

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2023.06.013

# 冰上丝路安全：北极航道航行风险度评估的研究

范开国<sup>1,2</sup>, 王苗姜<sup>3</sup>, 申艺璇<sup>1</sup>, 刘婷婷<sup>4</sup>

(1. 32021 部队, 北京 100094; 2. 国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410015;  
3. 常州市新北自然资源和规划技术保障中心, 江苏 常州 213032; 4. 武汉大学中国南极测绘研究中心,  
湖北 武汉 430079)

**摘要:** 全球气候变暖导致北极海冰快速融化, 北极航道的全面开通成为可能。受航道内冰情与气象海洋等综合因素影响, 航道航行存在较大风险。本文主要基于北极海冰密集度卫星遥感观测结果, 综合风速、温度、能见度与水深等数据信息, 利用权重和风险等级划分法建立了无破冰能力船只在北极航道航行风险评估体系, 计算得到日平均航道航行风险度。通过与“雪龙”号科考船在西北航道航行线路与航道航行风险度比对, 发现“雪龙”号科考船均沿低风险度航道航行。研究结果表明: 利用北极航道航行风险评估体系计算日平均北极航道航行风险度是可行的, 可为极地科考或航道选取提供准确的航行风险评估信息, 对积极推进“冰上丝绸之路”建设具有重要意义。

**关键词:** 海冰密集度; 卫星遥感; 风险评估; 航行风险度

**中图分类号:** P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2023) 06-0105-07

近年来, 全球气温上升, 北极海冰加速融化, 海冰范围屡创新低, 使得包括俄罗斯北部的“东北航道”和加拿大沿岸的“西北航道”在内的北极航道有望真正地拥有全面开通的条件。北极航道一旦全面开通, 必将成为一条新的“海洋交通大动脉”, 以新的方式连接亚洲、欧洲和北美洲, 带来不可估量的商业利益和经济利益, 使得越来越多的国家都迫切地想尝试利用北极航道。

由于北极航道处于高纬度, 目前只有夏季的几个月份才具备通航条件。此外, 北冰洋沿岸复杂的冰情使得极区船舶航行较困难。根据北极航运评估报告的不完全统计, 在1995—2004年, 北极海域发生海上事故共293起。多发的海上事故不仅会对北极环境造成破坏, 而且伴随着巨大的经济损失。因此, 迫切需要开展航道航行风险度评估, 为极地科考和航道选取提供航行风险评估信息。

北极航道航行受诸多因素影响, 主要包括自然环境、船舶等级和航行人员等因素。其中自然环境因素影响较大, 诸如海冰密集度、海冰厚度、温度、风速和能见度等对航行时间有要求; 航道水深、航道宽度等对船舶等级有一定的限制; 而船舶航行时间长、破冰能力大小等对航行安全也有所影响。目前, 国内外科学家对航道航行风险评价已做过许多研究, HOWELL S E L 等<sup>[1]</sup>分析了加拿大北极群岛海冰情况, 探究了北极西北航道通航可行性; SAHIN B 等<sup>[2]</sup>采用改进的模糊层次分析法 (Improved Fuzzy-Analytic Hierarchy Process, IF-AHP) 对北冰洋航行风险因子设置量化权重, 确定了北极航行风险等级; 王哲等<sup>[3]</sup>通过建立风险指标体系对东北航道主要航段进行了量化风险评估, 并与挪威船级社 (Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd, DNV GL) 划分的北冰洋风险区进行对比, 两者结果较为吻合;

收稿日期: 2022-11-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFC2803300)

作者简介: 范开国 (1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事卫星海洋环境信息探测与应用研究。E-mail: vanfkg@sina.com

通讯作者: 刘婷婷 (1982—), 女, 博士, 教授, 主要从事极地遥感应用与卫星遥感图像处理研究。E-mail: tliu23@whu.edu.cn

王哲等<sup>[4]</sup>利用风险分析理论方法建立了东北航道自然环境风险评价指标体系,通过客观和主观权重组合形式分析了6个关键海峡的风险度;葛珊珊等<sup>[5]</sup>利用地理信息系统,综合自然环境的风险性和脆弱性初步量化了西北航道风险评价体系;单雨龙等<sup>[6]</sup>利用动态贝叶斯网络方法对北极东北航道风险度进行了评估与动态预测;钱龙霞等<sup>[7]</sup>利用投影寻踪方法对北极航道自然环境风险进行了评估和区划。

