

# 西北航道夏季气旋登陆期间海冰对波浪的影响\*

张娜<sup>1</sup> 余鑫<sup>1</sup> 吴新荣<sup>2</sup> 尤再进<sup>3</sup> 王安良<sup>4</sup> 贾昱鹏<sup>1</sup>

(1. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室 天津 300384; 2. 国家海洋信息中心 天津 300171; 3. 大连海事大学 港口与航运安全协创中心 辽宁大连 116026; 4. 国家海洋环境预报中心 北京 100081)

**摘要** 西北航道是指从北大西洋经加拿大北极群岛进入北冰洋,再进入太平洋的航道,是连接大西洋和太平洋的捷径。为了探讨西北航道通航期极端天气条件下强风及海冰对波浪场的影响机制,建立并验证了考虑海冰影响下的西北航道风浪演化模型,并以 2012 年 8 月北极气旋登陆期间为例探讨西北航道通航期波浪特性及波能流密度的时空演化及其对风和海冰的响应。研究表明,北极夏季海冰大多分布于西北航道以北海域,而风向大部分集中在 SSW (南偏西 22.5°)至 SW (南偏西 45°),西北航道海冰的存在并不会引起有效风区的明显减少,也不会引起无冰海域波能流的明显减小(不超过 5%)。但是,当风向变为北向风时,无冰海域波能流减小幅度最多高达 62%。最后,综合海冰和波浪要素的时空分布,提出了极端天气条件下西北航道通航期的最佳适航路线,为西北航道的夏季安全通航提供了科学依据。

**关键词** 西北航道; 海冰; 北极气旋; 波能流密度; 适航路线

**中图分类号** P731.22 **doi:** 10.11693/hyhz20220800224

西北航道是指从北大西洋经加拿大北极群岛进入北冰洋,再进入太平洋的航道,它是连接大西洋和太平洋的捷径。全球变暖和海冰融化使得西北航道的开通成为可能。西北航道的开通对于我国有着不可忽视的经济和政治战略价值(Parkinson *et al*, 2013)。西北航道与其他暖水航道最大的区别就是有冰。根据美国国家冰雪数据中心的资料显示,1979~2021 年间北极的海冰面积不断减少,且夏季海冰的减小速率是冬季的 2.39 倍(Mallett *et al*, 2021)。夏季北极海冰类型主要是多年冰,其覆盖面积每 10 a 下降 48%,北极的无冰夏季最早将在 2040 年出现(Wang *et al*, 2022)。目前只有夏季西北航道可以通航,最佳通航时间是 8~10 月(Hemer *et al*, 2013)。对于西北航道来说,由于开放水域的不断扩大,海浪成为一种新的物理现象(Overeem *et al*, 2011; Dobrynin *et al*, 2012)。然而,夏季多北极气旋,当开阔水域增大而强风天气较多时,风暴浪的海况就会威胁到通航安全。

根据冰-波作用机理建立准确可靠的数值模型是

研究西北航道波浪演化规律的一种重要手段。目前北冰洋的海浪研究主要基于浮标、潜标和走航等实地观测资料(郭井学等, 2011),结合卫星遥感和数值模拟等方法开展(周庆伟等, 2016)<sup>40</sup>。受恶劣的气候条件、复杂的地形和水动力条件的限制,现场观测数据较少,且时间、空间覆盖率较低(周庆伟等, 2016)<sup>42</sup>。卫星观测具有时间和空间限制,而且大多数高度计传感器通常不覆盖高于 82°的纬度。而数值模拟则为该地区的大范围波浪演化分析提供了有效手段。第三代近岸波浪模型(simulating wave nearshore, SWAN)与第三代海浪模式(wavewatch-III, WW3)常被用于北冰洋波浪要素的估算(Shao *et al*, 2022)。SWAN 的非结构化网格能够较好地模拟西北航道的复杂岸线,更好地解决由水深、风和沿海地区其他因素引起的复杂波浪变化(夏波等, 2013; Xiong *et al*, 2018)。但现有研究西北航道波浪场的范围仅是针对某个区域且空间分辨率较低,如基于 WW3 模型针对波弗特海、楚科奇海海浪要素开展研究,空间分辨率为 16 km,以及

\* 国家自然科学基金项目, 51509177 号, 42176208 号; 国家重点研发计划, 2021YFC2801000 号; 自然资源部海洋环境信息保障技术重点实验室开放基金。张娜, 博士, 教授, E-mail: cheungna@126.com

收稿日期: 2022-08-31, 收修改稿日期: 2022-09-28

基于 SWAN 模型针对 Mackenzie 三角洲模拟风暴浪, 空间分辨率为 28 km 的粗网格嵌套 5.5 km 的细网格 (Zhang *et al.*, 2020)<sup>2331</sup>。目前尚缺少完全覆盖整个西北航道全海域的精细化波浪数值模拟 (Stopa *et al.*, 2016)。

由于西北航道与其他暖水航道最大的区别就是存在海冰, 因此在波浪模拟时除了要考虑气象条件、波浪开边界和准确的地形水深, 还要考虑到海冰对波浪的影响。以往针对海冰对波浪的影响多是聚焦在冰边缘区的波浪传播演化。然而, 在强风和骤冷的极端天气下, 海冰对整个西北航道大范围波浪演化的影响主要体现在以下两个方面: 第一、由于海冰的存在隔离了海-气之间的动量交换, 因此阻止了有冰海域的风生浪; 第二、由于海冰的存在减小了有效风区从而导致无冰区域的波能衰减。Zhang 等 (2020)<sup>2336-2340</sup> 通过将非结构化网格有限体积法的 FVCOM 模型模拟得到的冰密集度以线性变化百分比的方式纳入了 SWAN 模型的风应力方程中从而建立了考虑海冰影响的波浪数值模型, 并将其用于渤海冬季波浪及波能流密度的再评估 (张娜等, 2021, 2022)<sup>1605</sup>。

