunfeng², GE Quansheng¹, YANG Linsheng¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The global warming has led to the acceleration of the melting of Arctic sea ice, and the opening of the Polar Silk Road has gradually been put on the agenda. In this paper, according to the navigation performance of eight important Russian ports reaching the Bering Strait through the Northeast Passage from 2030 to 2070, the sea ice data of six CMIP5 climate models under two RCPs and two ship types of PC6 icebreaker and OW (merchant ship) ship are adopted. Based on the study of the four factors of optimal route, navigation time, navigable mileage and navigation cost, the main conclusions are as follows: (1) With the change of time, the optimal navigation routes are gradually concentrated and orderly. The navigation capacity of merchant ship has been significantly improved, and by 2070 it will have the same navigation capacity as the PC6 icebreaker has. (2) The navigation time between the Russian ports and the Bering Strait has decreased by 14 h every 10 a, of which St. Petersburg Port has the most significant decline. By 2070, when the longitude difference between the Russian port and the Bering Strait increases by 1°, the navigation time of the port decreases by 0.4 h. (3) In the next 50 a, the navigable mileage of Northeast Passage will increase by 166 km every 10 a, among which the change pattern and average change pattern of navigable mileage in St. Petersburg Port are the most similar. (4) The navigation cost of the route from the Arctic port is reduced by \$10,000 every 10 a, and the decrease of the total navigation cost of merchant ships is the most obvious under high emission concentration. Combined with the change of sea ice, the ports in central and western Russia have great potential for resource transportation. This study quantifies and evaluates the evolution of the navigation performance of the Northeast Passage under the future sea ice melting situation, which provides theoretical and data support for the navigation of the Northeast Passage and the Arctic port trade.

Keywords: global warming; Polar Silk Road; Northeast Passage; navigation performance