上述多项研究基于不同方法建立了风险评价体系,但较少通过实际可靠数据对建立的风险评价体系进行准确性验证。为了量化评估北极可通航航道的航行风险度,本文主要利用高精度海冰密集度遥感观测结果,综合风速、温度、能见度与水深等数据信息,利用权重和风险等级划分法建立了无破冰能力船只在北极航道航行的自然环境风险评估体系,计算得到日平均北极航道航行自然环境风险度信息,并通过“雪龙”号科考船在西北航道航行信息验证评估得到了航道航行风险度信息的准确性。从而为未来极地科考或航道选取提供航行风险评估信息支撑,对顺利推进“冰上丝绸之路”建设具有重要的意义。

## 1 评估数据分析

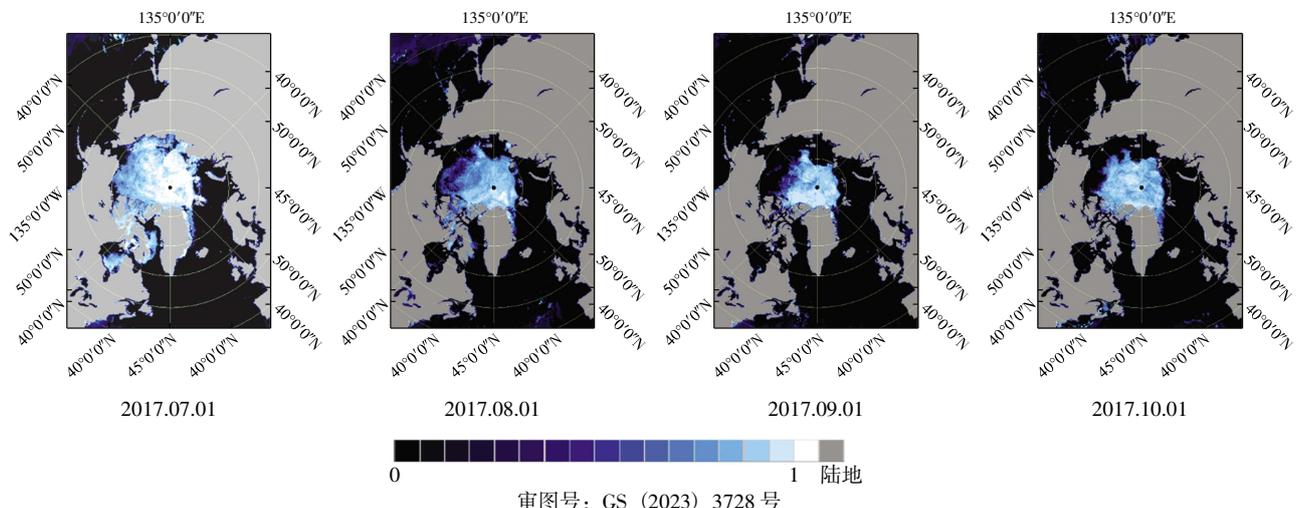
### 1.1 海冰密集度数据

海冰密集度是指示海冰变化的重要参数,是大气和海洋环流机制的输入参数。近几十年来,海冰密集度遥感卫星反演方法逐渐成熟。根据 LIU T 等<sup>[8]</sup>

和 KERN S 等<sup>[9]</sup>研究结果的散点图得知,大多数海冰密集度算法在高海冰密集度区域表现更好,但在低海冰密集度区域(海冰密集度低于50%)的精度差异很大。此外,由于 Bootstrap、NASA Team (NT) 和 NASA Team2 (NT2) 等海冰密集度算法主要利用被动微波数据中的亮温信息求解海冰密集度,忽略了海冰和海水的空间关系,导致在低海冰密集度区域会存在相应的低估或高估<sup>[10]</sup>。

