



基于浮标观测与数值模拟的2023-2025年渤海冬季结冰期海浪特征分析

吴鸿轩, 岳澈, 李静凯, 马昕, 马也驰, 李锐

The wave feature analysis of Bohai Sea in winter of 2023–2025 based on buoy measurements and numeric modeling

Wu Hongxuan, Yue Che, Li Jingkai, Ma Xin, Ma Yechi, Li Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb20260008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

台湾海峡有效波高的SWAN模式与ERA-Interim数据对比分析

Comparative analysis of SWAN model and ERA-Interim data on significant wave height in the Taiwan Strait
海洋学报. 2021, 43(12): 15–25 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021173>

强海况下波流相互作用对有效波高的影响研究

The study of the influences of wave-current interaction on significant wave height under serious sea conditions
海洋学报. 2023, 45(7): 1–7 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023121>

基于WW3的南海北部有效波高时空变化及其极值重现期估算方法分析

Analysis of the spatio-temporal variations of significant wave height in the northern South China Sea and the return period estimation methods of its extreme based on WW3
海洋学报. 2023, 45(2): 13–26 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023045>

基于SAR图像速度聚束调制的海浪反演研究

Ocean wave inversion based on the velocity bunching modulation of SAR image
海洋学报. 2021, 43(12): 111–121 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021103>

基于高度计和漂流浮标数据的墨西哥湾东南部暖涡融合过程研究

Investigating the anticyclonic eddy merger process in southeastern Gulf of Mexico using altimeter and drifting buoy
海洋学报. 2023, 45(11): 10–19 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023154>

影响夏季北极航道航行的近地面气象要素时空变化特征分析

Analysis on the characteristics of the temporal and spatial variation of near-surface meteorological parameters affecting the navigation in Arctic passage in summer
海洋学报. 2022, 44(11): 12–30 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022133>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴鸿轩, 岳澈, 李静凯, 等. 基于浮标观测与数值模拟的 2023–2025 年渤海冬季结冰期海浪特征分析[J]. 海洋学报, 2026, 48(2): 29–39, doi:10.12284/hyxb20260008

Wu Hongxuan, Yue Che, Li Jingkai, et al. The wave feature analysis of Bohai Sea in winter of 2023–2025 based on buoy measurements and numeric modeling[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(2): 29–39, doi:10.12284/hyxb20260008

基于浮标观测与数值模拟的 2023–2025 年 渤海冬季结冰期海浪特征分析

吴鸿轩^{1,2}, 岳澈³, 李静凯^{1*}, 马昕¹, 马也驰¹, 李锐³

(1. 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 自然资源部 宁德海洋中心, 福建 宁德 352201; 3. 自然资源部 北海预报减灾中心, 山东 青岛 266100)

摘要: 本文基于 2023–2025 年冬季投放在渤海辽东湾的共 3 个小型波浪浮标的观测数据及海浪数值模式对渤海冬季结冰期的海浪特征进行了分析。观测数据的统计结果表明, 位于渤海中部的 2 个浮标测得平均有效波高约为 1 m, 平均有效波周期约为 4~5 s。锚定于辽东湾的浮标观测显示海冰对海浪影响显著, 当海冰存在时, 平均有效波高和有效波周期为 0.2 m 和 9 s, 比无冰情况下分别减小和增大了 54% 和 98%, 而且海冰的存在还可能致谱峰波向略偏离主导风向。从数值模拟的角度来看, 相较于不考虑海冰的方案, 通过在 SWAN 模式中植入考虑冰厚的冰-浪参数化方案, 可降低波高模拟误差 33%。另外, 本文还对比了两种经典风输入项方案 Komen 与 ST6 对渤海冬季海浪的模拟效果, 两种方案的结果总体上均与浮标观测的有效波高吻合较好, 误差水平相当。本文的研究基于观测数据, 进一步丰富了人们对渤海冬季结冰期海浪特征的认知。

关键词: 渤海; 海浪模式 SWAN; 漂流浮标; 有效波高; 冬季结冰期

中图分类号: P731.22

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2026)02-0029-11

1 引言

渤海是中国最北部的半封闭内海, 其显著的季节气候变化和多样地形特征使渤海海浪复杂多变。研究渤海的海浪特性对于认识渤海的水文环境、保障人类的海上生产活动具有重大意义。观测作为渤海海浪最直接的研究手段始于 20 世纪 60 年代, 从早期的目测逐步发展为基于光学、声学测波仪、测波雷达的台站观测和基于固定浮标的定点观测。其中, 岳淑红和李广雪^[1]在塘沽海洋站利用光学测波仪测得多年海浪极值波高为 5.3 m。孙连成^[2]利用声学测波仪测得渤海湾西部年均波高为 0.57 m。Miao 等^[3]利用

渤海沿岸 8 个海洋站的长期数据对渤海海浪气候变率进行研究, 发现有效波高对气候变化的弱响应。在诸多现场观测的手段中, 波浪浮标因其高精度的数据采集、灵活的观测范围和低成本与易部署也得到了广泛的应用。龙强等^[4]利用唐山南部的固定浮标资料分析海浪特征, 发现该地海浪以风浪为主, 较大风浪集中出现在秋冬季。Wang 等^[5]利用位于渤海湾的 5 个固定浮标观测数据对欧洲中期天气预报中心的有效波高预报产品进行检验, 发现该产品对渤海的预报精度较差。为获取更大空间覆盖范围的数据, 卫星遥感也是渤海海浪观测的常用手段。王广运等^[6]利用 ERS-1 卫星散射计和 T/P 卫星高度计推算中国沿

