

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.014

风暴期间 Beaufort-Mackenzie 海域海冰对海浪强度的影响

徐福敏^{1,2}, 吴宏², 李钺², 郑金海^{1,3}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究风暴过程中海冰剧烈运动情形下 Beaufort-Mackenzie 海域各区位的海浪变化特性, 基于该海域 2008 年开冰期西北向北极风暴(2008 年 10 月 5—8 日)的风、浪及逐日海冰数据, 分析了风暴期间海冰的密集度、发展阶段和尺寸的变化, 并采用 SWAN 模型模拟了风暴过程中剧烈变化的风速、风向和海冰对海浪强度的影响, 同时对比分析了 2 种海冰模式(采用实际海冰信息(密集度、发展阶段和尺寸信息)的海冰模式、不同海冰密集度为固定边界)的海浪数值模拟结果。结果表明: 2 种海冰模式均在离海冰较远海岸水域得到合理模拟结果; 风暴期间以涵盖实际海冰信息的海冰模式能模拟得到更精细的海浪强度; 以实际海冰信息的海冰模式进行模拟, 发现风暴期间风速、风向和海冰的剧烈变化导致 Beaufort-Mackenzie 海域海浪强度、分布发生剧烈变化, 最大海浪发生在风速最大时刻。

关键词: Beaufort-Mackenzie 海域; 北极风暴; 海冰密集度; 海冰模式; 海浪; SWAN 模型

中图分类号: P731.22; P941.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)06-0107-08

Influence of sea ice on wave intensity during an arctic storm in Beaufort-Mackenzie Sea area

XU Fumin^{1,2}, WU Hong², LI Cheng², ZHENG Jinhai^{1,3}

(1. Key Laboratory of Coastal Disasters and Protection, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To clarify the wave properties at different locations in the Beaufort-Mackenzie Sea area when sea ice varied significantly under violent storm condition, based on the observed winds, waves and daily sea ice data of one of northwest arctic storm (Oct. 5-8, 2008) during open water season in the Beaufort-Mackenzie Sea area, changes of sea ice concentration, developing stage and sea ice size are studied. Waves are simulated with SWAN model under dramatic variations of wind velocity, wind direction and sea ice during the storm, and comparison study is also carried out between model simulations with sea ice mode covering realistic sea ice information (sea ice concentration, development stage and size information) and different sea ice concentrations as model boundary. The results show that reasonable simulation results are obtained in areas off sea ice cover region by using the two sea ice modes; sea ice mode covering realistic sea ice information gives more precise waves simulation results during storm. Simulation with sea ice mode covering realistic sea ice information indicates that dramatic changes of wind velocity, wind direction and sea ice induce severe variations of wave strength and distribution in Beaufort-Mackenzie region, the most violent waves occur at the biggest wind time.

Key words: Beaufort-Mackenzie Sea area; arctic storm; ice concentration; ice mode; waves; SWAN model

Mackenzie 河口北邻 Beaufort 海, 为北冰洋的第二大三角洲河口, 具有独特的地理、生态和气候条件, 蕴含丰富的油气资源和潜在的北极西北航道资源。随着全球气候变暖, Beaufort-Mackenzie 海域呈现开冰期时间增长、开冰海域范围增大的趋势, 海浪强度也随之逐渐加强。过去的几十年里夏季北极海冰范围呈逐年下降趋势, Beaufort-Mackenzie 海域每年 6—11 月为开冰期, 8—10 月最易受风暴影响。风暴期间海面大量浮冰

基金项目: 国家自然科学基金项目(51920105013)

作者简介: 徐福敏(1967—), 女, 教授, 博士, 主要从事河口海岸水动力研究。E-mail: fmxu@hhu.edu.cn

引用本文: 徐福敏, 吴宏, 李钺, 等. 风暴期间 Beaufort-Mackenzie 海域海冰对海浪强度的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 107-114.

XU Fumin, WU Hong, LI Cheng, et al. Influence of sea ice on wave intensity during an arctic storm in Beaufort-Mackenzie Sea area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 107-114.

在海洋动力作用下剧烈运动^[1],显著改变了风浪的发展状态^[2]。根据美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)的再分析数据,该海域风暴类型有3类^[3]:西北向北极风暴最强、最频繁(58.1%),西南向太平洋风暴次之(27.4%),东向风暴发生频率最低(14.5%)。风暴作用下 Beaufort-Mackenzie 海域海冰对海浪的影响是亟须解决的现实问题。在高纬度极地海域,海冰是研究风浪成长、海浪传播的关键因素。开冰海域,海冰对海浪的影响分为两个方面:①海冰直接通过散射和耗散影响海浪能量,使能量在各方向重新分布,尤其在浮冰尺寸与海浪波长相当的冰区,沿波向的能量传递是影响海浪强度的重要因素,而尺寸远小于波长的浮冰其黏性影响占主导^[4];海冰通过摩擦等方式损耗能量,海浪的能量衰减与海冰类型、密集度及厚度等因素相关^[5-7]。②覆盖海面上的海冰通过改变风区大小间接影响风能输入^[8],海冰影响范围自海冰边缘可远达上百千米^[9]。