LIU T 等<sup>[11]</sup>在考虑海冰海水的亮温信息和空间信息后,将 TV 正则化引入到非负约束最小二乘模型中,提出了针对低海冰密集度区域的非负约束最小二乘联合总变分 (Joint Total Variation with Nonnegative Constrained Least Square, NCLS-TV) 海冰密集度估算方法。NCLS-TV 方法可以较准确地估算一年冰和多年冰的密集度,且相较于基于北极辐射与湍流相互作用的海冰密集度估算法 (ARTIST (Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study) Sea Ice, ASI)、NT2 和全约束最小二乘法 (The Fully Constrained Least Squares, FCLS) 等成熟算法在低海冰密集度区域具有较低的均方根误差。

基于 NCLS-TV 海冰密集度估算方法,本文利用高性能微波扫描辐射计 (The Advanced Microwave Scanning Radiometer 2, AMSR 2) 被动微波遥感数据,获取了2017年的海冰密集度(一年冰密集度和多年冰密集度),其空间分辨率为12.5 km,时间分辨率为日。图1为2017年7月、8月、9月、10月第一天的海冰密集度分布图。图1中图例所示灰色部分代表陆地,黑色部分代表开阔水域(靠近北



审图号: GS (2023) 3728 号

图1 北极海冰密集度结果示意图

极点附近黑色部分为影像空洞),而海冰密集度(0%~100%)从深蓝色到白色按色阶梯度分布。

### 1.2 温度、风速和能见度数据

温度、风速和含水量数据来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)全球再分析数据产品ERA5数据集<sup>[12]</sup>。ERA5数据集提供了逐小时估计的大量大气、海洋和陆地表面参数,其主要包括不同海拔的风速、温度、空气密度、云底高度、地表太阳辐射度、反射率、蒸发量和含水量等。ERA5数据集每天更新,延迟时间约为5天,数据时间分辨率为每小时,空间分辨率为0.25°。本文使用了1 000 hPa的含水量数据、2 m气温和10 m风速数据,其中将含水量数据反演获得能见度数据,用于航行风险度的评估。温度,风速和含水量数据取每天0时、6时、12时、18时的数据再平均。由于这些数据与海冰密集度数据的投影不一致,空间分辨率也不一致,都需要重投影至北极极方位立体投影并重采样至12.5 km,多源数据的空间覆盖范围也裁剪至与海冰密集度数据保持一致。

### 1.3 水深数据

水深数据采用美国地球物理中心发布的ETOPO1陆地地形和海洋水深数据,该数据由不同的全球和区域数字数据集生成的<sup>[13]</sup>。ETOPO1包括ETOPO1(Ice)和ETOPO1(Bedrock)两种类型,分别表示南极和格陵兰冰盖的顶部高程与冰盖的底部高程,两者的空间分辨率均为1'。

### 1.4 航迹数据

通过在北极海冰网络信息平台上筛选,本文选择了中国第8次北极科学考察“雪龙”号船航迹作为验证数据,也是距离现在最近的一次中国北冰洋考察在西北航道的通航。此次北极科考于2017年7月20日从上海出发,经白令海峡和楚科奇海,首次选取穿越北极中央航道,过北欧海域,绕格陵兰岛经戴维斯海峡进入巴芬湾;随后在巴芬湾首次尝试穿越西北航道,历时8天经过冰情复杂的帕里水道东部、穿过皮尔海峡、富兰克林海峡、维多利亚海峡、毛德皇后湾和阿蒙森湾,于9月6日安全离开西北航道,进入波弗特海;最后在2017年10月10日返回上海,历时83天。本文使用时间分辨率

为5 min和10 min的“雪龙”号科考船轨迹数据,时间覆盖为2017年7月6日下午13:00至2017年10月9日下午14:00(UTC)。

## 2 航行风险评估

### 2.1 评估方法

基于NCLS-TV算法反演的海冰密集度数据,结合温度、风速、能见度与水深数据信息,首先按照专家打分的权重归一化确定这5种数据权重大小,分别为0.35、0.2、0.1、0.23和0.12<sup>[9]</sup>。可以看出,海冰对风险度的影响最大,温度和能见度次之,风速和水深影响最小。随后,进一步对5种数据进行风险等级划分<sup>[6]</sup>,建立航道航行风险指标判定(表1)。最后,在5种数据大小一致,分辨率一致,权重确定和风险等级划分的前提下,根据权重计算每个网格像素的风险度值,最终得到北极航道日均航行风险度信息。

