基于遥感观测的2010~2017年秋季北极东北航道通航能力时空变化

陈诗怡¹, 曹云锋^{1*}, 惠凤鸣², 程晓²

1. 北京林业大学林学院, 北京 100083;

2. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875

* 联系人, E-mail: yfcao@bjfu.edu.cn

2018-11-06 收稿, 2019-01-29 修回, 2019-02-01 接受, 2019-03-27 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFC1402704)、国家自然科学基金(41701471)、遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201718)和中国科学院先导科技专项(XDA19070502)资助

摘要 北极地区海冰的快速消融使得连接亚洲和欧洲的重要海上通道——北极东北航道的通航潜力不断增加. 准确掌握海冰快速消融背景下东北航道通航能力的变化特征对航道开发具有重要价值. 由于高质量海冰观测数据缺乏, 现有研究多基于模式模拟数据对不同升温情景下航道未来的潜在变化进行分析, 针对北极航道通航能力现状的研究并未有效开展. 本研究利用美国冰雪数据中心发布的逐日海冰密集度数据和经过重建处理、质量得到有效提升的逐日SMOS海冰厚度数据, 基于加拿大北极冰区航行系统(AIRSS)的通航可行性模型(ATAM)对北极地区2010~2017年通航季后期普通商船的航行风险进行了逐日量化制图, 并对东北航道8年间通航能力的时空变化进行了分析. 研究发现, 虽然北极东北航道的通航能力已经显著提升, 普通商船的通航结束期自2010年以来(除去2013年)平均已达第297±4天(10月24日左右), 但过去8年间东北航道上普通商船的通航能力并没有显著增加趋势, 且存在很大不确定性. 北极东北航道通航结束期主要受东西伯利亚海、新西伯利亚群岛附近海域和北地群岛附近海域3个区域冰情的影响较大, 3个海域附近较早冻结的薄冰往往是导致整个航道通航结束的关键. 鉴于北极东北航道通航能力变化的复杂性, 高质量、准实时的海冰观测数据对于航道通航风险的准确量化十分必要.

关键词 北极东北航道, 冰上丝绸之路, 通航能力, 遥感观测, 海冰变化

近年来, 北极地区近地表温度以全球平均水平两倍以上速度不断升高, 被称为“北极放大”效应^[1]. 受此影响, 北极海冰覆盖范围与厚度正在以前所未有的速度不断减少^[2~4]. 观测数据显示, 北极海冰9月覆盖范围减少速率在1979~1998年间为 $(0.032 \pm 0.017) \times 10^6 \text{ km}^2$, 而在1999~2010年间达到 $(0.154 \pm 0.038) \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[5,6], 呈明显加速趋势; 北极海冰冬季平均厚度从1980年的3.64 m下降为2008年的1.89 m, 降幅将近50%. 照此趋势, 北极可能会在可预见的未来出现无冰的夏季^[7].

海冰覆盖范围与厚度的锐减使得北极航道的通航潜力不断增加. 目前北极地区连接大西洋和太平洋的航线主要有3条^[8]: 中央航道、西北航道、东北航道(图1). 中央航道是指穿越北极点附近的北冰洋公海水域的航线. 由于北冰洋中心区域常年有坚硬的多年冰覆盖, 破冰能力较低的船舶难以通过中央航道. 西北航道大部分航段位于加拿大北极群岛水域, 以白令海峡为起点, 沿美国阿拉斯加北部海岸, 穿过加拿大北极群岛. 多年冰、冰丘及众多岛屿的复杂分布使船舶在西

引用格式: 陈诗怡, 曹云锋, 惠凤鸣, 等. 基于遥感观测的2010~2017年秋季北极东北航道通航能力时空变化. 科学通报, 2019, 64: 1515–1525

Chen S Y, Cao Y F, Hui F M, et al. Observed spatial-temporal changes in the autumn navigability of the Arctic Northeast Route from 2010 to 2017 (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 1515–1525, doi: 10.1360/N972018-01083

图1 北极地区3条主要航道。虚线为北极东北航道，浅灰色线为西北航道，黑色线为北极中央航道

Figure 1 The three major routes in the Arctic. The dashed line is the Northern Sea Route (NSR), the light-gray line is the Northwest Passage (NWP), and the dark-gray line shows the Arctic Central Route (ACR) across the North Pole

北航道航行困难，通航期较短^[8]。东北航道沿着挪威和俄罗斯海岸，途经巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海和白令海峡。东北航道由于其夏天海冰融化更快、海冰覆盖更低，且拥有更为完善的航行基础设施，如沿途历史悠久的港口和俄罗斯提供的破冰船队^[8]，相比于其他两条航道更易于航行，目前的使用率也相对更高。

东北航道是我国“冰上丝绸之路”的重要海上通道，其开发具有巨大的潜在经济价值。相比传统的苏伊士运河航线，船舶经由东北航道不仅可以缩短中欧经贸往来的航行距离，节约航运时间和费用，减少船舶二氧化碳等的排放量，并且可以避免航经马六甲海峡、苏伊士运河和索马里海域等高危险区域所带来的潜在经济和政治风险^[8]。在能源开发方面，北极地区有丰富的石油、天然气和矿产等资源，北极航线的开通使得这些资源有望得到开发，我国可以通过北极东北航道进口天然气、原油等，促进我国能源供给渠道的多样化。