本文在前期研究的基础上建立考虑海冰影响的西北航道波浪数值模型, 进一步对极端天气条件下西北航道的波浪场演化开展研究。这将为建立西北航道高精度波浪预报模型奠定基础, 为西北航道的通航安全提供一种切实可行的评估工具。

## 1 研究方法

本文通过将遥感反演的海冰密集度数据, 以线性变化百分比的方式纳入 SWAN 模型中的海表面摩擦风速方程中, 用于描述冰-水共存海域中海冰对波浪形成的影响。海表面摩擦风速  $U_f$  的方程如式(1)所示 (张娜等, 2021)<sup>1605</sup>:

$$U_f = \sqrt{C_d(1-A_i)}U_{10}, \quad (1)$$

式中:  $C_d$  为风拖曳力系数 (Wu, 1982), 当 10 m 高度处的风速  $U_{10}$  大于 7.5 m/s 时,  $C_d = (0.08 + 0.065U_{10}) \times 0.001$ , 否则  $C_d = 0.0013$ ;  $A_i$  为遥感反演的海冰密集度, 取值范围是 0~1 (Thorndike *et al.*, 1975)。

在描述波浪受冰影响程度时, 采用波能流密度这一特征变量。波能流密度定义为波浪在传播方向上单位时间内通过单位波峰宽度上的能量 (Ning *et al.*, 2016), 计算表达式按式(2)所示 (Liang *et al.*, 2017):

$$P = \frac{\rho g H_s^2}{16} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \frac{\pi}{kT_e}, \quad (2)$$

式中:  $P$  表示波能流密度 (单位: kW/m);  $h$  表示水深 (单位: m);  $k = 2\pi/L$  为波参数;  $L$  表示波长 (单位: m);  $T_e$  表示能量周期 (单位: s);  $\rho$  为海水密度, 取  $1.024 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $H_s$  为有效波高 (单位: m);  $g$  表示重力加速度, 取  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

## 2 原始数据及地形网格

### 2.1 数据来源

水深数据来源于加拿大渔业和海洋部 (<https://www.canada.ca/en.html>), 水平分辨率约  $0.12'$  (郝瑞杰等, 2022)。该数据集已被 Guo 等 (2020)<sup>1-20</sup> 应用在西北航道潮汐动力研究中。海冰密集度数据由德国不莱梅大学“极地遥感”研究组 (<https://seaice.unibremen.de/>) 提供, 时间分辨率为 1 d, 空间分辨率为 6.25 km (赵杰臣等, 2017; 歆怡等, 2021; Lu *et al.*, 2022)。

涌浪开边界数据和平均海平面气压数据由欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 提供的全球气候的第五代大气再分析资料 (ECMWF re-analysis 5, ERA5) 提供, 时间分辨率为 1 h (Hersbach *et al.*, 2020)。其中涌浪开边界数据的空间分辨率为  $0.5^\circ$ 、平均海平面气压数据的空间分辨率为  $0.25^\circ$ 。风场数据来源于美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的 1 h 再分析数据, 空间分辨率约为  $0.2^\circ$  (Zhang *et al.*, 2019)。

### 2.2 模型网格

模型范围涵盖整个加拿大北极群岛, 水平分辨率从 0.5 km (在狭窄的入口和海峡) 到 1 km (在大陆架断裂区域) 到 40 km (在深海盆地)。水平向采用非结构化网格。模型水深及波浪浮标测点如图 1 所示。

根据 Guo 等 (2020)<sup>4</sup>, 模型的开边界设置在北极、北部拉布拉多海、弗里和赫克拉海峡。西北航道几乎都位于  $75^\circ\text{N}$  以南, 模型网格及西北航道航线如图 2 所示。

## 3 模拟结果验证

针对 2008 年 10 月 5 日 0 点至 2008 年 10 月 9 日 0 点的一场强风天气进行波浪数值模拟, 并基于卫星遥感对模拟的冰密集度数据进行验证, 基于图 1 中 P1 点的实测数据 (徐福敏等, 2018) 对输入的美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 风场以及模拟的有效波高及谱峰波周期进行验证。

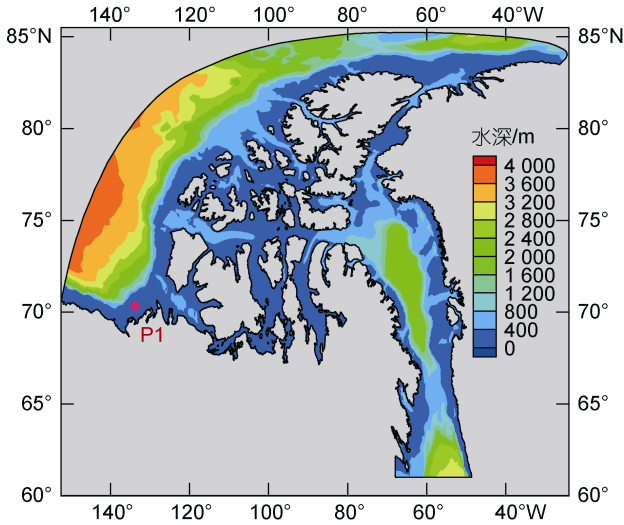


图 1 西北航道水深及波浪浮标测点 P1 (133.75°W, 70.33°N)