表1 5种类型数据风险等级

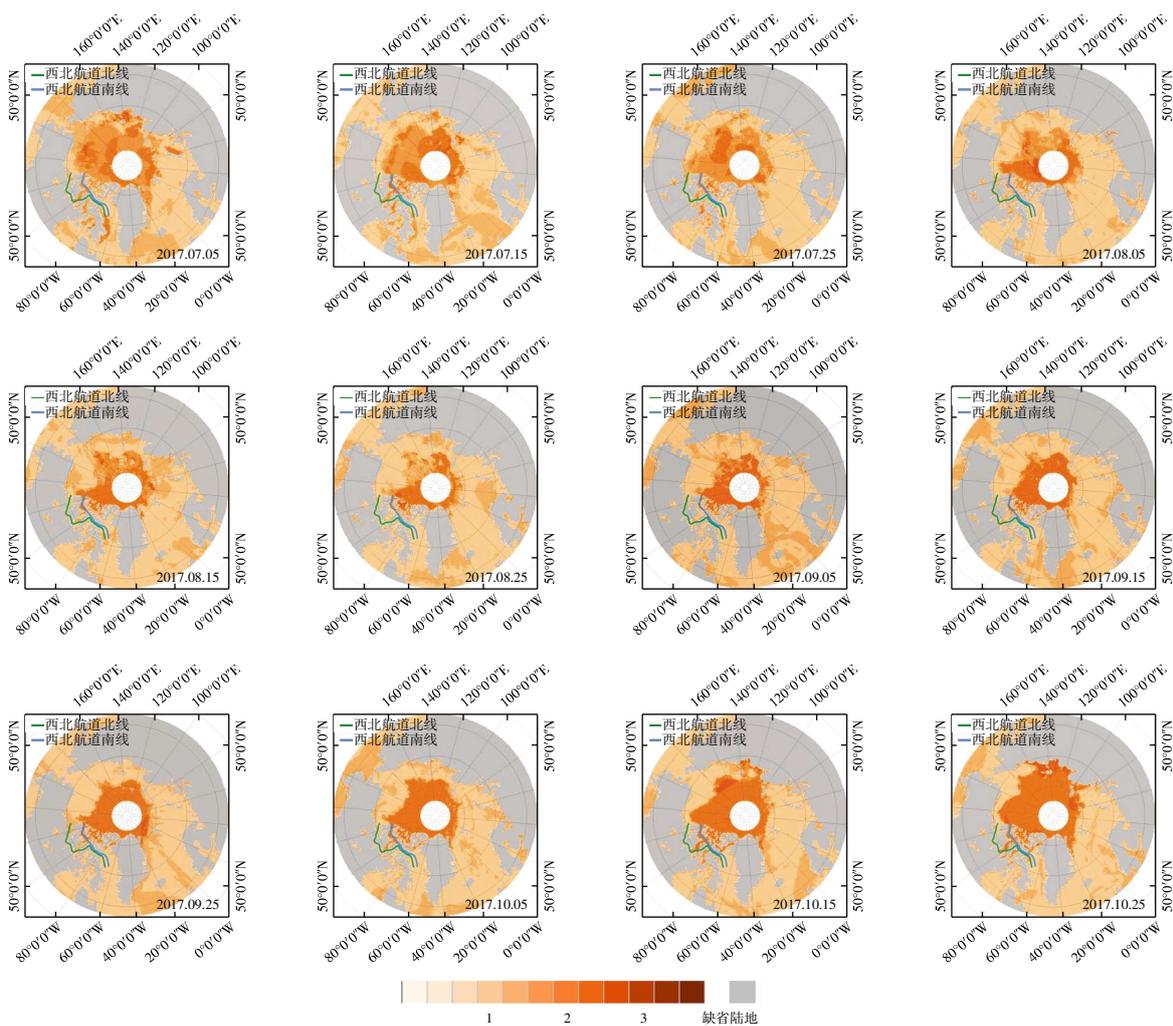
数据类型	风险等级		
	1	2	3
海冰密集度	< 0.4	0.4~0.7	> 0.7
温度/℃	> 0	-10~0	< -10
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	< 7	7~12.8	> 12.8
能见度/km	> 6	4~6	< 4
水深/m	> 20	15~20	< 15