随着东北航道的通航潜力不断增加，需要准确掌握海冰快速消融背景下北极东北航道通航能力的变化特征。海冰冰情和船舶破冰能力是影响北极航道通航能力的两个关键因素^[9,10]，相关研究也多基于特定海域

的冰情与不同等级破冰船的破冰能力进行量化后开展。但长期以来，由于部分海冰参量(如海冰厚度、粗糙度等)的大面积观测与反演困难，使得基于观测数据的北极航道通航能力量化研究无法有效地开展。船舶在某一海域的通行能力判定往往仅基于海冰密集度参量，简单设定阈值进行度量^[11]，海冰厚度等参量的缺失使得该方法的研究结果存在很大的不确定性，且无法判断冰情的复杂特定海域的通航情况。模式模拟的数据能够较好地弥补海冰参量的缺失问题，一些学者使用模式模拟的海冰参量对北极航道的通航能力进行了分析^[8-10]。但大量研究表明当前模式模拟的海冰数据仍存在一定的质量问题，对诸如海冰的年际变化、多年变化趋势等均存在不同程度的模拟偏差^[4,9,12]，无法真实有效地反映北极航道通航能力的变化情况。

基于2010~2017年北极地区逐日遥感观测的海冰密集度与海冰厚度数据，利用加拿大北极冰区航行系统(Arctic ice regime shipping system, AIRSS)所提供通航可行性模型(Arctic transport accessibility model, ATAM)对北极地区逐日通航风险进行了量化评估，并在此基础上对北极东北航道普通商船8年间通航能力的时空变化特征进行了分析。

1 研究数据与方法

1.1 研究区域与数据

目标区域为北极东北航道沿途附近海域(图1)，包括楚科奇海、东西伯利亚海、拉普捷夫海、喀拉海以及北冰洋部分海域等。重点关注东北航道沿途的3个重要海峡：德朗海峡、桑尼科夫海峡和维利基茨基海峡附近海域及整个东北航道普通商船通航能力的时空变化。

海冰密集度产品为美国冰雪中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)发布的逐日海冰密集度数据^[13]。该数据集基于系列微波遥感传感器(SMMR, SSM/I, SSMIS)提供的亮度温度数据，利用NASA Team算法反演生成，空间分辨率为25 km，时间分辨率为逐日，时间覆盖范围为1978年10月至今，NASA Team算法计算海冰密集度时，先分别反演一年冰、多年冰的海冰密集度，随后求和得到总的密集度^[14]。该数据集已被广泛应用于长时间序列的海冰变化研究^[1,15-17]，且取得了很好的研究成果。SMOS (soil moisture and ocean salinity)被动微波逐日海冰厚度数据由德国汉堡大学发

布^[18], 该数据空间覆盖范围为50°~90°N, 空间分辨率为12.5 km. 受SMOS传感器所采用的1.4 GHz频率的L波段微波穿透能力所限, 其厚冰(厚度大于1 m)区域数据的不确定性较高, 但其亮温数据对海冰厚度小于0.5 m的海冰很敏感, 因此对薄冰的探测准确性很高^[19,20]. 相关的量化评价研究也表明, SMOS海冰厚度数据在薄冰区域的偏差相对较小^[21]. SMOS数据覆盖时间为每年10月到次年4月的海冰冻结季^[18], 而4月份北极东北航道尚未进入通航季节, 本研究仅使用每年第288天(闰年为第289天, 每年10月15日)至年终的部分SMOS海冰厚度数据对通航结束季北极东北航道的通航能力变化进行研究(表1).

1.2 SMOS海冰厚度数据重建

原始SMOS海冰厚度数据存在一些异常值, 为了改进SMOS数据质量, 提升后续通航风险量化结果的可靠性, 对原始SMOS海冰厚度数据进行了时间序列重建处理, 具体重建过程如下:

首先, 对原始海冰厚度时序进行异常值的判别与剔除. 采用的方法为假设实验数据的总体服从正态分布, 测定值中与平均值的偏差超过两倍标准差的测定值就标定为异常值, 其显著性水平满足 $\alpha < 0.05$. 基于以上原理, 利用滑动窗口对海冰厚度时间序列数据进行检验, 当该窗口中心值与窗口内各时序均值之差大于窗口内的各时序值标准差的两倍时, 判定该像元为异常值^[22]. 滑动窗口过小, 窗口内样本的统计量(均值与标准差)不具有显著代表性, 无法正确检验出异常值, 因此选用时序4邻域(连续9 d)作为异常值检测滑动窗口.

然后, 利用S-G滤波算法对异常值剔除后的海冰厚度时序数据进行滤波处理. S-G滤波算法是一种利用最小二乘卷积拟合方法来平滑和计算一组相邻值的函数. 在平滑的过程中, 边缘点不参与拟合, 参与拟合的点只是较为集中的大多数点, 以便于剔除过于偏离的值^[23]. 算法中两个参数控制滤波的效果: 一个是滤波窗口的大小, 二是平滑多项式的次数, 较大的窗口大小和较低的次数可以得到更平滑的结果^[24].