海浪数值模拟模型有 TOMAWAC 模型、缓坡方程、Boussinesq 方程、SWAN 模型和 WWⅢ模型等^[10-11]。SWAN 模型和 WWⅢ模型均包括海冰作用机理并能合理模拟海冰影响区域海浪能量的散射、耗散和风浪成长。Swail 等^[12]基于自研第三代海浪模型进行了北冰洋至 Beaufort 海加拿大海域的海浪操作预报,Hoque 等^[13]采用 SWAN 模型研究了 Mackenzie 河口海域暴风浪,二者均将密集度大于或等于 50% 的海冰等同于陆地边界。Gemmrich 等^[14]建立 Beaufort 西北海域的 WWⅢ模型,讨论了不同海冰密集度作为模型固定边界的情况,结果表明 50%、30% 的海冰密集度模拟得到的结果较为合理。上述将某种密集度的海冰作为模型固定边界的方法实质上是通过控制风区影响风能输入。SWAN 模型和 WWⅢ模型也提供了包括海冰类型、密集度及尺寸的海冰模式以模拟海冰对海浪的影响^[15-16]。

迄今为止,极地海域海浪操作预报基本上以某种密集度的海冰作为模型固定边界进行处理,而具体的设置方案(如边界海冰密集度的确定)缺乏统一标准,且数值模型模拟冰区海浪的海冰时间分辨率过低(如 7 d),无法精细复演 3~7 d 风暴过程中的海冰、海浪的急剧变化。同时,极地海域海冰对海浪能量的散射和耗散作用仍然需要深入研究。本文以 Beaufort-Mackenzie 海域为研究对象,基于 2008 年开冰期实测风、浪和逐日冰情数据选取典型北极风暴,对风暴期间海冰对海浪的影响进行模拟研究,以期能实现极地海域海冰作用下海浪的精细化模拟。

1 Beaufort-Mackenzie 海域观测数据

Beaufort-Mackenzie 海域有两个海浪测点(Site01 和 Site11)记录逐时海浪有效波高和峰周期,一个风观测站(Pelly 站)记录逐时风速和风向,如图 1 和表 1 所示。

1.1 2008 年开冰期风、海浪观测数据

图 2 为 Pelly 站开冰期(2008 年 6 月 1 日至 11 月 1 日)风速、风向(风向采用笛卡尔坐标,以东方向为 0°,逆时针旋转。下同),期间平均风速为 6.06 m/s,最高风速为 16.94 m/s,风向为 WNW 向(10 月 8 日)。图 3 为开冰期测点 Site01、Site11 的海浪有效波高和峰周期,Site01 和 Site11 的海浪观测数据由加拿大渔业海洋部(Department of Fisheries and Oceans, Canada)提供。测点 Site01 的海浪有效波高和峰周期平均值分别为 0.97 m、5.10 s,期间极端海浪包括 8 月 1 日和 10 月 8 日的两次有效波高峰值,最大有效波高及其对应的峰周期分别为 4.47 m、10.17 s(10 月 8 日)。测点 Site11 的海浪有效波高和峰周期(9 月 11 日至 10 月 5 日记录缺失)平均值分别为 0.78 m、4.60 s,最大有效波高及其对应的

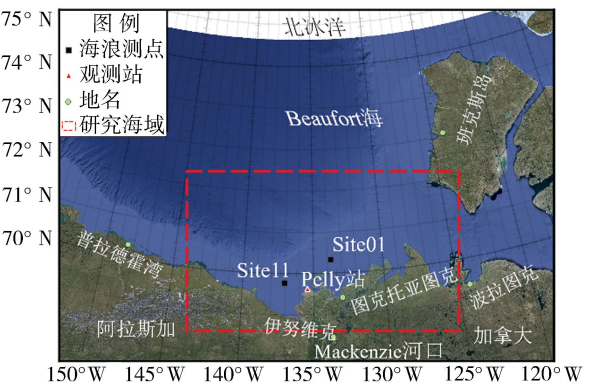


图 1 Beaufort-Mackenzie 海域及观测点位置
Fig. 1 Beaufort-Mackenzie Sea and observation stations

表 1 海浪测点和风观测站基本信息

Table 1 Basic information of wind and wave observation stations

测点、观测站	纬度	经度	水深/m	观测时段	时间分辨率/h
Site01	70°20'N	133°45'W	55	2008-06-04 至 2008-10-26	3
Site11	69°46.47'N	137°2.72'W	32	2008-06-01 至 2008-10-21	3
Pelly 站	69°37.95'N	135°26.63' W		2008-01-01 至 2008-12-31	1

峰周期分别为4.1 m、9.97 s (10 月 8 日)。基于 2008 年 Beaufort-Mackenzie 海域开冰期风、海浪观测数据,2008 年 10 月 5—8 日期间强烈 WNW 向北极风暴事件引起了 2008 年开冰期最大有效波高和最大峰周期,且该风暴类型为 Beaufort-Mackenzie 海域最频繁发生的典型西北向北极风暴,因此本文选取该风暴进行风暴期间海冰对海浪的影响研究。