### 2.2 评估结果分析

#### 2.2.1 全北极的航行风险度评估结果及分析

基于评估方法计算得到2017年日平均北极航道航行风险度,其中2017年7月、8月、9月和10月,每月5日、15日和25日的航道航行风险度如图2所示,每日的地图均采用北极极方位立体投影。

由图2可以看出,选取的12张风险度图在靠近北极中心区域和加拿大北极群岛北部的区域颜色较深,其风险度值基本在2左右,说明该区域航行风险度较大。在远离北极中心的各纬度上,风险度图颜色由深变浅,风险度值由大变小,并随着经度的不同在不同地方风险度差异较大。在远离北极的地方,海冰覆盖微乎其微,风险度可能受水深、温度、风速及其他因素影响。从时间序列看,风险度图从7月开始橙色逐渐变浅,在8月15日、25日



审图号: GS (2023) 3728 号

图中灰色代表陆地;白色代表缺失值(北极中心影像数据空洞)。橙色色阶梯度由浅到深分布表示风险度由小到大,根据风险度等级划分,风险度值小于1.5为低风险,1.5至2为中风险,大于2为高风险。

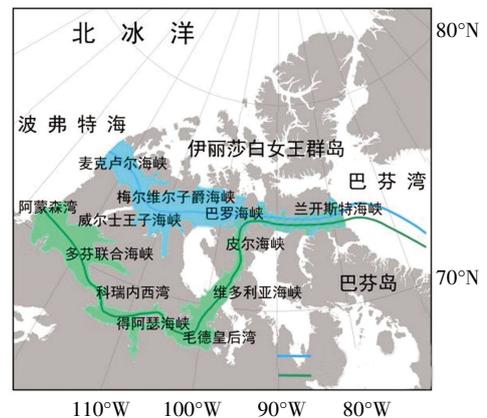
图2 2017年7—10月北极航道航行风险度图。

和9月的5日、15日最低,随后橙色又逐渐变深,在10月橙色深度最大,说明风险度变化与海冰冰情的时序变化趋势较一致,在一年中的8月底和9月初航行风险值总体较小,在7月和10月航行风险值较大。

### 2.2.2 西北航道的航行风险度评估结果及分析

考虑到海冰密集度数据的空间分辨率、路线水深及其他路线研究进展等,本文主要对西北航道北线和西北航道南线(图3)航道内海冰冰情和航行风险度进行了详细分析。

对西北航道北线而言,其巴罗海峡东部和兰开斯特海峡在2017年7月5日的航行风险度在1.3左右,而海冰密集度为0,说明该区域航行风险小,但当天西北航道北线的其他海峡(麦克卢尔海峡,



审图号: GS (2023) 3728 号

北线由波弗特海入,包括麦克卢尔海峡、梅尔维尔子爵海峡、巴罗海峡和兰开斯特海峡;南线由阿蒙森湾入,包括威尔士王子海峡、多芬联合海峡、科瑞内西湾、得阿瑟海峡、毛德皇后湾、维多利亚海峡、皮尔海峡和兰开斯特海峡。

图3 西北航道北线和南线

梅尔维尔子爵海峡和巴罗海峡西部) 风险度值约为 1.6~2, 风险度较高, 海冰密集度也达到了 0.7, 因此, 西北航道北线无法开通。7 月 25 日, 麦克卢尔海峡入口靠近班克斯岛的区域风险度开始出现小于 1.5 的区域, 西北航道内航行风险度开始降低。直至 8 月 15 日, 除了帕里水道中间区域 (梅尔维尔子爵海峡东部和巴罗海峡西部区域) 风险度大于 1.5 外, 北线其余航段风险值都较小, 这部分高风险的区域可能是由伊丽莎白女王群岛海域的海冰流入所导致。9 月 15 日, 整个西北航道北线风险度都小于 1.5, 说明该日西北航道北线可通航, 但需要注意海岛陆地边缘的残留冰。从 9 月下旬开始, 航道风险度值又开始上升, 其从西北航道北线中间段和西端先增加, 到 10 月 15 日, 除了兰开斯特海峡外, 其余航段风险度都较高。10 月 25 日, 整个西北航道北线风险度最大, 不能通航。