1.3 通航能力评价方法

1.3.1 通航风险量化

为了定量分析2010~2017年的北极东北航道通航能力时空变化, 本文使用北极通航可行性模型对通航

表1 SMOS海冰厚度数据2010~2017年秋冬季时间覆盖

Table 1 Time coverage of SMOS ice thickness data in autumn and winter season during 2010~2017

年份	SMOS秋冬季数据	年份	SMOS秋冬季数据
2010	第288~360天	2014	第288~365天
2011	第288~365天	2015	第288~365天
2012	第289~366天	2016	第272~366天
2013	第288~365天	2017	第274~365天

风险进行量化. ATAM模型设定影响船舶在冰区航行风险的主要因子是海冰冰情和船舶的破冰能力, 该模型已被引入加拿大北极冰区航行系统^[25], 并被成功应用于多项关于北极通航能力变化的研究之中^[9,26,27].

ATAM模型利用一个由海冰类型和船舶类型确定的海冰乘数(ice multipliers, IM)查找表, 通过海冰密集度数据来加权计算某复杂冰情区域内特定船舶的通航指数(ice numeral, IN), 以量化该类型船舶在此区域的通航能力^[28]. IM值为一个非0整数, 其数值大小表征航行风险等级, IM负值表示通航风险较高, 不适合该类型船舶航行, 正值则表示可以通航, 且数值越高表示航行风险越低.

由于SMOS海冰厚度产品在海冰较厚(>1 m)时存在很大的不确定性, 但针对薄冰(<0.5 m)的反演精度较高^[19,20], 而PC(polar class)6级破冰船的破冰厚度已达到1.2 m, 将仅针对普通商船(AIRSS系统中的E型船舶)在北极东北航道的通航能力时空变化进行量化研究, 以下为基于ATAM模型的普通商船通航指数量化算法介绍.

针对普通商船, 其不同厚度的纯海冰覆盖区域IM值(IM_{OW,T})查找表的定义为^[9]

$$\text{IM}_{\text{OW},T} = \begin{cases} 2, & T = 0 \text{ m}, \\ 1, & 0 \text{ m} < T < 0.15 \text{ m}, \\ -1, & 0.15 \text{ m} \leq T < 0.70 \text{ m}, \\ -2, & 0.70 \leq T < 1.20 \text{ m}, \\ -3, & 1.20 \text{ m} \leq T < 1.51 \text{ m}, \\ -4, & 1.51 \text{ m} \leq T. \end{cases} \quad (1)$$

根据以上IM值的定义, 普通商船可安全航行的最大海冰厚度为0.15 m, 超过此厚度, 普通商船的航行风险将随着海冰厚度的增加逐渐升高, 相应IM值则逐渐降低.

基于IM值与海冰密集度数据的通航指数IN值计算过程如下:

$$IN_{OW} = \sum C_T \times IM_{OW,T} \quad (2)$$

其中 C_T 是指某区域内 T 类型(厚度)海冰的密集度, $IM_{OW,T}$ 是指普通商船在 T 类型海冰覆盖区域航行的 IM 值. 由于10%的海冰密集度阈值是冰与开放水域的区分阈值, 用来定义海冰的边缘线^[29], 海冰密集度小于10%的区域将被视为开放水域, IN 值直接设定为2, 船舶在该区域航行风险极低.

1.3.2 关键海峡通航能力与关键日期判定

重点关注了东北航道沿途3个重要海峡(德朗海峡、桑尼科夫海峡和维利基茨基海峡)通航能力的变化特征. 关键海峡通航指数 IN 值的计算, 通过计算海峡覆盖区域内的平均 IN 值得到. 但对于关键通航日期的判定, 直接利用海峡覆盖范围内的平均 IN 值是否大于0来判定显然不尽合理. 因此, 在海峡通航结束日期判定时, 评估某海峡是否可以通航的依据为: 海峡覆盖范围内是否存在一条可完整穿行的通路, 如果存在, 就判定为该海峡可通航, 否则即便该海峡平均 IN 值大于0, 仍判定为不可通航. 海峡的通航结束日期判定: 自当年存在有效观测(第288天, 闰年为第289天)开始, 连续3天都不能通航的第一天为该年该海峡的通航结束日期.

1.3.3 东北航道的通航能力与关键日期判定

针对东北航道的整体通航能力, 利用逐日北极地区通航指数图搜索从航道起点白令海峡至终点喀拉海峡的安全通航路径. 选择这一段航线是因为这段航线的冰情较为复杂, 是影响船舶航行安全的重要航段, 喀拉海峡西侧多为全年通航. 利用Dijkstra最短路径分析算法分析普通商船在北极东北航道上安全航行的最短路径^[30], 若当天的通航指数图上存在一条按上述最短航线生成算法得到的航线, 则表示东北航道该天可以通行, 否则, 表示航道上至少有一段航线不能通航, 整条航道该天不能通航. 东北航道的最晚通航期定义为: 自当年存在有效观测(第288天, 闰年为第289天)开始, 连续3天都不存在可通航路径的第一天为当年东北航道的通航结束日期.

2 结果与分析

2.1 SMOS海冰厚度数据重建结果

利用2.2中所介绍SMOS海冰厚度数据重建方法对原始SMOS时序数据进行异常值检测与S-G平滑的结果如图2所示. 分析图2中的结果可以发现, 通过时序数

据重建处理, 不但能有效识别和剔除原始SMOS海冰厚度数据中存在的异常值, 而且通过S-G滤波处理可对原始海冰厚度数据进行适度平滑, 有效提升了海冰厚度数据的质量, 为后续船舶通航能力的量化与变化分析提供了有效的数据保障.