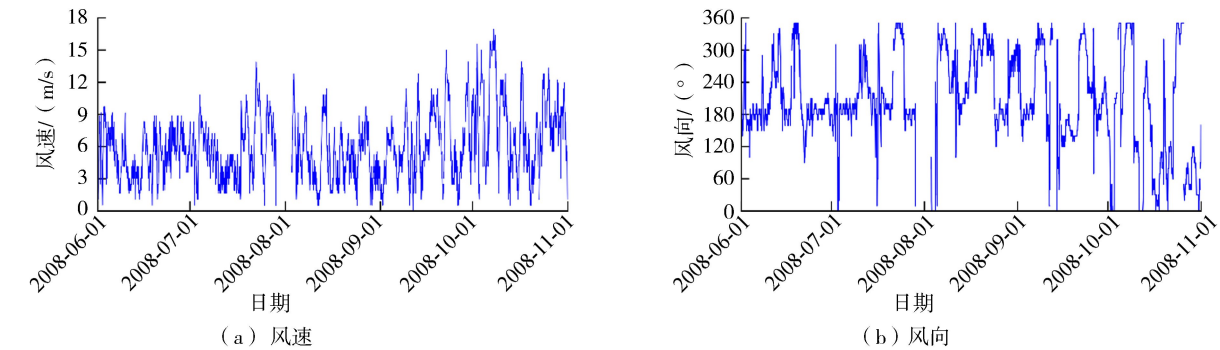


图 2 Pelly 站开冰期风速和风向

Fig. 2 Wind speed and wind direction at Pelly station during open water season

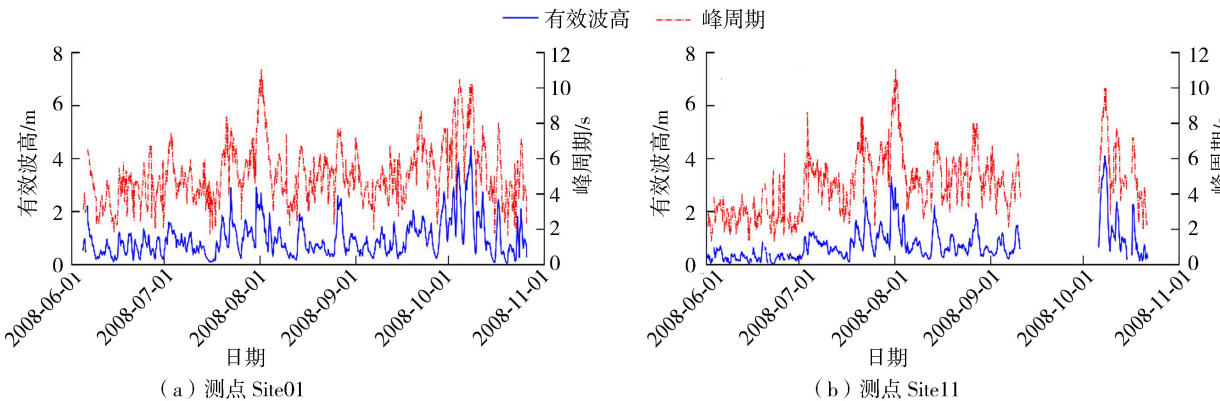


图 3 测点 Site01、Site11 开冰期有效波高和峰周期

Fig. 3 Significant wave height and peak period at Site01 and Site11 stations during open water season

1.2 2008 年 10 月 5—8 日的 WNW 向北极风暴

图 4 为 2008 年 10 月 5 日 0 时至 10 月 10 日 0 时 Pelly 站逐时观测风速、风向,可见自 2008 年 10 月 6 日 12 时至 10 月 8 日 12 时,风速超过 16 m/s,方向为 WNW (−30° ~ −10°),以较稳定风速、风向维持近 48 h。作为研究海域典型的北极西北风暴,该风暴不仅在研究海域引发强浪,同时也造成海冰短期内大幅度运移和变化,海冰的剧烈变化反过来又影响该海域的海浪强度。

1.3 风暴期间的海冰运动

图 5 为风暴期间典型时刻逐日海冰(海冰数据来自加拿大海冰服务中心)。图 5 中左下方和右下方的蛋码图,第一行为该字母区域内海冰总密集度,第二行对应海冰从厚至薄的海冰密集度,第三行为海冰发展阶段,第四行为海冰形态。由图 5 可知,风暴期间不同密集度的海冰均随着 WNW 风向岸移动且海冰密集度分布变化剧烈。总体上海冰中间密集度(接近 90%)大于边缘海冰密集度(10 月 5—10 日分别为 60%、50% ~ 40%、30% ~ 10%、30% ~ 10% 和 40% ~ 10%),近岸侧边缘海冰密集度大于左上侧边缘海冰密集度,最小值均位于左上侧边缘(10 月 6—10 日分别 40%、40%、10%、10%、10%)。海冰发展阶段均以一年薄冰第二阶段冰为主(50 ~ 70 cm 厚度),有很少的新冰(<10 cm 厚度)。海冰形态基本为中间海冰尺寸大于边缘海冰尺寸,除了 10 月 5 日存在较少的巨大浮冰(>10 km, B、D 和 G 区)外,6—10 日中间海冰大部分为大浮冰(500 ~ 2 000 m)和庞大浮冰(2 ~ 10 km),边缘海冰以中浮冰(100 ~ 500 m)和小浮冰(20 ~ 100 m)为主。

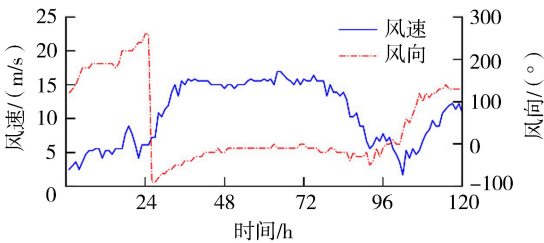


图 4 2008 年 10 月 5—10 日 Pelly 站的风速、风向

Fig. 4 Observed wind velocity and wind direction at Pelly Island from Oct. 5 to Oct. 10, 2008