西北航道南线受海冰运动影响较小, 冰情较北线简单, 其风险度变化也与时间变化相关。南线的阿蒙森湾、多芬联合海峡和科瑞内西湾海冰融化较快, 在 7 月 5 日, 阿蒙森湾的风险度已经大约在 1~3。7 月 25 日, 多芬联合海峡和科瑞内西湾部分区域风险度低于 1.5, 同日靠近加拿大陆地的毛德皇后湾区域风险度也较低。8 月 5 日, 维多利亚海

峡东部和富兰克林海峡西部海域海冰融化, 风险度开始小于 1.5, 同时皮尔海峡也存在低风险度区域。8 月 15 日, 整个西北航道南线风险度较小, 南线开通。直至 10 月 5 日, 维多利亚海峡, 富兰克林海峡和皮尔海峡风险度值开始上升。10 月底, 整个西北航道南线只有毛德皇后湾和多芬联合海峡部分区域风险度较低, 因此南线开始不可通航。

### 3 航迹数据验证

为验证日平均航道航行风险度的准确性, 本文通过研究中国第 8 次北极科学考察“雪龙”号船航迹是否在低风险度区域来进行定性验证。“雪龙”号科考船在 7 月底穿过白令海峡并到达楚科奇海, 在 8 月首次通过北极中央航道, 经北欧海, 抵达巴芬湾。然后, 开始穿越西北航道, 历时 8 天完全通过西北航道南线。本文选取了 9 月 1 日至 6 日的“雪龙”号科考船穿越西北航道的航迹数据, 其主要从巴芬湾开始, 依次经过兰开斯特海峡、巴罗海峡、皮尔海峡、富兰克林海峡、维多利亚海峡、毛德皇后湾、德阿瑟海峡、科瑞内西湾、多芬联合海峡和阿蒙森湾, 并到达波弗特海, 即西北航道的南线。具体各时间段航迹与航行风险度如图 4 所示。