2.2 北极地区普通商船通航风险制图

利用1.3.1中所述通航风险量化方法, 将重建后的SMOS逐日海冰厚度数据与NSIDC发布的逐日海冰密集度数据输入式(1)与(2), 可对普通商船2010~2017年每年秋冬季在北极地区的航行风险进行逐日制图, 并搜索从白令海峡至喀拉海峡的最短通航路径. 图3为2010~2017年每年观测起始日期北极地区通航指数空间分布图及其最短通航路径.

分析图3中各年份观测起始日(10月15日)北极地区通航指数空间分布图的变化特征, 从2010~2012年, 随着海冰密集度的持续减少和海冰厚度的不断变薄, 海冰覆盖区域的通航指数持续增大, 航行风险不断减小, 普通商船的最短航行路径(图3中黄色线)也不断向北极中心区域靠近. 2012年10月15日的北极东北航道通航情况是8年中最好的, 普通商船的航行路径可以不通过德朗海峡和桑尼科夫海峡, 而是沿着远离俄罗斯海岸、靠近中央航线的海域航行. 但到了2013年, 由于北极海冰的大幅恢复, 北极地区的航行风险突然剧烈增大, 10月15日普通商船已无法安全通航. 随后, 北极地区通航指数再次进入缓慢增大过程, 至2016年甚至出现了 IN 值等于2的航路(图3中绿色线), 表明北极东北航道在2016年截至10月15日仍存在海冰密集度小于10%(开放水域覆盖)的安全航道.

2.3 东北航道关键海峡通航能力变化分析

进一步分析了北极东北航道沿途3个重要海峡: 德

图2 (网络版彩色)SMOS时序数据重建结果
Figure 2 (Color online) The result of SMOS time-series reconstruction

图3 2010~2017年东北航道起始观测日(10月15日)普通商船通航指数空间分布及最短航行路径

Figure 3 Spatial pattern of IN and the shortest route across the Arctic Northeast Route for open water vessel in October 15th from 2010 to 2017

朗海峡、桑尼科夫海峡和维利基茨基海峡2010~2017年间通航能力的时空变化。其中, 德朗海峡位于俄罗斯东北部的弗兰格尔岛和西伯利亚大陆之间, 是东西伯利亚海和楚科奇海之间唯一的海峡, 北极东北航道的必经之路^[31]; 桑尼科夫海峡连接拉普捷夫海和东西伯利亚海, 受离岸风影响较为严重, 因此船舶自西向东航行时较为容易, 但相反方向航行则会变得困难; 维利基茨基海峡位于俄罗斯泰梅尔半岛北端同北地群岛中的布尔什维克岛之间, 连接喀拉海与拉普捷夫海, 长约104 km, 最狭处55 km, 深32~210 m, 全年覆盖浮冰, 夏季多浓雾, 属东北航道上的艰险航段^[32]。

2.3.1 关键海峡通航指数逐日变化

为了对3个海峡的通航能力进行深入分析, 计算各海峡覆盖区域平均IN值, 得到普通商船2010~2017年秋冬季在3个海峡的通航指数逐日变化图(图4)。图中横坐标从每年10月15日(儒略日第288天)开始至该年底, 纵坐标为各海峡区域平均通航指数。

综合3个海峡平均通航指数的总体变化过程, 随着秋冬季海冰的逐渐冻结, 厚度的不断增加, 各海峡的通航指数均逐渐由正转负, 且不断减小, 表征船舶在该区

域的航行风险逐渐增大。

德朗海峡的通航指数小于0(通航风险高)出现的时间明显晚于其他两个海峡, 通航期相对较长。但该海峡通航指数的年际间变化较大, 且与北极整体的海冰情变化不一致。2012年北极海冰覆盖出现极低记录, 但德朗海峡通航指数较其他年份却较早的由正转负, 结束通航。甚至海冰大幅度恢复的2013年, 其通航结束时间都晚于2012年。

相比其他两个海峡, 桑尼科夫海峡的通航指数较早由正转负, 且下降速度最快, 年际波动也最小。桑尼科夫海峡冬季通航指数整体出现接近-4的低值, 为3个海峡中最低, 表明其海冰冬季冻结厚度相较于其他两海峡较大。但该海峡通航指数年际间变化较小, 历年间通航指数的曲线重合度较高。

维利基茨基海峡通航指数的年际间变化很大, 2013年通航指数从10月中旬有观测数据开始就已经为负, 普通商船无法通航。而2012和2016年海冰冰情较好, 这两年通航指数从10月中旬开始仍存在近10 d的开放水域(IN=2)。由于该区域内海冰的年际间波动剧烈、冰情复杂, 其对整个航道的通航情况影响较大^[11]。同时其并不像另外两个海峡, 表现出随着时间的推移通航指

图4 2010~2017年普通商船在3个关键海峡通航指数的逐日变化。(a) 德朗海峡; (b) 桑尼科夫海峡; (c) 维基茨基海峡

Figure 4 The daily variation of the mean INs for open water vessel over the three critical straits. (a) The Long Strait; (b) the Sannikov Strait; (c) the Vilkitsky Strait

数持续下降的显著特征, 也表明该海域通航情况的复杂性。因此, 该海峡的通航能力评估需要参考实时的海冰冰情数据才能获得较准确的结论。

2.3.2 关键海峡通航结束日期年际间变化

利用1.3.3部分所介绍关键海峡通航结束日期的判定方法, 对2010~2017年普通商船分别在3个海峡的通航结束日期进行了提取(图5), 并对其年际变化进行了分析。