收稿日期: 2025-09-20; 修订日期: 2026-01-29。

基金项目: 中央高校基本科研业务项目(202262005)。

作者简介: 吴鸿轩(2000—), 男, 福建省宁德市人, 从事海浪数值模拟研究。E-mail: 2570792097@qq.com

* 通信作者: 李静凯, 副教授, 主要研究海浪数值模拟、浪-冰相互作用及浪-流相互作用。E-mail: lj1105@ouc.edu.cn

海的海浪极值,发现渤海 50 年一遇波高极值出现在渤海中部。

为满足预报的实际需求,渤海海浪的数值模拟也随着理论机制的完善与数值计算技术的发展而逐渐成熟。近年来,众多学者基于第三代海浪模式针对渤海海浪开展了一系列研究。尹宝树等^[7]提出了 YW-SWP 区域海浪数值预报模式并利用其对渤海台风及寒潮期间的海浪开展数值后报。李文博等^[8]将 3 种海浪数值预报产品与 5 个浮标在渤海的观测数据进行对比,发现 WAM 模式的预报效果优于 WAVE-WATCH III 模式。黄必桂^[9]使用 SWAN 模式对渤海海浪进行模拟,并给出了适用于渤海的参数化方案。

通过观测数据和数值模拟的有机结合,人们对于渤海海浪的认识和预报都已经达到了较高的水平。然而其中绝大部分还是聚焦于没有海冰的时期与海域。理论上讲,海冰的存在会影响海浪成长的风区并对海浪的能量产生耗散,使得海浪的成长与传播和无冰情形下明显不同^[10]。刘东昂等^[11]使用 WAVE-WATCH III 模式评估了 4 种海冰模型在渤海的应用效果, Yue 等^[12]将涡黏浪-冰参数方案植入 SWAN 模式,发现在渤海冰区海浪模拟效果显著改善。尽管有了上述对数值研究的初步尝试,但是据笔者所知,目前尚没有渤海冰区内部海域海浪的现场观测,这很大程度上制约了人们对于渤海冬季结冰期海浪状况的认识。

鉴于上述研究现状,为进一步明确海冰影响下渤海冬季海浪的特征,本文聚焦于海冰最显著的辽东湾海区,于 2023 年与 2024 年冬季投放共 3 个小型波浪浮标,基于浮标观测数据对渤海冬季结冰期的海浪要素进行综合分析。同时,本文将考虑冰厚的冰-浪参数化方案植入第三代海浪模式 SWAN,对渤海冬季结冰期的有效波高进行了数值后报并与浮标的观测结果对比,量化了改进后模式对渤海冰区海浪模拟的提升效果。此外,本文还讨论了两种典型的风输入项参数化方案在渤海冬季结冰期海浪的模拟效果。

2 波浪浮标的现场观测

2.1 漂流式波浪浮标简介

本文共使用 3 个漂流式波浪浮标(下文中简称为 WB1、WB2 和 WB3),其中, WB1 浮标和 WB3 浮标是中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室与青岛海研电子有限公司联合自主研发的小型漂流式波浪浮标^[13],重约 11 kg,直径约 0.4 m,该浮标测得有效波高与波浪骑士浮标的观测结果对比,均方根误差仅有

0.08 m^[14],并多次应用于西北太平洋黑潮延伸体海区的海浪观测科考任务。WB2 是由国家海洋技术中心研发的漂流式测波浮标,重约 15 kg,直径约 0.5 m,海浪观测参数经海上比测验证亦与波浪骑士处于同一水平^[15]。WB1 浮标和 WB2 浮标于 2023 年冬季渤海及黄海北部海冰船舶观测项目中投放, WB3 浮标于 2024 年冬季中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室的渤海调查航次中投放,锚定于辽东湾中部。浮标的详细信息如表 1 所示,投放位置及运动轨迹如图 1 所示。浮标观测所得的海浪参量包括有效波高、有效波周期、谱峰波向和海浪谱等数据。需要说明的是, WB1 浮标在 1 月 19 日至 2 月 11 日等时段的观测数据包含大量高频噪声,为确保分析结果的准确性,本文在数据质量控制的过程中剔除了相应数据。另外,由于技术原因, WB1 和 WB2 浮标在部分时段缺少经纬度数据,因此图 1a 中轨迹呈现出不连续的特征。

表 1 浮标投放信息

Table 1 Information of drifting buoys

浮标编号	投放日期	投放位置	持续时间/d	观测间隔/h
WB1	2023年12月25日	40.4°N, 121.3°E	74	0.5
WB2	2024年1月28日	39.4°N, 121.2°E	24	0.5
WB3	2024年12月28日	40.6°N, 121.5°E	41	0.5

2.2 2023 年冬渤海海浪观测分析

本文首先分析 2023 年冬季投放在渤海北部的 WB1 与 WB2 的观测结果,图 2 给出了有效波高、有效波周期及对应风速的时间序列。WB1 和 WB2 测得有效波高与有效波周期的均值分别为 1.00 m 和 0.94 m 与 5.0 s 和 4.1 s,有效波高在 2024 年 1 月 10 日, 2 月 1 日, 2 月 20 日等时段出现极大值,与同时期的风速变化趋势(图 2c)基本对应,具体数据信息示于表 2。尽管属于不同系列的产品,但 WB2 与 WB1 在 2 月 16 日至 20 日期间观测的有效波高趋势是相似的,一定程度上互相验证了观测的准确性。与祁祥礼等^[16]于 2014 年冬季渤海湾的观测结果(以 0~1.25 m 的有效波高为主)对比, WB1 与 WB2 观测的有效波高更大。

除了有效波高与周期,还可通过浮标提供的海浪谱数据更好地揭示海浪能量随频率和方向的分布。图 3 展示了 WB1 浮标在 2 种不同海况下的海浪谱,其中一个为无冰期间(坐标 40.43°N, 121.34°E,有效波高约 1.0 m,当地风速约 6.0 m/s),另一个为有冰期间(坐标 40.44°N, 121.34°E,有效波高约 0.4 m,当地风速