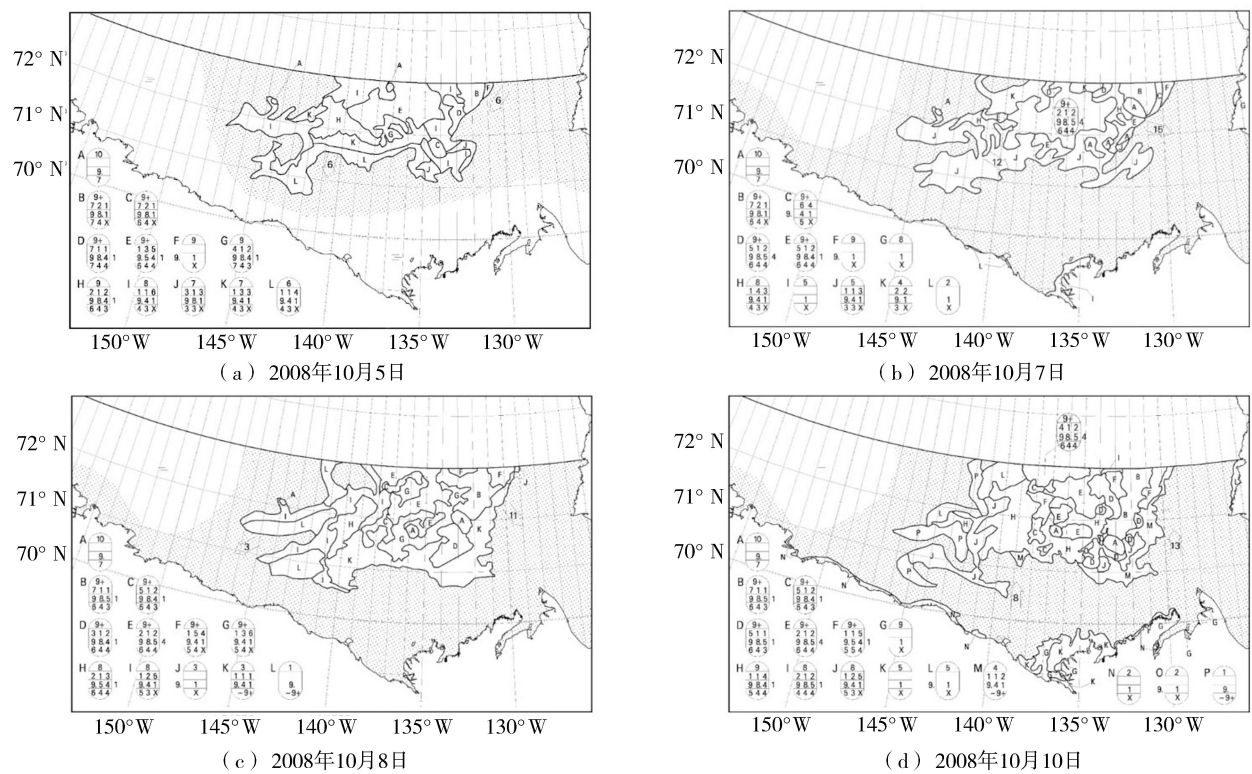


图5 风暴期间逐日海冰
Fig.5 Daily sea ice during an arctic storm

基于2008年10月5—8日研究海域逐日冰情数据(图5),得到该风暴期间逐日海冰边缘变化(图6),其中P1、P2和P3为在海冰边缘附近左侧、中部和右侧选取的3个控制点。由图6可知,在此次西北风暴事件中海冰边缘变化明显,冰缘短期内向岸剧烈运动,基本和风向一致,尤其在风速变化最大的10月7—8日,冰边缘移动幅度最大。

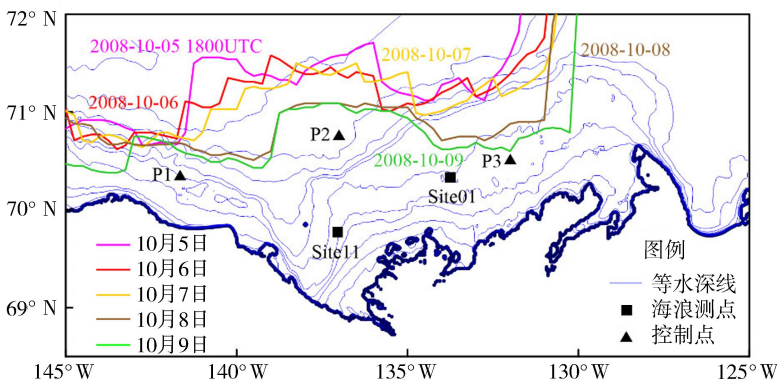


图6 风暴期间逐日海冰边缘变化
Fig.6 Daily sea ice edge changes during an arctic storm

2 数值模拟

Beaufort-Mackenzie 海域的顺时针旋转 Beaufort 环流和最大潮差为 0.37 m 的潮汐对海冰、海浪的影响较小^[17-18],海浪是该海域主要海洋动力因素。本文以 SWAN 模型模拟在风暴、海冰作用下 Beaufort-Mackenzie 海域的海浪。

2.1 海冰模式

海冰对海浪的影响分为直接影响和间接影响,尽管海冰对海浪的影响至今并未达到准确衡量的程度,但直接影响和间接影响仍然可由经验公式进行较为合理的表示。海冰引起的海浪能量直接耗散和转移,采用基于 Collins 等^[19-20]的海浪耗散模式,该方法也可以应用于 WWⅢ模型海浪与海冰之间相互作用研究。

能量的衰减率为

$$D_{ice} = S_{ice}/E = -2c_gk \tag{1}$$

其中

$$k(f) = c_0 + c_1f + c_2f^2 + c_3f^3 + c_4f^4 + c_5f^5 + c_6f^6$$

式中: S_{ice} 为海冰引起的损耗项; E 为海浪能量谱, E 、 S_{ice} 随着海浪频率和方向发生变化; c_g 为群速度; k 为随频率变化的波幅空间的线性指数衰减率; f 为海浪频率; $c_0 \sim c_6$ 为自定义参数。