Fig.1 Depth and the wave buoy point P1 (133.75°W, 70.33°N) in the Northwest Passage

根据图 3, 发现 2008 年 10 月 1 日数值模拟输出的海冰密集度与卫星遥感数据的相对误差在 10%以内, 表明本研究已经成功将卫星遥感的冰密集度通过公式(1)纳入到 SWAN 模型中。

根据图 4, 2008 年 10 月的 NCEP 风速与实测风速、风向对比结果表明, NCEP 风场数据有较高的精度, 能够较好地描述气旋期间风速、风向的快速变化。

根据图 5, 模拟的有效波高最大值为 4.70 m, 与整个模拟时段内实测最大值的相对误差为 5.91%; 模拟的有效波高平均值为 2.92 m, 与实测的相对误差为 7.49%; 模拟的谱峰周期最大值为 10.67 s, 与整个模拟时段的实测最大值的相对误差为 5.45%; 模拟的谱

峰周期平均值为 8.33 s, 与实测的相对误差为-0.09%。验证结果表明所建立的数值模型能够较好的模拟极端天气下的波浪演化过程。

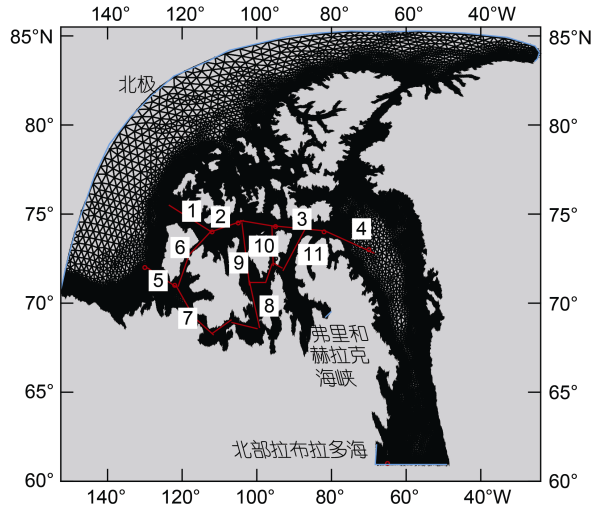


图 2 西北航道航线图

Fig.2 The routes of the Northwest Passage

注: 1: 麦克卢尔海峡; 2: 梅尔维尔子爵海峡; 3: 巴罗海峡; 4: 兰开斯特海峡; 5: 阿蒙森湾; 6: 威尔士王子海峡; 7: 科罗内申湾; 8: 维多利亚海峡; 9: 麦克林托克海峡; 10: 皮尔海峡; 11: 利金特王子湾; 其中蓝色线条表示模型开边界位置, 红色线条表示西北航道航线

### 4 结果分析

#### 4.1 北极气旋

本文以 2012 年 8 月 11 日 7 点至 8 月 14 日 18 点发生在西北航道区域的北极气旋为例, 探讨北极气旋登陆期间西北航道内波浪的演化规律及其对风和海冰的响应。北极气旋的寻找使用 ERA5 的平均海平面气压数据。

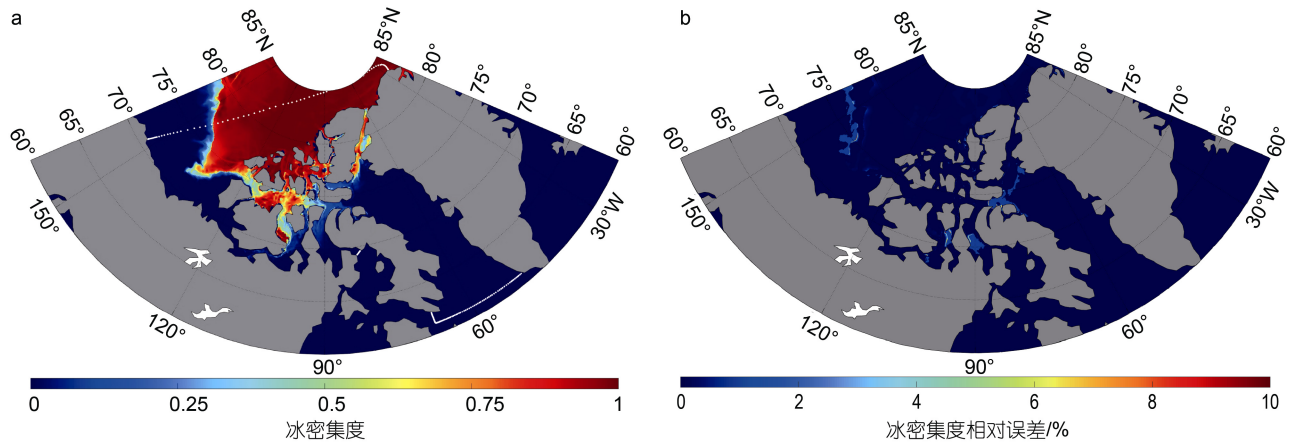


图 3 2008 年 10 月 1 日海冰密集度遥感数据(a)以及与模拟结果的相对误差(b)

Fig.3 Remote sensing data of sea ice concentration on october 1, 2008 (a) and its relative error with simulation results (b)