分析图5中各海峡通航结束期变化, 德朗海峡由于受与北太平洋相连的楚科奇海暖水影响, 海冰冻结过程较慢, 因而其通航期结束期相较于其他两个海峡较晚, 8年平均通航结束日期为第 326 ± 13 天。2012年北极海冰覆盖出现极低记录, 德朗海峡却较早结束通航。分析海冰冰情资料发现, 2012年第312天德朗海峡海域便开始出现了厚度为0.2~0.3 m, 海冰密集度大于60%的海冰覆盖, 而普通商船的破冰能力仅为0.15 m, 2010~2011年同期德朗海峡的海冰密集度却几乎为0。2013年,

图5 2010~2017普通商船在3个关键海峡通航结束日期年际变化
Figure 5 Inter-annual variation of the end of shipping season for open water vessel over the key straits from 2010 to 2017

随着北极海冰的大幅度恢复, 德朗海峡通航结束日期提前到第308天, 为8年中通航结束日期最早。2014年虽然北极整体海冰覆盖度较高, 但东北航道沿线的东西伯利亚海至拉普捷夫海一带海冰覆盖较2013年显著减少, 海冰冰情较好, 通航结束日期为8年中最晚, 推迟到第349天。总体而言, 德朗海峡通航结束日期与通航指数的变化特征相似, 其年际变化很大(8年标准差为12 d, 极端年份相差达41 d), 且与北极海冰冰情的整体变化特征不太一致。

桑尼科夫海峡的通航结束日期是3个海峡中相对较早, 也是年际波动最稳定的, 8年均值为 298 ± 5 d, 为3个海峡中通航结束期出现最早的。2010~2012年间, 随着海冰的持续减少, 该海峡通航结束日期呈上升趋势, 即通航结束日期不断推迟。2013年海冰大幅恢复, 通航结束日期也提前至第294天。随后, 通航结束日期在震荡中呈微弱上升趋势。

维利基茨基海峡受不同区域冰块的漂流与堆积影响较大, 冰情变化很快, 相对复杂。观察图5中折线变化, 其各年间通航结束日期变化很不稳定: 2012年晚于其他两个海峡, 2013和2014年又早于其他两个海峡。2013年, 北极海冰大幅恢复, 10月中旬该海域已出现厚度在0.15 m以上, 密集度大于50%的海冰, 导致现有数据无法探测到普通商船在该海峡的通航结束日期。此后的2014~2016年, 随着海冰覆盖的持续萎缩, 维利基茨基海峡的通航结束日期也不断推迟, 至2017年, 又出现了一定幅度的提前。整体而言, 除去2013年, 维利基茨基海峡通航结束日期7年平均为第 305 ± 8 天, 其通航结束日期与北极海冰总体变化特征相似。

北极的海冰遥感观测数据显示, 2010~2012年9月份北极海冰覆盖范围不断下降, 到2012年达到历史最

低记录, 2013~2014年北极海冰覆盖范围大幅上升, 之后又逐渐下降。从图5可知, 2013年3个海峡普通商船的通航结束日期均早于其他年份, 维利基茨基海峡通航结束日期甚至早于SMOS数据观测初始日期, 与北极海冰总体变化特征一致, 但2012年的德朗海峡、2014年的德朗海峡与桑尼科夫海峡都与北极海冰覆盖的整体变化趋势存在差异。以上结果凸显了北极东北航道通航能力变化的复杂性: 北极地区年度总体的海冰冰情能够一定程度决定当年航道的通航情况, 但不同海峡、海域又各有特点, 东北航道总体通航能力的强弱、通航季节的长短不一定与当年海冰冰情一致。

2.4 普通商船东北航道通航能力时空变化

利用东北航道最短通航路径与通航结束日期的判定方法, 对2010~2017年北极东北航道的通航结束日期进行了提取, 并制作了各年通航结束日期通航指数空间分布图。

图6为普通商船在北极东北航道通航结束日期的年际变化曲线, 除去无法进行有效判定的2013年, 2010~2017年北极东北航道普通商船通航结束期平均为第 297 ± 4 天(10月24日左右), 其年际波动与北极海冰覆盖整体变化特征基本一致: 2010~2012年, 北极海冰覆盖面积持续减少, 并于2012年达到历史极低记录, 普通商船的通航结束日期也同步不断推迟, 于2012年达到8年中最迟的第303天; 2013年北极海冰大幅度恢复, 东北航道通航结束日期也大幅提前, 甚至超过SMOS数据可探测范围(通航结束期早于第288天), 提前幅度超过25 d; 随后, 随着海冰覆盖面积在2014~2016年间的不断减少, 普通商船的通航结束日期也逐渐推迟, 直至2016年推迟到第300天, 2016与2017年是北极海冰覆盖

图6 2010~2017年普通商船在北极东北航道的通航结束日期
Figure 6 Inter-annual variation of the end of shipping season for open water vessel across the Arctic Northeast Route from 2010 to 2017

范围的并列历史第二低,但2017年由于拉普捷夫海附近海域海冰的较早冻结,东北航道通航结束日期提前到了第295天. 总体而言,在2010~2017年的8年间,北极东北航道的普通商船通航结束日期年际间波动较大,但并未表现出显著的推迟或提前趋势,这与同一时间内北极地区海冰覆盖面积^[16]、海冰厚度以及海冰体积^[33]的变化特征比较一致.