海冰对海浪的间接影响表现为由于海冰的存在减小了风能输入,对风能输入的影响体现在海冰密集度的变化,修正后的风能输入项可表示为 $(1-\alpha_{ice})S_{in}$,其中 α_{ice} 为海冰密集度,在 0 ~ 1 之间, S_{in} 为风能输入项。

2.2 模型计算域及参数设置

SWAN 模型在 Beaufort-Mackenzie 海域的计算域范围为 $-145^{\circ}\text{W} \sim -125^{\circ}\text{W}$, $72^{\circ}\text{N} \sim 68.5^{\circ}\text{N}$ (空间分辨率 $1' \times 1'$, 网格节点数为 1201×212)。二维谱空间的方向分辨率为 10° , 频率范围为 $0.04118 \sim 1\text{ Hz}$, 频率网格数为 32, 呈对数分布。模拟时段为 2008 年 10 月 5—10 日, 时间步长为 5 min。海底地形在 Mackenzie 河口采用最新观测的 100 m 分辨率的地形数据 (来自 Natural Resources Canada), Mackenzie 河口外 Beaufort 海域采用 Etopo1 地形数据。驱动风场采用 Pelly 站的实测逐时风速和风向数据。

模型的物理机制包括风能输入、白浪损耗、波与波之间非线性相互作用和海冰损耗项。其中风能输入和白浪损耗采用 Komen 等^[21]的方法获取; 四小波和三小波相互作用采用 Eldeberky^[22]方法; 根据 Xu 等^[23]对 Beaufort-Mackenzie 海域的风浪研究, 本文采用 Collins^[24]底摩擦模式 (摩擦系数为 0.006) 和 Battjes 等^[25]水深变浅引起的破碎模式 (破碎参数为 0.55) 进行 SWAN 模型海浪模拟。

模型的海冰损耗项参见文献[26], 考虑了研究海域海冰密集度、发展状态和尺寸等参数信息。由于 Beaufort-Mackenzie 海域风暴期间外围海冰以中、小块浮冰为主, 且外围海冰密集度低于中心海冰密集度, 海冰厚度基本为 50 ~ 70 cm, $c_0 \sim c_6$ 分别取 0、0、 1.06×10^{-3} 、0、 2.30×10^{-2} 、0 和 0。海冰密集度时空动态变化分析基于 Beaufort-Mackenzie 海域 2008 年 10 月 5—10 日的逐日海冰观测数据。

2.3 海浪模型分析与验证

2.3.1 海冰环境下作为海浪模型固定边界的适宜海冰密集度

为考察不同海冰密集度作为模型边界对模拟结果的影响, 以边缘海冰 (约 10%) 和 40%、50%、60%、70% 海冰密集度作为模型边界和无海冰环境进行 3 个控制点 (图 6 中 P1、P2 和 P3) 的海浪数值模拟, 得到 3 个控制点的有效波高和峰周期, 如图 7 和图 8 所示。

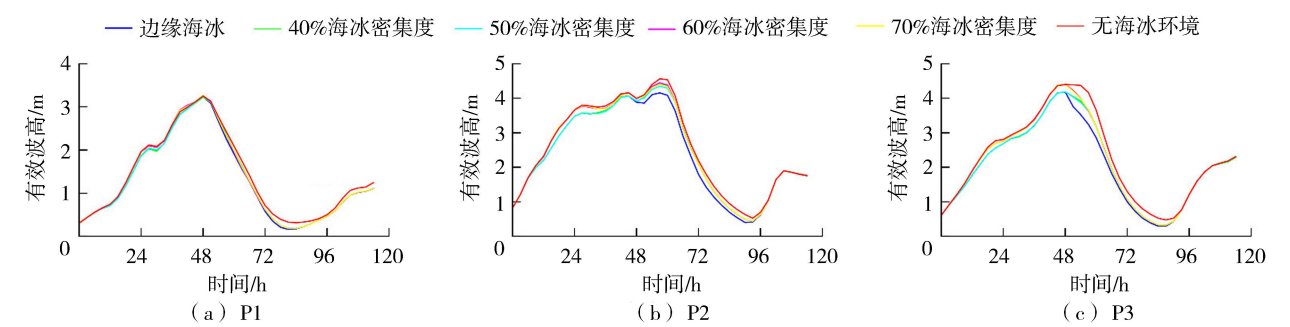


图 7 风暴期间 3 个控制点模拟有效波高

Fig. 7 Simulated significant wave height at three controlling points during arctic storm