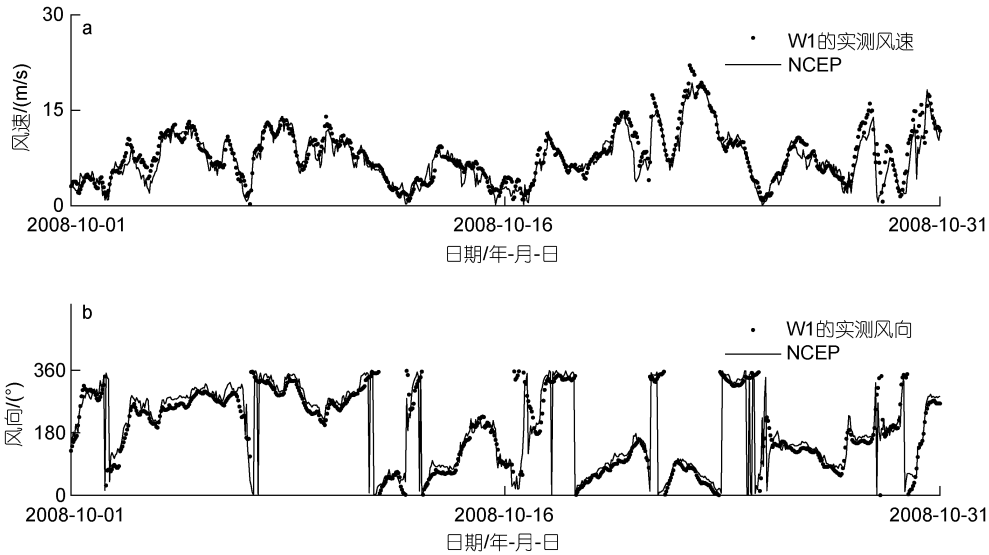


图 4 位于 W1 (57.1 °W, 44.24 °N)的美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的风速和风向数据与实测值的对比

Fig.4 Comparison of W1 (57.1°W, 44.24°N) between NCEP and measured wind speed and direction

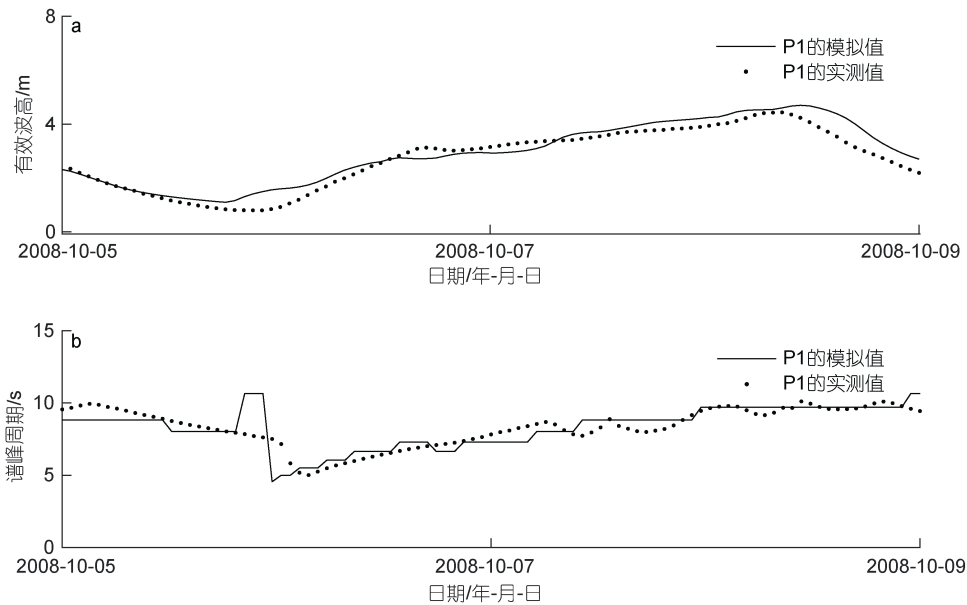


图 5 P1 (133.75°W, 70.33°N)测点有效波高(a)及谱峰周期(b)的实测值与数值模拟结果对比图

Fig.5 Comparison between measured and simulated values of significant wave height (a) and peak wave period (b) at P1 (133.75°W, 70.33°N)

2012 年模型范围内的北极气旋首先在 8 月 11 日 7 点出现在 125.847°W, 82.1485°N, 中心气压为 992.0 hPa。气旋在进入西北航道之后中心气压波动升高, 处于消亡期。最后在 2012 年 8 月 14 日 18 点在 100°W, 76°N 的上空消失, 此时气旋的中心气压为 1 004.8 hPa, 北极气旋路径如图 6 所示。