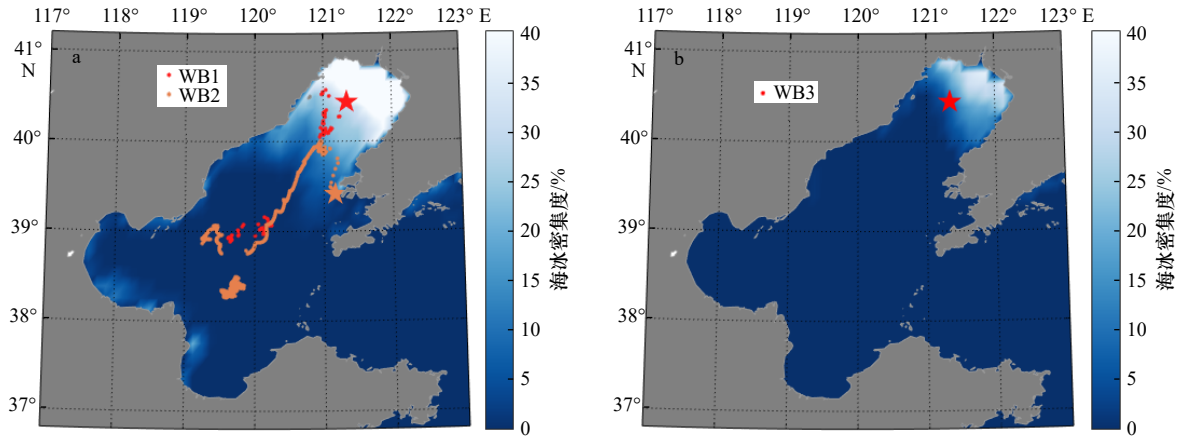


图 1 浮标轨迹示意图

Fig. 1 Tracks of buoys

圆点代表浮标运动轨迹, 星形代表浮标投放位置

a. 2023 年 12 月至 2024 年 2 月期间的平均海冰密集度, b. 2024 年 12 月至 2025 年 2 月期间的平均海冰密集度

The red dots are the tracks of drifting buoys. The stars represent the locations where the buoys deployed. Background colors represent the sea ice concentration from 1 December 2023 to 29 February 2024 (a), and from 1 December 2024 to 28 February 2025 (b)

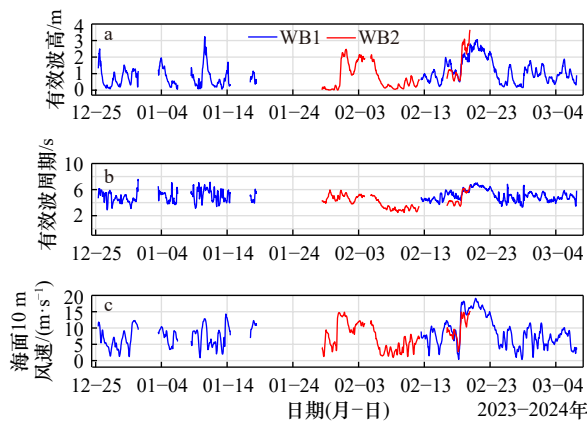


图 2 WB1 与 WB2 的有效波高(a), 有效波周期(b) 和对应海面 10 m 风速的时间序列(c)

Fig. 2 Time variation of significant wave height (a), significant period (b) and corresponding wind speed (c) of WB1 and WB2

约 1.3 m/s, 海冰密集度约为 80%)。如图 3a 中频谱所

表 2 浮标观测波高极值对应的海况

Table 2 The sea condition in buoy locations when high wave heights are observed

观测时间	浮标	浮标位置	波高/m	风速/(m·s ⁻¹)	海冰状况
1月10日14时	WB1	40.4°N, 121.3°E	3.2	12.7	临近冰区
2月01日02时	WB2	39.6°N, 120.6°E	2.5	13.3	临近冰区
2月20日00时	WB2	38.9°N, 119.3°E	3.6	15.2	远离冰区

示, 观测期间海浪的主周期均为约 6 s, 高频段的斜率约为频率的-4.5 次方, 但是无冰情况下的谱宽度明显更大。两个频谱所对应的方向谱分别示于图 3b 和 3c, 通过计算所有观测所得方向谱的扩展度^[17], 可以发现无冰期间的平均扩展度是显著低于有冰时期的。这体现出海冰在对海浪能量耗散的过程中, 能量较小的波分量, 尤其是高频波段(对应更高的衰减率)将会被更快地被耗散到极低的量值, 进而使得海浪能

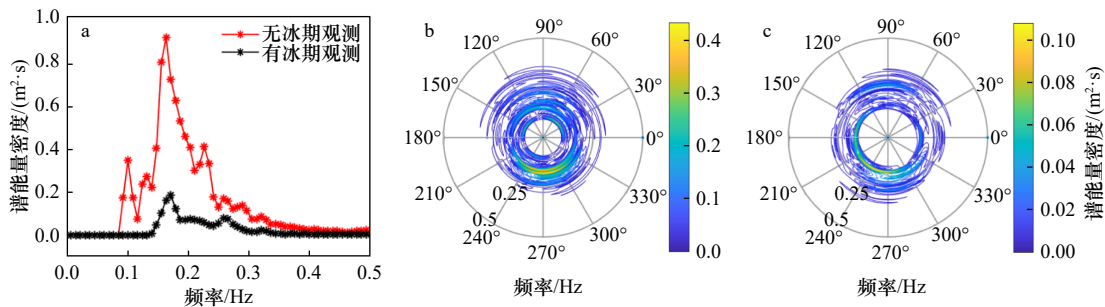


图 3 观测的海浪一维频谱(a)与二维频率方向谱(b, c)

Fig. 3 Frequency spectra (a) and directional spectra (b, c) of waves

图 a 中红色线与图 b 为 2024 年 1 月 4 日 23 时数据; 图 a 中黑色线与图 c 为 2024 年 1 月 2 日 14 时数据。图中波向为去向
The red line in Fig. a and Fig. b indicate the observed results on 4 January 2024, 23:00; the black line in Fig. a and Fig. c indicate the observed results on 2 January 2024, 14:00. The wave direction refers to the direction of propagation

量在方向分布上更为集中,这与前人的观测结果在定性上是一致的^[18-19]。

为进一步展示海浪与海面风的关系,本文利用WB2所有有效数据绘制海浪与海面10 m风速玫瑰图示于图4,结果表明测得海浪集中出现于SW和WSW,合计占比接近40%,少量出现于N,其余方向的海浪