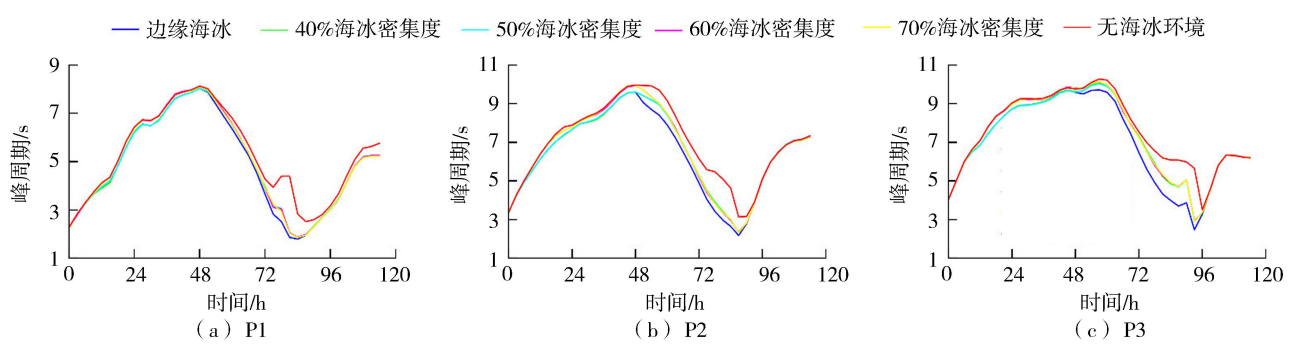


图 8 风暴期间 3 个控制点模拟峰周期

Fig. 8 Simulated peak period at three controlling points during arctic storm

在以边缘海冰和 40%、50%、60%、70% 海冰密集度为模型边界时模拟结果均低于无海冰情形的模拟结果, P2 点差距最大, P3 点次之, P1 点偏离最小。在强 WNW 风持续阶段 (10 月 7 日 0:00 至 10 月 8 日 12:00), 海冰对海浪的影响逐渐增大, 尤其峰周期受海冰影响比有效波高更强烈。以边缘海冰作为模型边界时有效波高

和峰周期的模拟结果最小,无海冰情形下最大,40%、50%、60%、70%海冰密集度作为模型边界时模拟结果相近。

2.3.2 模型验证

以边缘海冰和40%、50%、60%、70%海冰密集度作为模型边界和无海冰情形进行海浪数值模拟,得到测点 Site01 和 Site11 处的有效波高和峰周期。由于测点 Site01 和 Site11 离海冰边缘距离远,海冰对海浪的直接和间接影响在测点 Site01 和 Site11 处不明显,导致边缘海冰和40%、50%、60%、70%海冰密集度为模型边界和无海冰情形下两个测点模拟结果相近。在此将以50%密集度海冰作为模型边界(以下简称“模式1”)的模拟结果以及考虑实际海冰信息(密集度、发展阶段和尺寸信息)的海冰模式(以下简称“模式2”)模拟结果与实测值进行比较和验证,结果如图9所示。

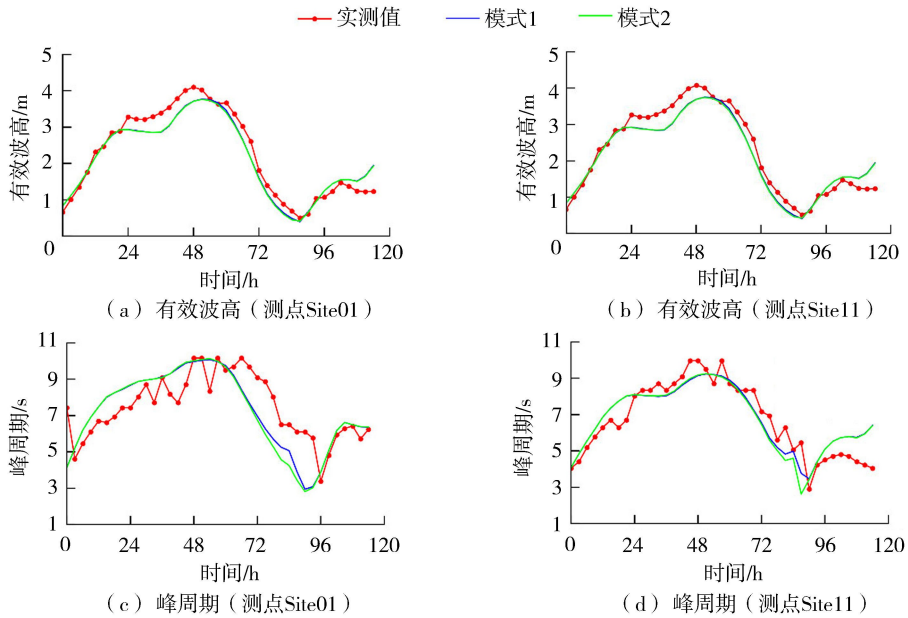


图9 风暴期间测点 Site01、Site11 的有效波高、峰周期

Fig.9 Significant wave height and peak period at Site01 and Site11 stations during arctic storm

无论以实际海冰信息(密集度、发展阶段和海冰尺寸信息)的海冰模式还是50%海冰密集度为模型固定边界进行数值模拟,两者结果相近,两个测点模拟结果和实测海浪数据吻合良好,尤其有效波高模拟结果相差不大。10月8日前的模拟峰周期在测点 Site01 和 Site11 处相近,10月8日后以实际海冰信息的海冰模式模拟的结果略低于50%海冰密集度为固定边界的模拟结果。图5表明10月7—8日的海冰运动强烈,至9日已有部分海冰运动到西侧近岸处,虽然密集度不大(10%),但也在一定程度上阻挡了西北向传来的海浪,导致峰周期比50%海冰密集度为固定边界模拟的结果偏低,与实测峰周期更为接近,该现象在测点 Site11 更明显。

无论以实际海冰信息(密集度、发展阶段和海冰尺寸信息)的海冰模式、50%海冰密集度为固定边界进行数值模拟均能在海岸水域得到较为合理结果。本文模拟基本在较强和WNW向稳定风况下,测点 Site01 和 Site11 均离海冰距离较远,且处于风向的正向影响范围内,因此有效波高模拟结果较为相近,峰周期在10月8日后略有差别。可以预见风暴作用下海冰剧烈运动将大幅度影响海浪的传播,以50%海冰密集度作为固定边界进行模拟时在海冰边缘、不同海冰密集度之间和海冰间隙等位置的海浪模拟准确度将会受到影响,因此精确模拟风暴期间海冰对海浪的影响以实际海冰信息的海冰模式更为合理。