在北极气旋登陆期间, 西北航道内的主风向为 SSW 向(南偏西 22.5°), 最大风速为 15.84 m/s, 如图 7

所示。

#### 4.2 海冰

在 2012 年 8 月北极气旋登陆期间, 模型中开阔水域平均占比为 71.09%; 西北航道区域内平均海冰密集度呈现北高南低, 西高东低的特点(图 8)。

北极气旋登陆期间, 模型 75°N 以北海域大部分被海冰覆盖, 此范围内平均海冰密集度为 52.08%。西北航道位于模型 75°N 以南海域, 其中麦克卢尔海峡

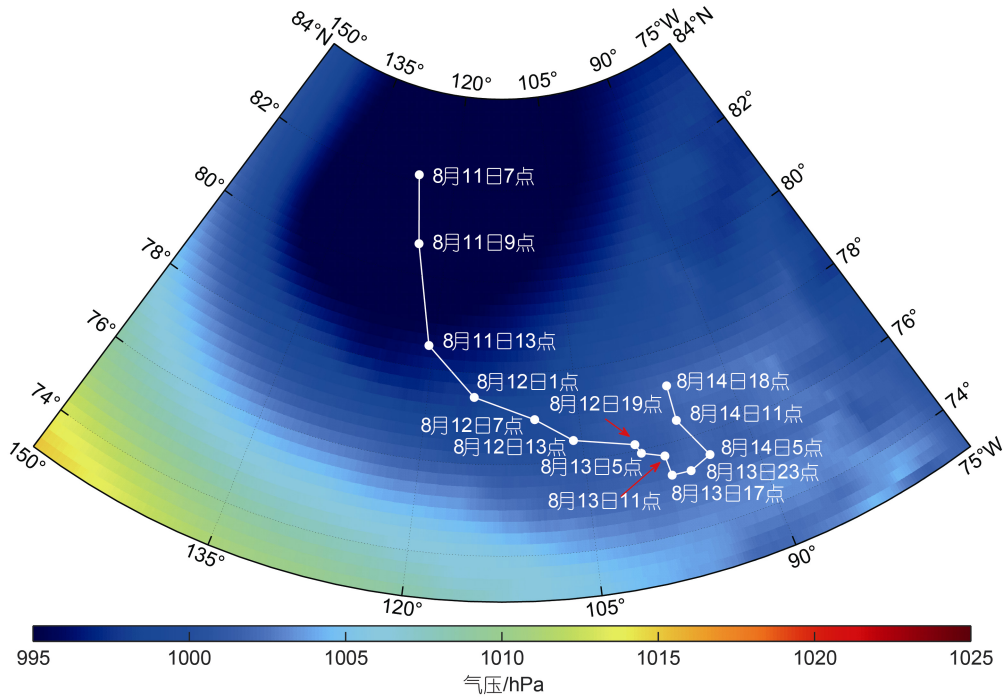


图 6 北极气旋路径图

Fig.6 Arctic cyclone track

注: 背景为 2012 年 8 月 11 日 7 点至 14 日 18 点西北航道模型范围内气压最低值

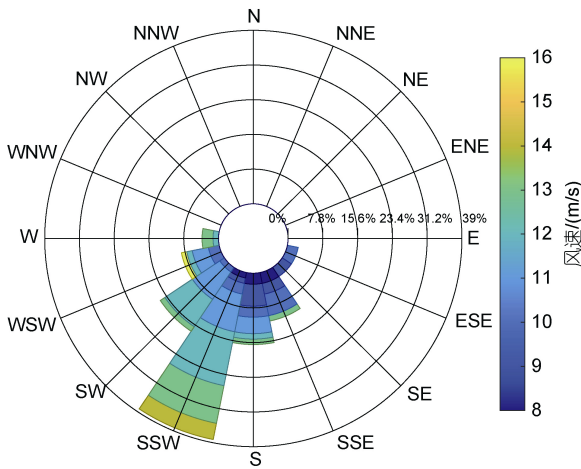


图 7 北极气旋登陆期间西北航道风玫瑰图

Fig.7 Wind rose map of the Northwest Passage during the landfall of an Arctic cyclone

的平均海冰密集度为 13.38%; 梅尔维尔子爵峡的平均海冰密集度为 1.11%; 巴罗海峡的平均海冰密集度为 0.66%; 兰开斯特海峡和阿蒙森湾的平均海冰密集度为 0; 威尔士王子海峡的平均海冰密集度为 19.25%; 克罗内森湾和维多利亚海峡的平均海冰密集度为 0; 麦克林托克海峡的平均海冰密集度为 0.03%; 皮尔海峡的平均海冰密集度仅为 0.01%; 利金特王子湾的平均海冰密集度为 0.08%。

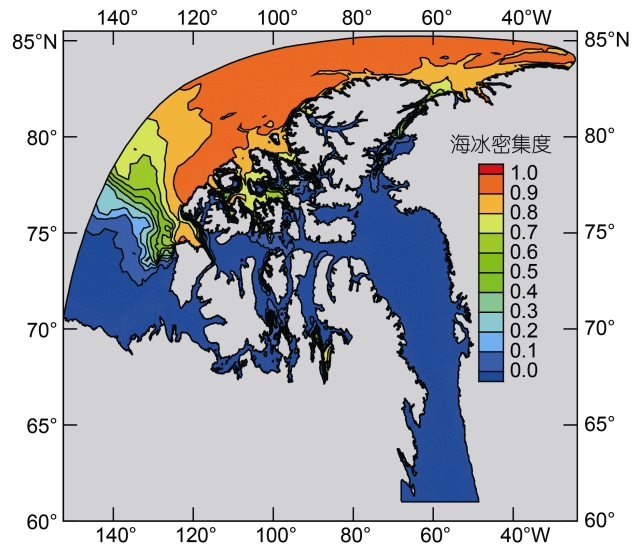


图 8 北极气旋登陆期间平均海冰密集度

Fig.8 Average sea ice concentration during landfall of an Arctic cyclone

### 4.3 波浪

在北极气旋登陆期间, 西北航道内有效波高平均值最大达到 2.42 m (图 9)。受气旋影响, 航道东部波高明显高于航道西部。能量周期平均值最大达到 8.65 s (图 10)。北极气旋登陆期间, 西北航道内波能流密度平均值分布如图 11 所示。航道内波能流密度