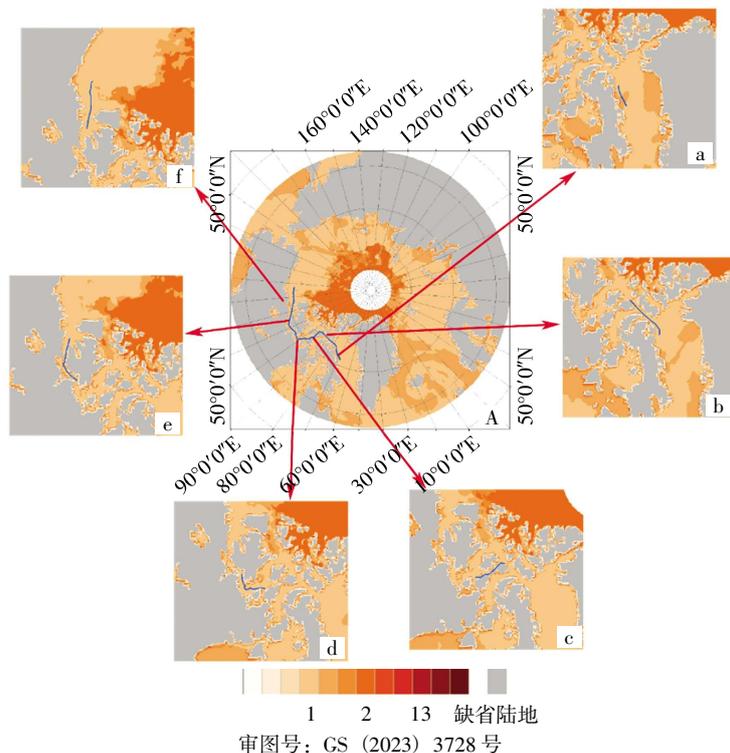


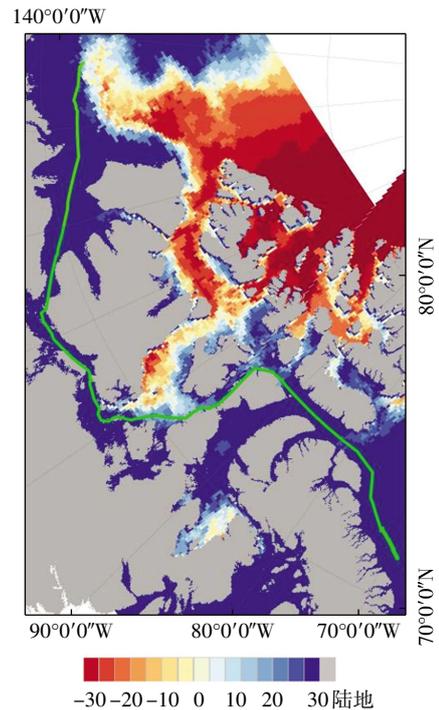
图 4 北极西北航道“雪龙”号科考船航迹与对应的日平均航行风险度对比图

审图号: GS (2023) 3728 号

由图4可见,“雪龙”号科考船9月1日至9月6日在西北航道航迹为图4(a)中的蓝色线段,图4(a)对应的风险度图时间为9月5日。图4(a)、图4(b)、图4(c)、图4(d)、图4(e)、图4(f)分别为9月1日至9月6日的航迹和对应日期的风险度图。9月1日“雪龙”号位于巴芬湾的西部,靠近巴芬岛,其风险度值较小,为1.0~1.3。9月2日“雪龙”号向西进入兰开斯特海峡,开始穿越西北航道,经兰开斯特海峡,到达巴罗海峡的萨默塞特岛北部,其风险度基本为1。9月3日“雪龙”号沿着皮尔海峡进入西北航道南线。根据9月3—6日的西北航道风险度图显示,在北线麦克卢尔海峡和梅尔维尔子爵海峡均存在风险度值为1.5~2的区域,而西北航道南线各海域的平均风险度在1.0~1.5,低于同期北线的风险度,由此可知,西北航道南线的航行风险相对较小。因此,“雪龙”号选择西北航道南线而不是北线这一事实与本文依据风险度得到的航行风险分析结果相对应,说明风险度具有一定的准确性。9月3日“雪龙”号经过皮尔海峡和富兰克林海峡,其风险度平均值为1左右。9月4日“雪龙”号继续穿过维多利亚海峡和毛德皇后湾,其航行风险度约为1.0~1.5。9月5日“雪龙”号经过德阿瑟海峡、科瑞内西湾和多芬联合海峡,到达阿蒙森湾,在这些区域中,除科瑞内西湾航行风险度在1.0~1.7外,其余航段风险度均较小。9月6日“雪龙”号经风险度为1的阿蒙森湾,驶入波弗特海,成功离开西北航道。

WANG C等<sup>[14]</sup>使用1979—2019年加拿大冰图(Canadian Ice Service Digital Archive, CISDA)数据,根据POLARIS方法确定的不同类型的海冰风险计算其通航风险RIO。RIO值为负表示船舶在此类区域航行的风险状况(运行风险升高或运行需特殊考虑),而RIO值为正表示可接受的风险状况(正常运行)。本文将WANG C等<sup>[14]</sup>的结果与“雪龙”号科考船的航迹进行了对比,结果如图5所示。

结合图4和图5,“雪龙”号科考船为了保证航行安全,均行驶在风险度最低的海峡。但是两种风险度图的获取存在本质的不同:本研究使用了海冰密集度、水深、温度和能见度数据综合计算出航行的风险度;WANG C等<sup>[14]</sup>仅使用了加拿大冰图数据,利用不同类型海冰风险POLARIS指数估算海冰通航风险,此外他们也考虑了船舶的破冰能力。



审图号: GS (2023) 3728 号

图5 北极西北航道“雪龙”号科考船航迹与WANG C等<sup>[14]</sup>的航行风险度对比图

## 4 结论

本文利用基于NCLS-TV方法反演的海冰密集度结果,综合风速、温度、能见度与水深等数据信息,利用权重和风险等级划分法建立了北极航道航行风险评估体系,并计算得到日平均北极航道航行风险度信息。通过与中国第8次北极科学考察“雪龙”号船航迹对比分析可知,“雪龙”号科考船基本在风险度较低的区域航行,加之“雪龙”号科考船避开西北航道北线而走南线也间接说明本文的日平均北极航道航行风险度信息具有较高的可信度。利用日平均北极航道航行风险度信息,可为极地科考或航道选取提供准确的航行风险评估信息,对顺利推进“冰上丝绸之路”建设具有重要意义。