2.4 模拟结果与分析

图10为风暴期间典型时刻(2008年10月5—8日和风暴峰值过后)以实际海冰信息的海冰模式模拟得到的 Beaufort-Mackenzie 海域逐日海浪有效波高分布。基于2008年10月5—10日 Pelly 站的观测风速、风向(图4)和风暴期间 Beaufort-Mackenzie 海域的逐日海冰边缘变化(图6),对研究海域风暴期间海浪强度进行分析。5—6日风向从东南转向东北($120^{\circ} \sim 250^{\circ}$),风速从2 m/s增大至7 m/s,海浪强度偏低;6日起风向从东北转向西北($250^{\circ} \sim 310^{\circ}$),风速从7 m/s增大至16 m/s,海冰向岸方向有所移动,强风在沿岸生成较强海

浪;6 日 12:00 到 8 日 12:00 风速、风向基本稳定(风速约为 16 m/s,风向大致呈西北向(330°)),海冰向岸运动强烈,强风在 Beaufort-Mackenzie 中部和右侧海域生成强浪;9 日风向转为西向,风速约为 7.5 m/s,在 Beaufort-Mackenzie 海域右侧海浪较大;9—10 日风速增大至 12 m/s,风向从西向北转向南向(0°~95°),在海冰边缘处生成较强海浪。海浪强度变化趋势主导因素为风速、风向,但海冰密集度、发展阶段、尺寸及运动变化也影响海浪的传播与发展。以实际海冰信息的海冰模式进行数值模拟不仅能得到的 Beaufort-Mackenzie 海域海浪分布,在海冰边缘、不同密集度海冰间隙之间均能得到细致的海浪强度分布。

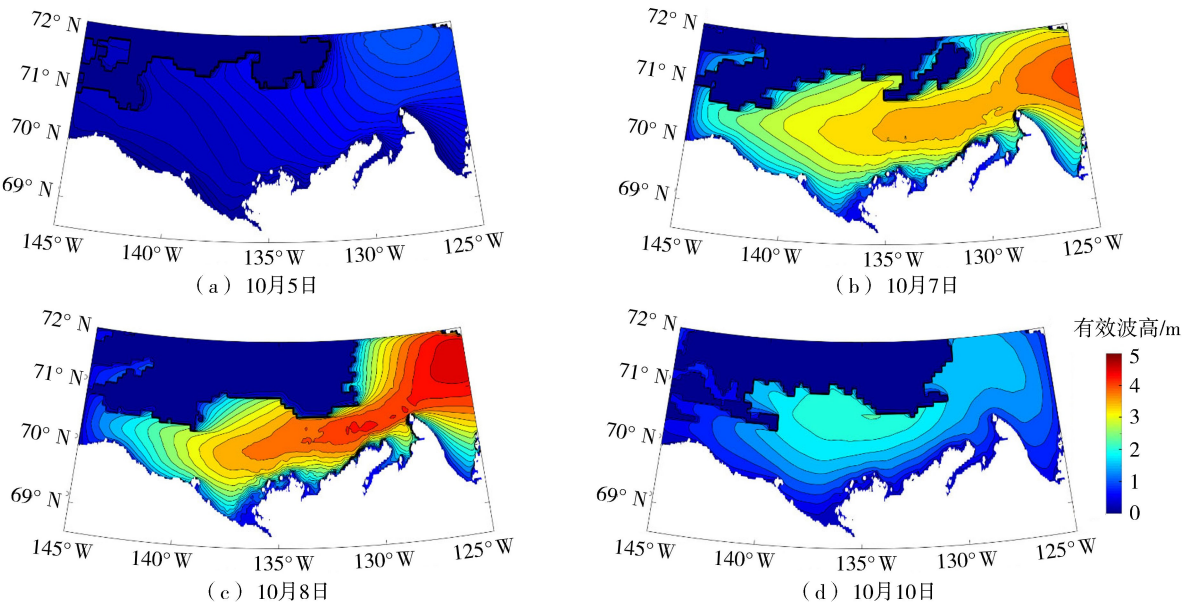


图 10 风暴期间和风暴峰值过后 Beaufort-Mackenzie 海域海浪有效波高模拟结果

Fig. 10 Simulated significant wave height distributions at Beaufort-Mackenzie region during and after arctic storm

3 结 论

- a. Beaufort-Mackenzie 海域海冰边缘、海冰密集度和尺寸在西北风暴期间经历剧烈变化,海冰短期内随风向岸剧烈运动,风速最大时冰缘向岸移动幅度最大。风暴过程中海冰中心密集度和海冰尺寸总体大于边缘海冰密集度和海冰尺寸,海冰发展阶段以 50 ~ 70 cm 厚度的一年薄冰第二阶段冰为主,边缘海冰尺寸以中浮冰(100 ~ 500 m)和小浮冰(20 ~ 100 m)为主。
- b. 风暴期间(2008 年 10 月 5—8 日),海冰边缘附近的海浪受海冰影响更大,以边缘海冰作为模型边界时有效波高和峰周期模拟结果最小,无海冰情形下模拟结果最大,40%、50%、60% 和 70% 海冰密集度为模型边界时无论在海冰边缘附近还是离海冰较远的海岸水域模拟结果均相近。以 50% 密集度海冰为固定边界和涵盖实际海冰信息的海冰模式进行模拟,二者均在离海冰较远的海岸水域得到较为合理结果。
- c. 精确模拟风暴期间海冰对海浪的影响以涵盖实际海冰信息(密集度、发展阶段和尺寸信息)的海冰模式为佳。以实际海冰信息的海冰模式进行数值模拟能得到合理的海浪分布,无论在海冰边缘、远离海冰的水域以及海冰间隙之间均能得到精细的海浪强度。
- d. 以涵盖实际海冰信息的海冰模式模拟得到了 Beaufort-Mackenzie 海域逐日海浪有效波高分布,风暴期间风速、风向、海冰的剧烈变化导致该海域海浪的强度、分布也发生剧烈变化,风速、风向、海冰及海冰边缘的移动均影响海浪的传播与发展,最大海浪发生在风暴期间风速最大时段(10 月 7—8 日)。

参考文献:

[1] SERREZE M C, BARRETT A P. The summer cyclone maximum over the central Arctic Ocean[J]. Journal of Climate, 2008, 21 (5): 1048-1065.