最大值为 30.60 kW/m。波能流密度最大值主要集中在航道东北向。

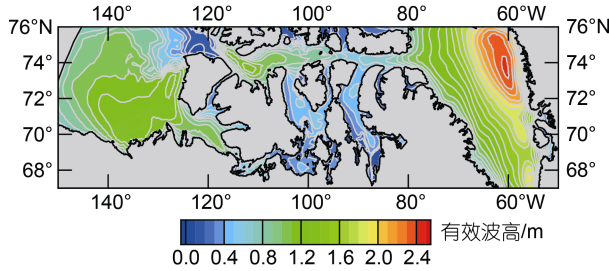


图 9 有效波高平均值分布

Fig.9 Distribution of the mean significant wave height

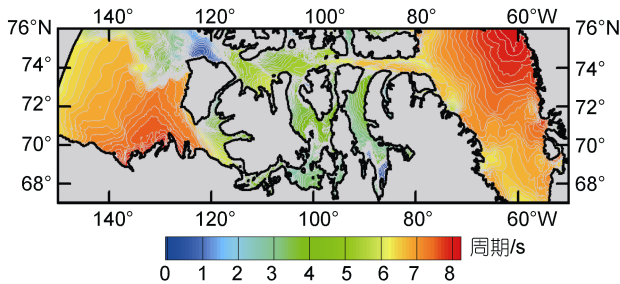


图 10 能量周期平均值分布

Fig.10 Distribution of the mean energy period

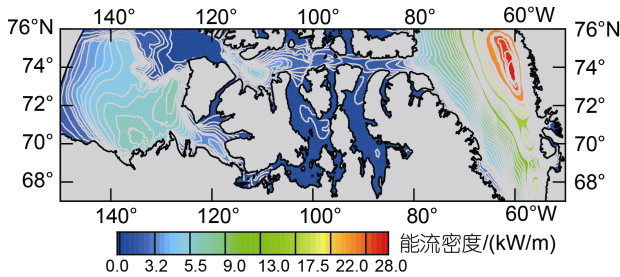


图 11 波能流密度平均值分布

Fig.11 Distribution of the mean wave energy flux density

表 1 显示, 波能流密度平均值最大发生在阿蒙森湾, 为 5.20 kW/m, 有效波能流密度的出现概率最大, 为 79.76%; 其次是兰开斯特海峡, 波能流密度平均值为 4.46 kW/m, 有效波能流密度的出现概率为 57.14%; 麦克卢尔海峡、梅尔维尔子爵海峡以及巴罗海峡的波能流密度平均值均大于 2 kW/m; 其余位置波能流密度平均值均小于 2 kW/m。

## 5 海冰对波浪的影响

### 5.1 气旋登陆期间海冰对波能流密度的影响

2012 年 8 月北极气旋登陆期间, 由于海冰的存在, 会影响海洋与大气之间的热量和动量交换, 同时也

形成了海冰和下覆海水之间的边界层, 因此覆冰海域波能会发生显著降低。然而, 无冰海域的波能流密度并没有大幅减小(图 12)。这是由于在北极气旋登陆期间, 西北航道的主风向主要集中在南偏西 22.5°, 最大风速为 15.84 m/s, 如图 7 所示。而海冰大多分布于西北航道以北海域, 因此并不会引起有效风区的明显减少, 也就不会引起无冰海域波能的明显减小。表 1 显示, 麦克卢尔海峡的波能流密度平均值受海冰影响程度最大, 减少了 44.48%, 其次是威尔士王子海峡, 波能流密度平均值受冰影响减少了 40.98%, 其余位置的波能流密度平均值受海冰影响程度均小于 5%。

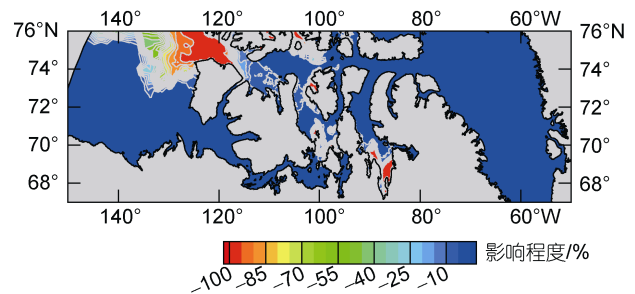


图 12 气旋登陆期间波能流密度平均值受冰影响百分比

Fig.12 Percentage of average wave energy flux affected by ice during cyclone landing

### 5.2 西北航道波能流密度对风向的响应

在北极气旋登陆期间, 当风向从偏南向变为北向时, 梅尔维尔子爵海峡的波能流密度平均值受冰影响的减少程度从 1.26% 增至 50.30%; 巴罗海峡的波能流密度平均值受冰影响的减少程度从 2.11% 增至 61.75%, 如图 13 所示。北向风时航道内其余点位波能流密度平均值受冰影响的减少程度见表 1。

根据图 13 与表 1, 波能流密度受冰影响程度在北风向时比南风向时偏大, 主要是因为海冰主要分布在西北航道以北海域, 当风向为偏北向时, 海冰的存在会造成有效风区大幅减小, 从而导致无冰海域的波能减小。这也进一步说明西北航道内海冰对波浪的影响不仅与风速大小有关, 还与风向有关。

## 6 结论

本文通过将遥感反演的海冰密集度数据, 以线性变化百分比的方式纳入 SWAN 模型的海表面摩擦风速方程中建立了考虑海冰影响的西北航道波浪演化模型, 模拟并分析了 2012 年 8 月北极气旋登陆期

表 1 西北航道各段波能流密度及其受海冰影响程度

Tab.1 Wave energy flux density and its influence degree by sea ice in each section of the Northwest Passage