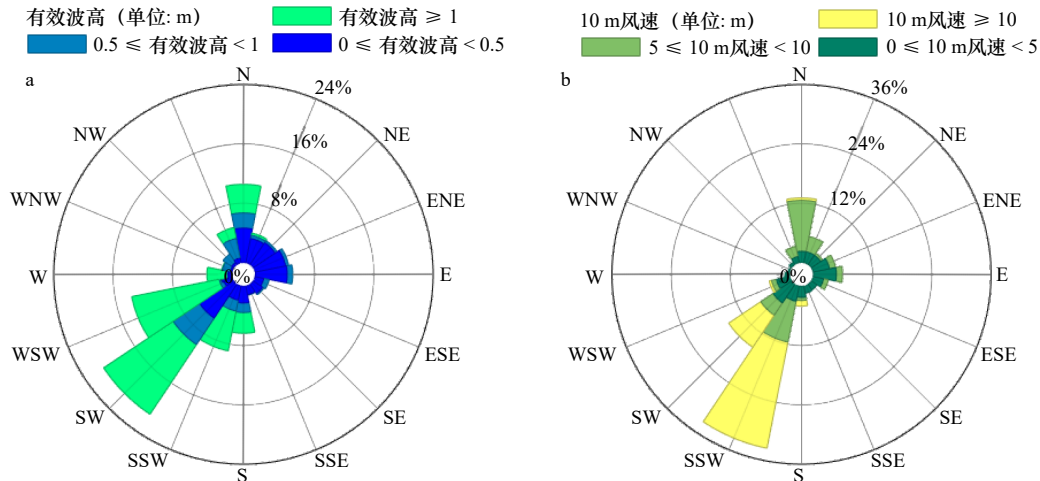


图4 WB2浮标测量的海浪玫瑰图(a)和对应的风速玫瑰图(b)

Fig. 4 Wave rose (a) and wind rose (b) figures recorded by WB2

图中波向为去向

The directions are propagating directions

2.3 2024年冬渤海海浪观测分析

与WB1和WB2浮标不同, WB3浮标于2024年冬季锚定于辽东湾中部。图5展示了WB3观测的有效波高、有效波周期及其对应的海面10 m风速和海冰密集度的时间序列。根据遥感数据集MASAM2提供的海冰密集度数据(见3.1节中数据介绍部分),在1月7日至16日,1月28日至2月5日两个时段内, WB3所在位置被海冰覆盖。期间辽东湾冬季海冰较为密集, WB3观测的有效波高较无冰期间偏低,有效周期偏大。按浮标位置有无海冰覆盖来划分, WB3浮标在无冰时段测得的平均有效波高(周期)为0.48 m (4.5 s), 有冰时段则为0.22 m (8.9 s), 显著低(高)于无冰时段, 有冰时段的有效波高相比无冰时段偏小了54%, 有效波周期则偏大了98%。这表明海冰对海浪能量的耗散作用与海冰密集度有显著的正相关性, 高密集度的海冰一方面会减小海浪的有效风区抑制海浪的成长, 另一方面会增加对海浪能量的衰减, 两种作用均会减小海浪的有效波高。同时, 由于海冰对于高频海浪的衰减更强^[21], 所以会导致冰区有效周期增大。此外, 本文还注意到1月19日至27日的无冰时段, 海浪有效波高极小、有效周期偏高且并未与风速的变化呈很高的相关性, 而且考虑到海冰本身变化的

则较少。从风速玫瑰图来看, 风向以SSW为主, 符合渤海冬季的季风特征^[20]。海浪的主要波向和次要波向与风向大致对应, 但主要波向相对主要风向偏西约20°, 该现象有可能是因为渤海湾有SW方向的开放边界, 即沿SW方向风区最大, 风浪更易在SW方向生成。

连续性, 本文推测该时段内的浮标位置实际上可能是有部分海冰覆盖的。数据集MASAM2在该时段提供

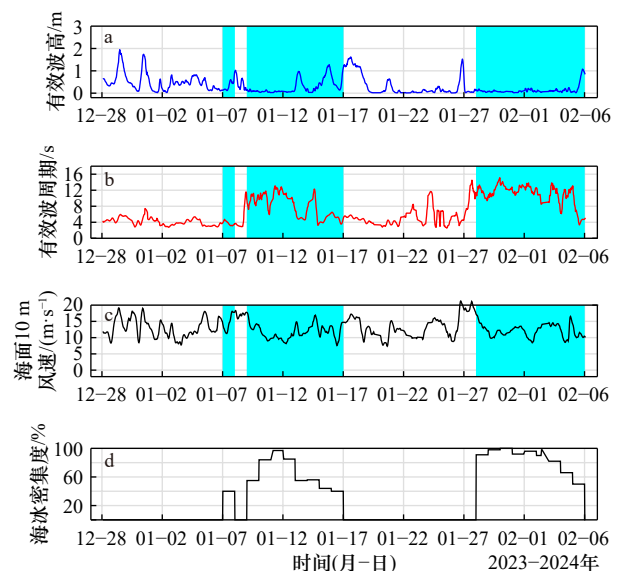


图5 WB3位置处有效波高(a)、有效波周期(b)、海面10 m风速(c)和海冰密集度(d)的时间序列

Fig. 5 Time variations of significant wave height (a), significant wave period (b), corresponding 10-m wind speed (c) and ice concentration (d) of WB3

青色背景代表浮标位置有海冰覆盖的时间段

Cyan backgrounds represent the periods when the buoy was in ice region

的海冰密集度可能有所偏差。

将 WB3 观测数据分为有冰和无冰两种情况, 并分别绘制海浪和 10 m 风速玫瑰图示于图 6。结果显示在无冰时期, WB3 所观测的谱峰波向集中在 WSW 与 SW, 而有冰时期谱峰波向则更集中在 WSW。尽管两种情况下的主导波向均与风向有所偏差, 但很明显有冰情况下的偏差更大, 可达约 60°。这充分体现出海冰覆盖对于辽东湾有效风区的影响, 使得沿海表面风的方向未必最适宜风浪的成长。

3 基于 SWAN 模式的数值模拟

缺少现场观测数据的检验和校准是长期以来制约冰区海浪数值模拟的主要问题之一, 对于渤海冬季结冰期的海浪模拟也不例外, 这导致适用于渤海冰区的参数化方案仍不成熟, 冰区海浪准确的模拟及预报