[2] 管长龙,李静凯,刘庆翔. 海冰对海浪影响研究综述[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4): 594-604. (GUAN Changlong, LI Jingkai, LIU Qingxiang. A review on the effect of sea ice on ocean waves[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4): 594-

604. (in Chinese))

[3] HUDAK D R, YOUNG J M C. Storm climatology of the southern Beaufort Sea[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2002, 40(2):145-158.

[4] SQUIRE V A. Ocean wave interactions with sea ice: A reappraisal[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2020, 52:37-60.

[5] MEYLAN M H, BENNETTS L G, MOSIG J E M, et al. Dispersion relations, power laws, and energy loss for waves in the marginal ice zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(5):3322-3335.

[6] WAHLGREN S, THOMSON J, BIDDLE L C, et al. Direct observations of wave-sea ice interactions in the Antarctic Marginal Ice Zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2023, 128(10):e2023JC019948.

[7] THOMSON J, HOŠEKOVÁ L, MEYLAN M H, et al. Spurious rollover of wave attenuation rates in sea ice caused by noise in field measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(3):e2020JC016606.

[8] 李姝彤, 窦挺峰, 效存德. 海冰覆盖度变化下北冰洋海浪研究进展[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(1):118-127. (LI Shutong, DOU Tingfeng, XIAO Cunde. Research progress for the changes of Arctic Ocean surface wave with diminishing sea ice[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(1):118-127. (in Chinese))

[9] ARDHUIN F, OTERO M, MERRIFIELD S, et al. Ice breakup controls dissipation of wind waves across Southern Ocean sea ice [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(13):e2020GL087699.

[10] 张振伟, 刘必劲, 邹志利, 等. 高阶 Boussinesq 型水波方程色散和变浅性能的改进[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(2):37-44. (ZHANG Zhenwei, LIU Bijin, ZOU Zhili, et al. Improvement of dispersion and shoaling property of a set of high-order Boussinesq-type equations[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(2):37-44. (in Chinese))

[11] 刘凡, 陆小敏, 徐丹, 等. 海浪预报方法研究进展[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(5):387-393. (LIU Fan, LU Xiaomin, XU Dan, et al. Research progress of ocean waves forecasting method [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(5):387-393. (in Chinese))

[12] SWAIL V R, CARDONE V J, CALLAHAN B, et al. The MSC Beaufort wind and wave reanalysis[C] //Proc. 10th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and Coastal Hazard Symposium. Oahu, Hawaii: WMO/IOC Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology, 2007:1-22.

[13] HOQUE M A, PERRIE W, SOLOMON S M. Evaluation of two spectral wave models for wave hindcasting in the Mackenzie Delta [J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 62:169-180.

[14] GEMMICH J, ROGERS W E, THOMSON J, et al. Wave evolution in off-ice wind conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(8):5543-5556.

[15] COOPER V T, ROACH L A, THOMSON J, et al. Wind waves in sea ice of the western Arctic and a global coupled wave-ice model[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2022, 380(2235):20210258.

[16] 张娜, 余鑫, 吴新荣, 等. 西北航道夏季气旋登陆期间海冰对波浪的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2023, 54(3):625-633. (ZHANG Na, YU Xin, WU Xinrong, et al. Impact of sea ice on waves during the landfall of summer cyclone in the northwest passage[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, 54(3):625-633. (in Chinese))

[17] HENRY R F, HEAPS N S. Storm surges in the southern Beaufort Sea[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1976, 33(10):2362-2376.

[18] KULIKOV E A, RABINOVICH A B, CARMACK E C. Barotropic and baroclinic tidal currents on the Mackenzie shelf break in the southeastern Beaufort Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C5):C05020.

[19] COLLINS C O, ROGERS W E, LUND B. An investigation into the dispersion of ocean surface waves in sea ice [J]. *Ocean Dynamics*, 2017, 67(2):263-280.

[20] ROGERS W E. Implementation of sea ice in the wave model SWAN[R]. Arlington: Naval Research Laboratory, 2019.

[21] KOMEN G J, CAVALERI L, DONELAN M, et al. Dynamics and modelling of ocean waves[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

[22] ELDEBERKY Y. Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone[D]. Delft: Delft University of Technology, 1996.

[23] XU Fumin, PERRIE W, SOLOMON S. Shallow water dissipation processes for wind waves off the Mackenzie Delta [J]. *Atmosphere-Ocean*, 2013, 51(3):296-308.

[24] COLLINS J I. Prediction of shallow-water spectra[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(15):2693-2707.

[25] BATTJES J A, JANSSEN J P F M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves[C] //Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering. Hamburg: American Society of Civil Engineers, 1978:569-587.

[26] MEYLAN M H, BENNETTS L G, KOHOUT A L. In situ measurements and analysis of ocean waves in the Antarctic marginal ice zone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(14):5046-5051.