区域	波能流密度平均值/(kW/m)	有效波能流密度的出现频率/%	偏南风向时受海冰影响程度/%	偏北风向时受海冰影响程度/%
1	2.49	44.52	-44.48	-100.00
2	2.04	40.86	-1.26	-50.30
3	2.43	53.89	-2.11	-61.75
4	4.46	57.14	-0.02	-0.02
5	5.20	79.76	-4.24	-8.28
6	0.75	12.87	-40.98	-87.80
7	0.23	0.00	0.00	-0.51
8	0.19	0.00	-3.24	-20.57
9	0.38	0.00	-3.10	-28.62
10	0.29	0.00	-1.78	-2.78
11	1.13	15.80	-0.31	-29.40

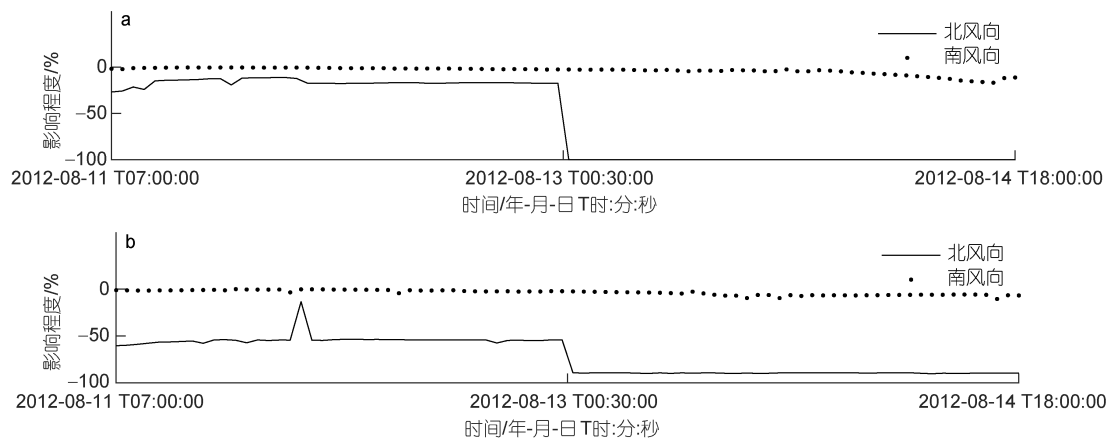


图 13 风向对梅尔维尔子爵海峡(a)和巴罗海峡(b)波能流密度的影响

Fig.13 Effect of wind direction on wave energy flux in Viscount Melville Sound (a) and Barrow Strait (b)

间西北航道的波浪演化及其对风和海冰的响应, 得出如下结论:

(1) 在 2012 年 8 月份北极气旋登陆期间, 模型中开阔水域平均占比为 71.1%, 呈现北高南低、西高东低的分布特点。北纬 75°以北大部分海域被海冰覆盖, 而西北航道位于北纬 75°以南, 开阔水域占比高达 88.3%。

(2) 2012 年 8 月 11 日 7 点到 14 日 18 点北极气旋登陆期间西北航道内有效波高平均值最大达到 2.42 m, 谱峰周期平均值最大达到 8.65 s, 平均波能流密度最大值为 30.60 kW/m。在此期间最大风速为 15.84 m/s, 风向大部分集中在南偏西 22.5°。而海冰大多分布于西北航道以北海域, 并不会引起有效风区的大幅减少, 因此也就不会引起无冰海域波浪的明显减小(不超过 5%)。

(3) 当风向由偏南向变为北向时, 同样的风速条件下则会引起梅尔维尔子爵海峡和巴罗海峡受冰影

响高达 40 倍和 29 倍的波能流密度的衰减。这进一步说明海冰对西北航道内波浪的影响不仅与风速大小有关, 还与风向有关。

(4) 在北极气旋登陆期间, 麦克卢尔海峡-梅尔维尔子爵海峡-巴罗海峡-兰开斯特海峡航线短, 平均冰密集度不超过 15%, 适合船舶通行(综合研判各种影响船舶航行的自然条件, 本文航线选择标准拟定为风浪较小, 海冰密集度低于 15%的航线)。并且该航线内的波能流密度平均值为 2.0 kW/m, 沿途适合建立波能发电厂为过往船只提供能量补给。

#### 参 考 文 献

- 赵杰臣, 周翔, 孙晓宇, 等, 2017. 北极遥感海冰密集度数据的比较和评估[J]. 遥感学报, 21(3): 351-364.
- 郭井学, 孙波, 李群, 等, 2011. 极地海冰浮标的现状与应用综述[J]. 极地研究, 23(2): 149-157.
- 周庆伟, 张松, 武贺, 等, 2016. 海洋波浪观测技术综述[J]. 海洋测绘, 36(2): 39-44.