仍难以保证。为一定程度解决该问题, 本文将植入了改进海冰对海浪作用源项的 SWAN 模式应用于渤海冬季结冰期的海浪数值追算, 同时还对比了不同风输入项在冬季海浪模拟的适用性, 并将模拟结果与浮标观测数据进行了对比检验。

3.1 SWAN 模式配置

相比目前常用于海浪模拟的第三代海浪模式 WAM^[22] 和 WAVEWATCH III^[23], 第三代海浪模式 SWAN^[24] 专为浅海设计, 在源函数项的处理和数值计算上更适应近海情况, 并广泛应用于近海海浪数值模拟。本文使用的 SWAN 版本为 41.31, 该版本首次加入了海冰对海浪作用的源项, 很大程度改善了早期 SWAN 模式无法模拟海冰作用的问题。考虑到 SWAN 默认使用的 IC4M2 冰-浪参数化方案^[25] 未考虑的海冰厚度, 本文亦采用了 Meylan 等^[26] 于 2018 年提出的

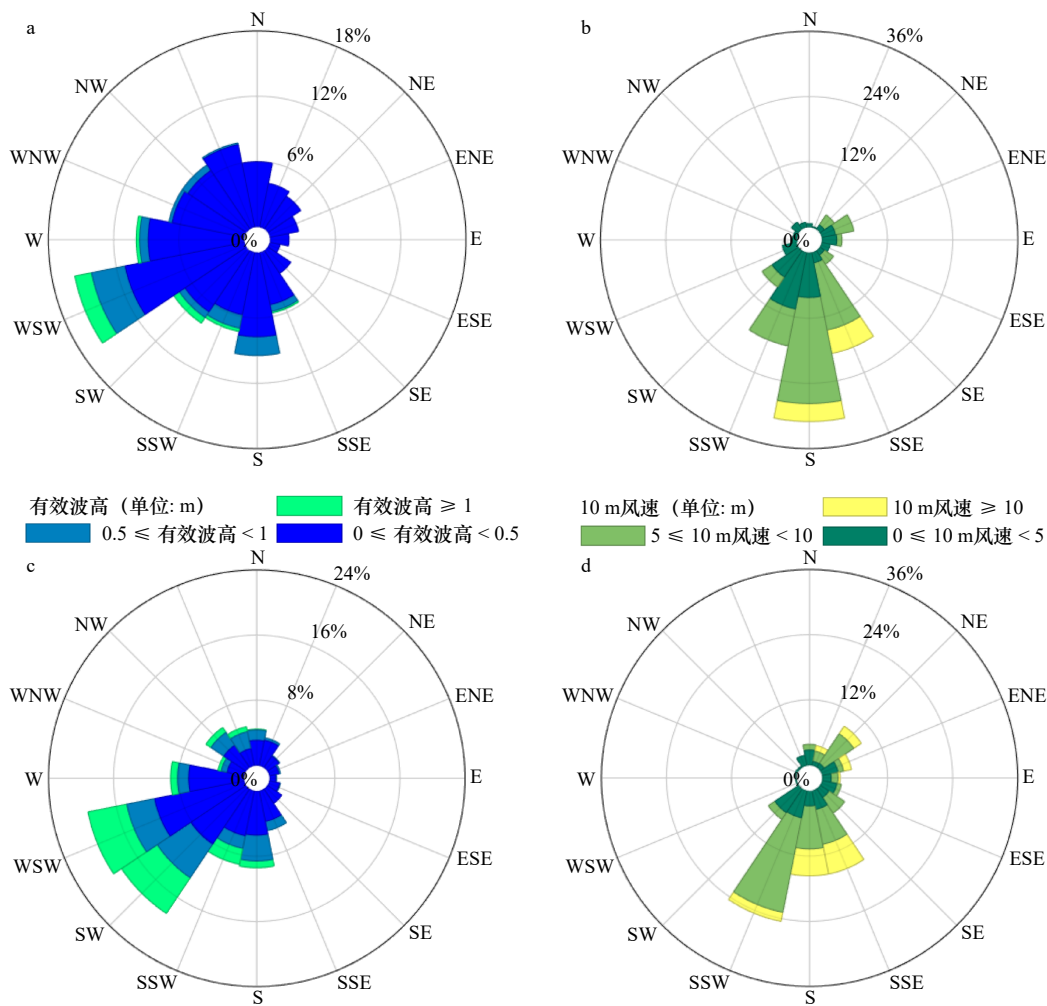


图 6 WB3 位置处海浪玫瑰图 (a, c) 和 10 m 风速玫瑰图 (b, d)
 Fig. 6 Wave rose (a, c) and wind rose (b, d) figures recorded by WB 3
 a 和 b 为有冰时期, c 和 d 为无冰时期。图中波向为去向

a, b. In the periods when the buoy was in the regions with ice. c, d. in the periods when the buoy was in the regions without ice.
 The directions are propagating directions

冰-浪参数化方案(M18 方案), 该方案海浪能量的指数衰减系数表示为 $k_i = \frac{\eta h}{\rho g^2} \sigma^3$, 其中 h 为海冰厚度, ρ 为海水密度, g 为重力加速度, σ 为波动圆频率, η 为海冰的等效黏度系数。本文模式计算中所采用的各源项方案如表 3 所示。

表 3 SWAN 源项设置

Table 3 The source terms used in the SWAN model

源项	参数化方案
风输入项	Komen ^[27] 和ST6 ^[28] 方案
白冠耗散项	Komen方案 ^[29]
三波相互作用项	LTA方案 ^[30]
四波相互作用项	DIA方案 ^[31]
底摩擦项	JONSWAP方案 ^[32]
深度诱导破碎项	Battjes和Janssen方案 ^[33]
海冰耗散项	IC4M2 ^[25] 与M18 ^[26] 方案