由于本文采用的海冰密集度、水深等相关数据的来源不同,数据之间有较大的差异性。此外,航道航行风险度除受上述5个主要因素影响外,还受到海冰厚度、航道管制、船舶航行时间、船舶破冰能力、船员素质等因素影响。在未来的工作中,将考虑更多的数据因素,系统化地评估北极航道航行风险度,更好地保障极地科考与船舶通行。

## 参考文献:

- [1] HOWELL S E L, DUGUAY C R, MARKUS T. Sea ice conditions and melt season duration variability within the Canadian Arctic Archipelago: 1979–2008[J]. *Geophysical Research Letter*, 2009, 36: L10502.
- [2] SAHIN B, KUM S. Risk assessment of Arctic navigation by using improved fuzzy-AHP approach[J]. *Transactions of Royal Institution of Naval Architects*, 2015, 157(A4): 241–250.
- [3] 王哲, 张韧, 葛珊珊, 等. 北极东北航道自然环境风险区划: 以俄罗斯北部海域为例[J]. *海洋工程*, 2017, 35(5): 61–70.
- [4] 王哲, 葛珊珊, 张韧, 等. 基于粗糙集与犹豫层次分析的北极东北航道风险评估[J]. *海洋通报*, 2017, 36(5): 512–520.
- [5] 葛珊珊, 张韧, 杨孟倩. 气候变化背景下西北航道自然环境危险性评估[J]. *海洋通报*, 2017, 36(2): 121–127.
- [6] 单雨龙, 张韧, 李明. 基于动态贝叶斯网络的北极东北航道关键海区通航可行性研究[J]. *极地研究*, 2019, 31(1): 94–102.
- [7] 钱龙霞, 徐青, 王红瑞, 等. 基于投影寻踪的北极东北航道自然环境风险评估[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(1): 57–62.
- [8] LIU T, LIU Y, HUANG X, et al. Fully constrained least squares for Antarctic sea ice concentration estimation utilizing passive microwave data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(11): 2291–2295.
- [9] KERN S, LAVERGNE T, NOTZ D, et al. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: Closed ice and ship-based observations[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(12): 3261–3307.
- [10] KNUTH M A, ACKLEY S F. Summer and early-fall sea-ice concentration in the Ross Sea: Comparison of in situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 44(1): 303–309.
- [11] LIU T, WANG M, WANG Z, et al. Joint total variation with nonnegative constrained least square for sea ice concentration estimation in low concentration areas of Antarctica[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1–5.
- [12] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present[EB/OL].[2021–07–18]. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
- [13] AMANTE C, EAKINS B W. ETOPO1 1 Arc–Minute global relief model: Procedures: data sources and analysis[J]. *Psychologist*, 2009, 16(3): 20–25.
- [14] WANG C, DING M, YANG Y, et al. Risk assessment of ship navigation in the Northwest Passage: Historical and projection[J]. *Sustainability*, 2022, 14(9): 5591.

## Safety of the Silk Road on Ice: Study on Navigation Risk Assessment of the Arctic Waterway

FAN Kaiguo<sup>1,2</sup>, WANG Miaojiang<sup>3</sup>, SHEN Yixuan<sup>1</sup>, LIU Tingting<sup>4</sup>

(1. 32021 Troops, Beijing 100094, China; 2. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410015, China; 3. Changzhou Xinbei Natural Resources and Planning Technical Support Center, Changzhou 213001, China; 4. China Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The rapid melting of Arctic sea ice because of global warming has made it possible that the Arctic shipping routes are fully open. However, due to the influence of ice condition, weather and ocean, there exist great risks in navigation. Based on the Arctic sea ice density from satellite remote sensing observation results, and other data such as wind speed, temperature, visibility and water depth, this study established a navigation risk assessment system in the Arctic waterway for ships without ice-breaking ability using weight and risk grade classification method. Then, this method is used to calculate the daily average navigation risk degree of the waterway. By comparing the navigation routes of "Xuelong" in the Northwest Passage with navigation risk degree of the waterway, it is found that "Xuelong" sailed along the low navigation risk degree route. The results show that it is feasible to use the navigation risk assessment system to calculate the daily average navigation risk degree of the Arctic waterway, which can provide accurate navigation risk assessment information for polar scientific research or navigation route selection, and is of great significance to actively promote the construction of the "Ice Silk Road".

**Key words:** sea ice density; satellite remote sensing; risk assessment; navigation risk degree