- 胡歆怡, 王云鹏, 荆文龙, 2021. 全球多尺度海岸线数据在珠江口岸线的精度评价及适用性分析[J]. 热带地理, 41(3): 609-621.
- 徐福敏, 苗琪, 姜静, 2018. Mackenzie 三角洲风暴相关的海岸水动力现象[J]. 河海大学学报(自然科学版), 46(2): 177-182.
- 郝瑞杰, 万晓云, 眭晓虹, 等, 2022. 海底地形探测和模型研制现状及精度分析[J]. 地球与行星物理论评, 53(2): 172-186.
- 张娜, 王立涛, 耿姗姗, 等, 2022. 渤海海域冰水共存期的波能流密度推算[J]. 海洋与湖沼, 53(4): 981-989.
- 夏波, 张庆河, 蒋昌波, 2013. 基于非结构网格的波流耦合数值模式研究[J]. 海洋与湖沼, 44(6): 1451-1456.
- 张娜, 李帅, 耿姗姗, 等, 2021. 渤海海冰对波浪推算的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 42(11): 1604-1610.
- DOBRYNIN M, MURAWSKY J, YANG S, 2012. Evolution of the global wind wave climate in CMIP5 experiments [J]. Geophysical Research Letters, 39(18): L18606.
- GUO L L, WU Y S, HANNAH C G, *et al*, 2020. A modelling study of the ice-free tidal dynamics in the Canadian Arctic Archipelago [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 236: 106617.
- HEMER M A, FAN Y L, MORI N, *et al*, 2013. Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble [J]. Nature Climate Change, 3(5): 471-476.
- HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, *et al*, 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999-2049.
- LIANG B C, SHAO Z X, WU G X, *et al*, 2017. New equations of wave energy assessment accounting for the water depth [J]. Applied Energy, 188: 130-139.
- LU J S, SCARLAT R, HEYGSTER G, *et al*, 2022. Reducing weather influences on an 89 GHz sea ice concentration algorithm in the arctic using retrievals from an optimal estimation method [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 127(9): e2019JC015912.
- MALLET R D C, STROEVE J C, CORNISH S B, *et al*, 2021. Record winter winds in 2020/21 drove exceptional Arctic sea ice transport [J]. Communications Earth & Environment, 2(1): 149.
- NING D Z, WANG R Q, ZOU Q P, *et al*, 2016. An experimental investigation of hydrodynamics of a fixed OWC Wave Energy Converter [J]. Applied Energy, 168: 636-648.
- OVEREEM I, ANDERSON R S, WOBUS C W, *et al*, 2011. Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast [J]. Geophysical Research Letters, 38(17): L17503.
- PARKINSON C L, COMISO J C, 2013. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: combined impact of preconditioning and an August storm [J]. Geophysical Research Letters, 40(7): 1356-1361.
- SHAO W Z, YU W P, JIANG X W, *et al*, 2022. Analysis of wave distributions using the WAVEWATCH-III model in the Arctic Ocean [J]. Journal of Ocean University of China, 21(1): 15-27.
- STOPA J E, ARDHUIN F, GIRARD-ARDHUIN F, 2016. Wave climate in the Arctic 1992-2014: seasonality and trends [J]. The Cryosphere, 10(4): 1605-1629.
- THORNDIKE A S, ROTHROCK D A, MAYKUT G A, *et al*, 1975. The thickness distribution of sea ice [J]. Journal of Geophysical Research, 80(33): 4501-4513.
- WANG Y H, BI H B, LIANG Y, 2022. A satellite-observed substantial decrease in multiyear ice area export through the Fram Strait over the last decade [J]. Remote Sensing, 14(11): 2562.
- WU J, 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 87(C12): 9704-9706.
- XIONG J, WANG Y P, GAO S, *et al*, 2018. On estimation of coastal wave parameters and wave-induced shear stresses [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 16(9): 594-606.
- ZHANG N, LI S, WU Y S, *et al*, 2020. Effects of sea ice on wave energy flux distribution in the Bohai Sea [J]. Renewable Energy, 162: 2330-2343.
- ZHANG N, WANG J, WU Y S, *et al*, 2019. A modelling study of ice effect on tidal damping in the Bohai Sea [J]. Ocean Engineering, 173: 748-760.



## IMPACT OF SEA ICE ON WAVES DURING THE LANDFALL OF SUMMER CYCLONE IN THE NORTHWEST PASSAGE

ZHANG Na<sup>1</sup>, YU Xin<sup>1</sup>, Wu Xin-Rong<sup>2</sup>, YOU Zai-Jin<sup>3</sup>, WANG An-Liang<sup>4</sup>, JIA Yu-Peng<sup>1</sup>

(1. *Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics & Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China*; 2. *National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China*; 3. *Centre for Ports and Maritime Safety, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China*; 4. *National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China*)

**Abstract** The Northwest Passage is a shortcut connecting the Atlantic Ocean and the Pacific Ocean from the North Atlantic Ocean to the Arctic Ocean through the Canadian Arctic islands, and then to the Pacific Ocean. To explore the influence mechanism of strong wind and sea ice on waves during the navigation period of the Northwest Passage under extreme weather conditions, a wind wave evolution model of the Northwest Passage including the influence of sea ice is established and verified. Taking the Arctic cyclone landing period in August 2012 as an example, the temporal and spatial evolution of wave characteristics and wave energy flux during the navigation period of the Northwest Passage and its response to wind and sea ice are discussed. Simulation results show that since the sea ice of the Arctic in summer is mostly distributed in the north of the Northwest Passage, and the wind direction is mostly concentrated in SSW~SW. Therefore, the existence of sea ice will not cause the significant reduction of the effective wind area, nor will it cause the significant reduction of the waves in the ice free sea area (no more than 5%). However, when the wind direction changes to northward, the wave energy flux in ice-free waters is reduced by up to 62%. Finally, based on the temporal and spatial distribution of sea ice and wave elements, the optimal navigable route of the Northwest Passage in the navigation period under extreme weather conditions is proposed, which provides a scientific basis for the safe navigation of the Northwest Passage in summer.

**Key words** Northwest Passage; sea ice; Arctic cyclones; wave energy flux; optimal navigable route