本文中 SWAN 计算所用的地形网格由美国国家地球物理数据中心的 ETOPO2 地形数据经线性插值构建。网格为平均分辨率约 4 km 的三角网格, 相比传统矩形网格, 其优势在于可更好地贴合岸线, 以提高近岸海浪的计算精度。网格区域为 24°~42°N, 117°~132°E, 覆盖了渤海、黄海与部分东海。模式计算中并未给渤海海域提供边界条件, 而是可以直接模拟从黄海及东海传入渤海的涌浪, 忽略从西太平洋更远处传入渤海的海浪。

强迫模式的风场及海冰厚度场均来自美国国家环境预报中心的再分析数据集 NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2), 该数据集提供的海表面 10 m 风速与海冰厚度的空间分辨率为 0.205° × 0.204°, 时间分辨率为 1 h。海冰密集度数据来自美国冰雪数据中心的遥感数据集 MASAM2: Daily 4 km Arctic Sea Ice Concentration Version 2, 空间分辨率为 4 km, 时间分辨率为 1 d。

3.2 3 种海冰源项的模拟对比

为检验 SWAN 模式中的海冰源项确实能够有效体现海冰对海浪的作用, 本文使用 3 种不同海冰源项参数化方案对 WB3 浮标处的有效波高进行了模拟, 即不考虑海冰作用的 IC0 方案, 模式内置的 IC4M2 方案和考虑海冰厚度影响的 M18 方案, 模式其余源项均保持一致, 模拟结果如图 7 所示。从图中可以看出, 对于浮标所处位置有冰覆盖的时段, 由于忽视海冰对风区以及海浪能量耗散的影响, IC0 方案显著高

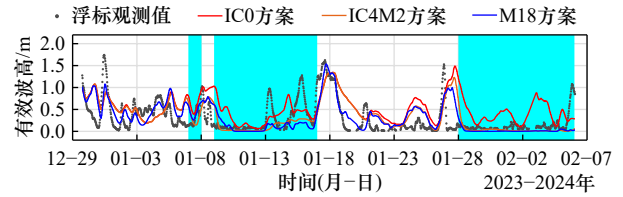


图 7 WB3 位置处, 不同冰-浪方案下的 SWAN 模式模拟波高与观测值对比

Fig. 7 Comparison of simulated significant wave height with observed wave height in different wave-ice source terms at the WB3 location

灰色圆点代表浮标观测的有效波高, 红色, 橙色和蓝色实线分别代表 IC0、IC4M2 和 M18 方案的结果, 青色背景代表 MASAM2 产品海冰覆盖时段

The grey dots represent significant wave height of buoy measurements. The red, orange and blue lines represent the results of IC0, IC4M2 and M18 schemes. Cyan backgrounds represent the period when the buoy was in ice region

估了有效波高, 而 IC4M2 方案与 M18 方案则表现较好, 二者输出的有效波高显著低于 IC0 方案且更加接近浮标观测值。但是本文也注意到对于某些波高的快速变化过程(如 12 月 31 日、1 月中旬的极值过程等), 3 种参数化方案不能很好地重现变化、均存在不同程度的低估。IC0 的结果说明这必然与驱动风场的精度有关, 另外结果也会受 2.3 节提到的 MASAM2 数据产品精度的影响。

为进一步量化对比不同冰-浪方案的后报波高, 本文计算了 3 个浮标的观测结果与模拟结果的平均误差 MD 与均方根误差 RMSE 作为评价指标:

$$MD = \frac{\sum_i^n (H_m^i - H_o^i)}{n}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (H_m^i - H_o^i)^2}{n}}, \quad (2)$$

式中, i 代表数据编号, n 代表数据总量, H_m 代表模拟波高, H_o 代表观测波高, 对应结果如表 4 所示。通过

表 4 波浪浮标对应的模拟结果与观测结果的平均误差与均方根误差 (单位: m)

Table 4 Mean deviation (MD) and root mean square error (RMSE) between observations and simulations (unit: m)

方案名	IC0		IC4M2		M18	
	MD	RMSE	MD	RMSE	MD	RMSE
WB1	0.34	0.61	0.25	0.57	0.01	0.45
WB2	0.45	0.60	0.36	0.51	0.20	0.34
WB3	0.17	0.45	0.01	0.40	-0.01	0.34

考虑海冰对有效风区的影响以及海浪能量的耗散, 相较于 IC0 方案, IC4M2 方案和 M18 方案对 3 个浮标观测值的模拟误差更小。其中, 对 WB3 而言, M18 与 IC4M2 方案的 MD 相当, 但对于 WB1 和 WB2 而言, M18 方案的 MD 和 RMSE 均更小, 其中 M18 方案可将 WB1 与 WB2 对应波高的 MD 进一步分别降低 0.24 m 与 0.16 m。在后报所针对的 3 个浮标中, 通过考虑海冰的影响, M18 方案对 WB1 的误差改善最大, 与 IC0 方案相比, 可将 MD 降低 0.33 m (33%)。这与 Yue 等^[12] 在渤海冰区边缘使用涡粘冰-浪参数方案改进 SWAN 模式得出的 32% 的误差改善量接近。

综上所述, 考虑海冰作用的 SWAN 模式对海浪波高特征的刻画要优于不考虑海冰作用的模式, 平均来看可将模拟误差降低超 0.3 m。综合考虑 MD 和 RMSE 的对比结果, M18 方案总体上优于 IC4M2 方案, 可将 IC0 方案的模拟误差降低约 33%, 因此本文在下一节将采用 M18 方案进行 SWAN 模式中两种不同风输入方案的模拟对比。

3.3 两种风输入源项的模拟对比

Komen 方案是 SWAN 模式中最常被采用的经典风输入项方案之一, 而近年来提出的 ST6 方案^[28] 被认为是物理机制更加完备且模拟精度更高的风输入源项。为评估对比 ST6 方案和 Komen 方案对于渤海冬季结冰期海浪的模拟效果, 本研究分别使用这两项方案模拟了渤海 2023 年与 2024 年冬季的海浪有效波高, 并将模拟结果与浮标观测数据进行对比。