为了进一步分析每年通航结束期北极东北航道沿途航行风险的空间分布特征,制作了各年东北航道通航结束日前一天的普通商船通航指数空间分布图及其最短可通航路径(图7),其中2013年由于通航结束日期早于可观测时间,选取了观测初始日(第288天)的通航指数图与其他年份进行比较. 对比分析各年通航指数空间分布图发现,东北航道的通航结束日期在多数年份里受控于东西伯利亚海、新西伯利亚群岛附近海域(包括桑尼科夫海峡)和北地群岛附近海域(包括维利基茨基海峡)的冰情变化.

影响2010与2011两年北极东北航道通航结束期的关键海域比较相似,均为东西伯利亚海西侧和北地群岛东侧附近海域. 2012年通航结束的关键海域与其他

年份都不同,是由于东西伯利亚海东侧靠近德朗海峡附近的海冰冻结,导致通航季结束. 2013年第288天北极东北航道已经不能通航,从图中可以看到是东西伯利亚海西侧和北地群岛东侧海域的海冰冻结,导致该区域通航受阻. 2014年北极东北航道的通航情况比2013年要好很多,特别是在东西伯利亚海和拉普捷夫海仍存在大面积的可通航海域,但是受北地群岛附近较早冻结的薄冰影响,整个航路结束了通航. 2015与2016年虽然通航结束期相差近一周时间,但两年的通航结束都是由新西伯利亚群岛附近海域的海冰冻结所致,由于冻结海冰厚度比较薄(普遍小于0.15 m),其通航风险并不大. 2017年通航结束则主要是由拉普捷夫海与北地群岛东侧海域的海冰冻结所致.

3 讨论

海冰冰情与船舶的破冰能力是影响冰区通航能力的两个关键因素^[9,10],其中尤以海冰厚度参量最为关键. 但长期以来,由于海冰厚度参量的大面积观测与反演困难,基于观测的北极航道通航能力量化研究未得到有效的开展. 仅仅依靠海冰密集度参量,设定简单阈值

图7 2010~2017年通航结束日普通商船通航指数空间分布及东北航道最短航行路径

Figure 7 Spatial pattern of IN and the shortest route across the Arctic Northeast Route for open water vessel in the end of shipping season of every year from 2010 to 2017

进行对特定海域的通航能力进行度量存在很大的不确定性^[11]。气候模式的输出数据具有很好的时空连续性,且能够对未来不同升温情景下北极地区的通航能力进行预测,因此,目前国际上主流的研究工作多基于模式数据开展^[8-10,26-28]。但由于气候模式对诸如海冰的年际变化、长期变化趋势等仍存在不同程度的模拟偏差^[4,9,12],相关研究结果无法真实反映北极航道的通航能力变化。

SMOS海冰厚度数据虽然在厚冰区域的不确定性较高,但其对厚度小于0.5 m的薄冰探测准确性很高。根据ATAM模型,普通商船的破冰能力仅为0.15 m。因此,利用SMOS数据对普通商船的通航能力进行量化研究,能够保证相关量化成果的可靠性。本研究还利用S-G滤波算法对原始SMOS数据进行了时序重建处理,进一步提升了数据质量,为普通商船在冰区的航行风险的量化提供了数据保障。

ATAM通航可行性模型已被引入业务化运行的加拿大北极冰区航行系统^[25],且成功应用于多项针对北极通航能力变化的研究^[8-10,26-28],产生了很多优秀的研究成果。利用ATAM模型进行北极地区通航风险的量化能够综合考虑海冰冰情(包括海冰密集度与厚度参量)与船舶的破冰能力,一定程度上避免简单阈值方法导致的潜在不确定性风险,提高研究结果的可靠性。

虽然受海冰快速消融的影响,北极东北航道的通航潜力有了很大提升,普通商船的通航结束期已经推迟到10月的下旬,但2010~2017的8年间北极东北航道上普通商船的通航能力并没有显著的增加趋势,且存在着很大的不确定性。航道的整体通航能力受到沿线多个海域冰情的综合影响,某一区域海冰的较早冻结都可能导致整个航道通航结束。针对东北航道上3个关键海峡通航能力变化的对比分析,也表明三者的年内在与年际变化均存在显著差异,这也使得北极东北航道整体通航能力的年际间波动较大,变化特征比较复杂。

4 结论

利用NSIDC所提供北极地区逐日海冰密集度遥感观测数据与重建后的逐日SMOS海冰厚度数据,基于ATAM模型对北极地区2010~2017年通航季后期的通航

风险进行了逐日量化评估,并在此基础上对北极东北航道秋季普通商船通航能力8年间的变化特征进行了分析。

首先对北极东北航道沿途3个重要海峡-德朗海峡、桑尼科夫海峡和维利基茨基海峡,2010~2017年间普通商船的通航指数时空变化、通航结束期的年际变化进行了分析。结果表明,3个海峡通航能力的年内、年际变化差异都十分显著,且各海峡对东北航道整体通航能力的影响各不相同:德朗海峡的通航指数的年际间变化较大,且与北极整体的海冰冰情变化不一致,但由于其通航结束期出现时间较晚,对航道的整体通航能力影响较小;桑尼科夫海峡为3个海峡中秋季通航能力下降速度最快、年际波动也最小,同时也是通航结束期出现最早的区域,因而其对东北航道通航能力的长期变化趋势影响最大;维利基茨基海峡的最大特点是通航能力年内、年际间变化都非常大,是3个海峡中唯一通航指数在年内出现大幅度反复和唯一通航结束期在2013年早于观测数据起始日期的,鉴于该海峡冰情与通航能力的高不确定性,其对东北航道短期通航能力的波动影响十分关键,因而实时的海冰冰情数据对该海峡通航能力的准确评估尤为重要。