图 8 展示了针对 2023 年冬季投放的 WB1 与 WB2 浮标位置的模拟结果, 其中观测数据缺失部分由数值模型补充。可以看出两种风输入项的参数方案均能够较好地重现浮标处有效波高的大小及变化趋势, 但对于部分极值波高的模拟误差相对较大。对于 WB1 而言, 两种方案模拟的波高相差极小, 通常不足 0.1 m, 通过比较得到 Komen 方案在 53% 的时段中优于 ST6 方案。在 2024 年 1 月 14 日之前, 两种方案对有效波高的大部分极大值的模拟均偏低, 而 2 月 12 日之后两种方案均整体高估有效波高。对 WB2 而言, ST6 方案在 54% 的情况下优于 Komen 方案。总体来看, Komen 与 ST6 方案没有显著性的差异, 在不同时期各有优势。

图 9 给出了针对 2024 年冬季锚定在辽东湾的 WB3 浮标位置的模拟结果。对于 WB3 而言, 尽管存在一定的模拟误差(如 1 月 13 日至 17 日), 但两种方案的模拟结果同样是较为接近的, 其中 ST6 方案在 55% 的时间段优于 Komen 方案。在 1 月 21 日至 26

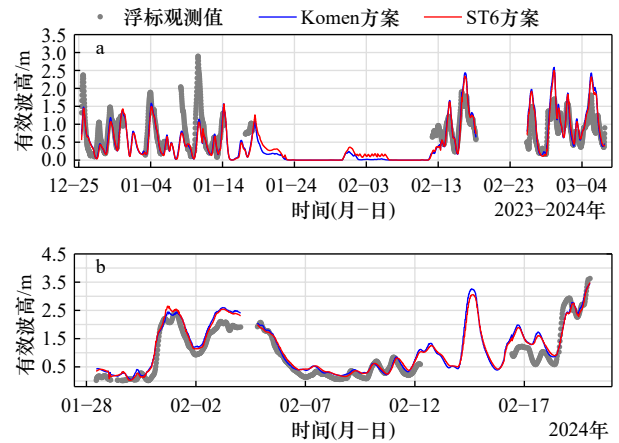


图 8 观测有效波高与 SWAN 模拟的有效波高的时间序列对比

Fig. 8 Time series comparisons of observed wave heights and simulated wave heights

- a. 2023 年 12 月 25 日至 2024 年 3 月 7 日, WB1 观测结果,
b. 2024 年 1 月 28 日至 2024 年 2 月 21 日, WB2 观测结果。灰色圆点代表浮标观测的有效波高, 红色和蓝色实线分别代表采用 ST6 方案和 Komen 方案的 SWAN 模拟结果
- a. 25 December 2023 to 7 March 2024 along the WB1 tracks; b. 28 January 2024 to 21 February 2024 along the WB2 tracks. The grey dots, red and blue lines represent the results of observations, SWAN model (ST6) and SWAN model (Komen), respectively

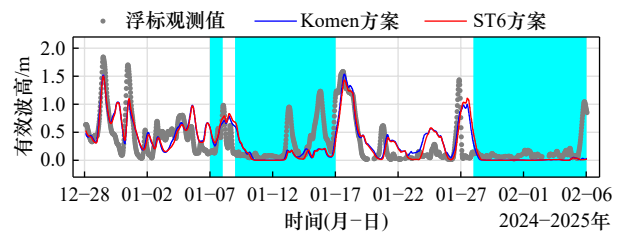


图 9 WB3 观测有效波高与 SWAN 模拟的有效波高的时间序列对比

Fig. 9 Time series comparisons of observed wave heights and simulated wave heights of WB3

- 灰色代表浮标观测的有效波高, 红色和蓝色实线分别代表采用 ST6 方案和 Komen 方案的 SWAN 模拟结果, 青色背景代表海冰覆盖时段

The grey, red and blue lines represent the results of observations, SWAN model (ST6) and SWAN model (Komen), respectively. Cyan backgrounds represent the period in which the buoy was in ice region

日期间, 两种方案均明显高估了有效波高, 2.3 节提到的海冰密集度数据可能存在的误差(低估)很可能是导致模拟波高偏大的原因。

为进一步量化分析两种风输入项的模拟效果, 本文利用表 5 汇总了 3 个浮标处分别使用 Komen 和 ST6 方案模拟时的 MD 与 RMSE 值。总体来看, 对于 WB1, Komen(ST6)方案高估(低估)有效波高, 两方案误差量级相当, 均为 0.01 m, 但 Komen 方案的 RMSE 相比 ST6 方案略小。而对于 WB2, 两种方案均系统

表 5 不同风输入项对应模拟结果与观测的平均误差与均方根误差 (单位: m)

Table 5 Mean deviation (MD) and root mean square error (RMSE) between observations and simulations of different wind-input terms (unit: m)

方案名	Komen		ST6	
	MD	RMSE	MD	RMSE
WB1	0.01	0.45	-0.01	0.46
WB2	0.20	0.34	0.19	0.32
WB3	-0.01	0.34	-0.01	0.35
WB3有冰	-0.09	0.30	-0.08	0.32
WB3无冰	0.05	0.36	0.03	0.37

性高估有效波高约 0.2 m, 其中 ST6 方案相比 Komen 方案误差略小。对于 WB3, 两种方案的系统误差均为 -0.01 m, 表现出较为理想的模拟效果, 其中 Komen 方案的 RMSE 相比 ST6 方案稍低。上述结果表明对 WB2 观测波高的模拟仍有优化空间, 理论上适当增大白冠耗散系数即可令波高减小从而减小 MD, 但如此做必然同步导致 WB1 与 WB3 的 MD 减小从而降低模拟精度, 因此本文暂未对白冠耗散系数进行修改。

尽管风输入项直接作用于无冰水域, 但是无冰水域的海浪会在其传播过程中间接影响海冰覆盖海域的海浪模拟。故本文还将 WB3 对应结果划分为有冰与无冰时期来分别统计, 有冰时期的两种方案均整体