进一步对东北航道整体通航能力的时空变化进行分析后,发现2010~2017年间东北航道上普通商船的通航能力并没有显著增加趋势,多年平均(除去2013年)的通航结束期为第297±4天(10月24日左右),且其年际波动特征与北极海冰覆盖面积的整体变化比较一致。对比分析不同年份通航结束期通航指数的空间分布图发现,北极东北航道的通航结束期主要受东西伯利亚海、新西伯利亚群岛附近海域(包括桑尼科夫海峡)和北地群岛附近海域(包括维利基茨基海峡)3个区域冰情的影响较大,多数年份都是在其他区域仍可安全通航的情况下3个海域附近出现较早冻结的薄冰,进而导致普通商船在整个东北航道结束通航。

综上,虽然随着过去几十年北极海冰的快速消融,东北航道的整体通航潜力已经大幅提高,但2010年之后的8年间北极东北航道的通航能力的提升趋势却并不显著,且在不同的区域表现出很大的差异性。因而,高质量、准实时的海冰参量观测与反演对于北极东北航道通航能力的准确量化与航行保障十分重要。

参考文献

- 1 Cao Y, Liang S, Chen X, et al. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing arctic amplification and initial sea-ice melting. *Sci Rep*, 2017, 7: 8462

- 2 Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the arctic sea ice cover. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L01703
- 3 Lang A, Yang S, Kaas E. Sea ice thickness and recent arctic warming. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 409–418
- 4 Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L09501
- 5 Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere*, 1979, 6: 881–889
- 6 Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, et al. The arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis. *Clim Change*, 2012, 110: 1005–1027
- 7 Kerr R A. Global warming: Arctic summer sea ice could vanish soon but not suddenly. *Science*, 2009, 323: 1655
- 8 Buixadé Farré A, Stephenson S R, Chen L, et al. Commercial arctic shipping through the northeast passage: Routes, resources, governance, technology, and infrastructure. *Polar Geogr*, 2014, 37: 298–324
- 9 Smith L C, Stephenson S R. New trans-arctic shipping routes navigable by midcentury. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: E1191–E1195
- 10 Stephenson S R, Brigham L W, Smith L C. Marine accessibility along Russia's northern sea route. *Polar Geogr*, 2013, 37: 111–133
- 11 Li X Q, Ci T, Luo S Y, et al. Spatio-temporal variations of sea ice and navigability in the Arctic Vilkitsky strait (in Chinese). *Chin J Polar Res*, 2015, 27: 282–288 [李新情, 慈天宇, 罗斯瀚等. 北极东北航道维基茨基海峡海冰时空变化及适航性分析. 极地研究, 2015, 27: 282–288]
- 12 Flanner M G, Shell K M, Barlage M, et al. Radiative forcing and albedo feedback from the northern hemisphere cryosphere between 1979 and 2008. *Nat Geosci*, 2011, 4: 151–155
- 13 Cavalieri D, Parkinson C, Gloersen P, et al. Sea Ice Concentrations From Nimbus-7 SMMR and DMSP SSMI-SSMIS Passive Microwave Data. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, 1996
- 14 Cavalieri D J, Gloersen P, Campbell W J. Determination of sea ice parameters with the Nimbus 7 SMMR. *J Geophys Res*, 1984, 89: 5355–5369
- 15 Parkinson C L. Spatially mapped reductions in the length of the arctic sea ice season. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 4316–4322
- 16 Cao Y F, Liang S L. Recent advances in driving mechanisms of the arctic amplification: A review (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2757–2774 [曹云锋, 梁顺林. 北极地区快速升温的驱动机制研究进展. 科学通报, 2018, 63: 2757–2774]
- 17 Ding Q, Schweiger A, L'Heureux M, et al. Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice. *Nat Clim Change*, 2017, 7: 289–295
- 18 Tian-Kunze X, Kaleschke L, Maaß N, et al. Smos-derived thin sea ice thickness: Algorithm baseline, product specifications and initial verification. *Cryosphere*, 2014, 8: 997–1018
- 19 Huntemann M, Heygster G, Kaleschke L, et al. Empirical sea ice thickness retrieval during the freeze-up period from SMOS high incident angle observations. *Cryosphere*, 2014, 8: 439–451
- 20 Ricker R, Hendricks S, Kaleschke L, et al. A weekly arctic sea-ice thickness data record from merged cryosat-2 and smos satellite data. *Cryosphere*, 2017, 11: 1607–1623
- 21 Wang X, Key J, Kwok R, et al. Comparison of arctic sea ice thickness from satellites, aircraft, and piomas data. *Remote Sens*, 2016, 8: 713
- 22 Seo S. A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets. Doctoral Dissertation. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2006
- 23 Zhang H X, Cao X, Li Q, et al. Research on crop identification using mul-temporal NDVI HJ images (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2015, 30: 304–311 [张焕雪, 曹新, 李强子, 等. 基于多时相环境星NDVI时间序列的农作物分类研究. 遥感技术与应用, 2015, 30: 304–311]
- 24 Cao Y F, Wang Z X, Deng F P. Fidelity performance of three filters for high quality NDVI time-series analysis (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2010, 25: 118–125 [曹云锋, 王正兴, 邓芳萍. 3种滤波算法对NDVI高质量数据保真性研究. 遥感技术与应用, 2010, 25: 118–125]
- 25 Transport Canada. Arctic ice regime shipping system (AIRSS) standards. 1998, Ottawa
- 26 Stephenson S R, Smith L C, Brigham L W, et al. Projected 21st-century changes to arctic marine access. *Clim Change*, 2013, 118: 885–899
- 27 Stephenson S R, Smith L C, Agnew J A. Divergent long-term trajectories of human access to the arctic. *Nat Clim Change*, 2011, 1: 156–160
- 28 Aksenov Y, Popova E E, Yool A, et al. On the future navigability of Arctic sea routes: High-resolution projections of the Arctic Ocean and sea ice. *Mar Policy*, 2017, 75: 300–317
- 29 Peng G, Meier W N, Scott D J, et al. A long-term and reproducible passive microwave sea ice concentration data record for climate studies and monitoring. *Earth Syst Sci Data*, 2013, 5: 311–318
- 30 Ahuja R K, Mehlhorn K, Orlin J, et al. Faster algorithms for the shortest path problem. *J Assoc Comp Mach*, 1990, 37: 213–223
- 31 Coachman L K, Rankin D A. Currents in long strait, arctic ocean. *Arctic*, 1968, 21: 27–38
- 32 Kucheiko A A, Ivanov A Y, Davydov A A, et al. Iceberg drifting and distribution in the vilkitsky strait studied by detailed satellite radar and optical images. *Izv Atmos Ocean Phys*, 2017, 52: 1031–1040
- 33 Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: Losses and coupled variability (1958–2018). *Environ Res Lett*, 2018, 13: 105005

Summary for “基于遥感观测的2010~2017年秋季北极东北航道通航能力时空变化”

Observed spatial-temporal changes in the autumn navigability of the Arctic Northeast Route from 2010 to 2017

Shiyi Chen¹, Yunfeng Cao^{1*}, Fengming Hui² & Xiao Cheng²

¹ College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

² College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

*Corresponding author, E-mail: yfcao@bjfu.edu.cn

Recently, the Arctic Northeast Route (ANR), an important shipping route connecting Asia and Europe, has become more and more navigable because of the accelerating melt of sea ice in the Arctic. The exploitation of the ANR could shorten the navigational distances from North Asia to Northwestern Europe by 40% (about 2500 nautical miles) and reduce one-third (about 10 days) of the time required for maritime transport by the Royal Road, which can help to save lots of transport costs and bring large environmental benefits. It's very important and urgent to accurately understand the changes in the navigability of the ANR for the development of the route. However, due to the lack of high-quality observed dataset, there are very few observation-based studies. Some model-based studies cannot effectively reflect the real changes in the navigability of the ANR, due to the varying degrees of the data quality issues. In this study, we applied the daily sea ice concentration product provided by the NSIDC and the reconstructed daily SMOS sea ice thickness product into the Arctic Transportation Accessibility Model (ATAM) from the Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) to assess and map the daily navigation risks for open water vessels in the ANR from 2010–2017 and further analyze the spatial and temporal changes of the Autumn navigability of the route during the eight years. Assuming the navigability of a specific ice regime is affected by the sea ice conditions and the ice-breaking ability of the vessels, the ATAM model can quantify the navigability of a specific ice regime for seven different vessel types. Since the SMOS ice thickness product is more reliable in thin ice area (lower than 0.5 m), we only focus on the navigability changes of the ANR for open water vessels in this study. We found that, although the end of shipping season for open water vessels across the ANR has extended to the day of 297 ± 4 (October 24th) since 2010 (excluding 2013), there is no significant trend in the navigability of the ANR for open water vessels in the last 8 years. Further analysis of the spatial distribution map of the navigation risk for open water vessels at the end of shipping season in different years shows that the navigability of the ANR mainly affected by the ice regime around the Eastern Siberian Sea, the Novosibirsk Islands and the Severnaya Zemlya Islands. In most years, it's the earlier frozen ice over the three regions leading to the end of the entire ANR, in the case that most other areas are still safely navigable. We also performed detailed analysis and found that there are significant differences in the navigability changes in the three key straits for open water vessels over the ANR. The Long strait shows great inter-annual variations in the navigability, but has limit impact on the navigability of the entire route because of its late ending of the shipping season. The Sannikov Strait shows the fastest decline, but small inter-annual variations in the navigability. It is also the earliest one that ending the shipping season, and therefore has a great impact on the long-term trend of the navigability of the ANR. The intra- and inter-annual changes in the navigability of the Vlikitsky Strait are very complex. It always fluctuates dramatically, and thus has great impact on the short-term navigability of the entire ANR. In view of the complexity of the change in the ANR navigability, observed high-quality, near real-time sea ice datasets are very important for the quantification of navigation risk in the ASR.

the Arctic Northeast Route, the ice silk road, navigability, remote sensing, sea ice dynamic

doi: [10.1360/N972018-01083](https://doi.org/10.1360/N972018-01083)