低估了有效波高, 这主要是由于 1 月 13 日至 17 日期间 SWAN 对 2 个波高极大值的漏报导致; 无冰时期两种方案对有效波高的整体高估则源自 1 月 21 日至 26 日间显著偏大的有效波高, 这部分波高偏大有可能是由于驱动 SWAN 模式的海冰密集度与实际不符(如 2.3 节所述)所导致。分别统计有冰与无冰时期时, ST6 方案的平均误差小于 Komen 方案, 但 RMSE 稍大。以上结果说明 Komen 与 ST6 方案性能总体接近, 但在不同时段存在微小差异。受限于目前驱动模式的风场、冰场的分辨率, 模式可能尚难以完全精准刻画局地的风-浪-冰相互作用全部过程, 进而会影响有效波高的模拟精度。

3.4 渤海冬季整体海浪分布特征

为了体现渤海冬季结冰期海浪的空间分布特征, 本节采用 3.2 节中综合表现最优的 M18 和 ST6 方案给出了整个渤海海区 2024 年 1 月和 2025 年 1 月的平均有效波高, 如图 10 所示。从图中可以看出, 渤海整体波高呈现中部开阔海域高, 海湾内低的特点。2024 年 1 月期间, 受海冰影响, 辽东湾内平均有效波高约 0.5 m 且高纬度大面积海域波高趋近于零。相比之下, 2024 年冬季渤海中部波高整体小于 2023 年, 分布特点基本一致, 但冰情较轻, 故辽东湾内平均波高更大, 约为 0.7 m。上述结果与前人的研究保持一致^[12], 表明当前 SWAN 模式能够较好地刻画冬季冰期渤海海区海浪的空间特征并能反映海冰对海浪的影响。

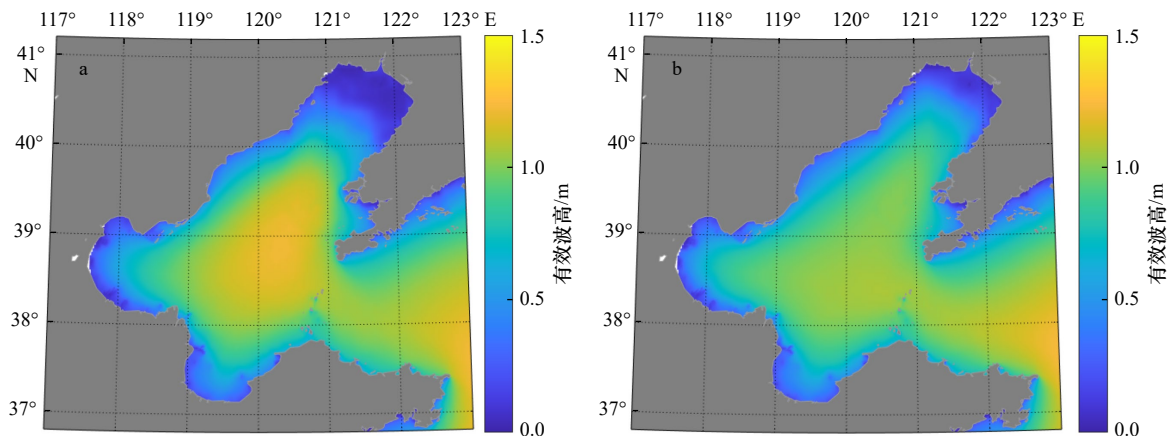


图 10 SWAN 模拟的冬季渤海平均有效波高分布
Fig. 10 Simulated average significant wave height in Bohai Sea
a. 2024 年 1 月 1 日至 1 月 31 日, b. 2025 年 1 月 1 日至 1 月 31 日
a. 1 January to 31 January 2024; b. 1 January to 31 January 2025

4 结论

本文基于 2023 年与 2024 年冬季投放在渤海辽东湾的 3 个小型波浪浮标的观测数据与植入新的冰-浪

源项的 SWAN 模式的数值模拟结果对渤海冬季结冰期的海浪特征进行了研究, 并对比了两种主流的风输入源项, 所得的主要结论如下:

(1) 2023 年冬季位于渤海中部的 2 个漂流式浮标

观测所得有效波高平均值约为 1 m, 有效波周期平均值约为 4 s 到 5 s。2024 年冬季位于辽东湾的锚定浮标观测所得平均有效波高为 0.4 m, 有效波周期平均为 6.3 s。当浮标位置存在海冰时, 海冰会显著降低有效波高、增加有效周期, 测得平均有效波高和周期分别为 0.2 m 和 8.9 s。另外, 海冰会影响海浪的有效风区使主导波向偏离主导风向。

(2) 若不考虑海冰作用, SWAN 模式对渤海冬季结冰期的海浪模拟会产生显著误差。通过植入 M18 冰-浪方案, 可令有效波高的模拟误差降低 33%, 与模式默认的 IC4M2 方案相比, 考虑了冰厚的影响, 物理上更加完备且模拟精度也有所提高。

(3) 两种风输入项方案 Komen 与 ST6 对有效波高的模拟水平接近, 不同观测时期各有优势, 对渤

海中部的浮标观测结果误差约为 0.2 m, 对辽东湾浮标观测的模拟平均误差则更小, 均方根误差无显著差异。

作为渤海冬季海浪的一次探索性观测与数值研究, 本文目前的工作依然存在一定的局限。例如, 冰区波浪浮标的观测技术依然不够完备, 存在部分缺测和干扰等问题, 导致冰区海浪观测的数据量不大, 进而制约了冰-浪模型中部分参数的确定与校正。另外, 本文配置的 SWAN 模式分辨率依然不够精细, 特别是强迫场的时空分辨率制约了通过数值模拟的方式去准确刻画小尺度风-浪-冰之间的相互作用。未来将会在改进冰区海浪观测技术的基础上, 结合卫星资料用更高分辨率的风场和冰场数据来驱动模型, 进一步改进结果。

参考文献:

- [1] 岳淑红, 李广雪. 塘沽近海海域海浪的基本特征[J]. 黄渤海海洋, 1997(1): 70–75.
Yue Shuhong, Li Guangxue. General characteristics of the wave of Tanggu[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1997(1): 70–75.
- [2] 孙连成. 渤海湾西部海域波浪特征分析[J]. 黄渤海海洋, 1991, 9(3): 50–58.
Sun Liancheng. Analysis of wave characteristics of the west offshore area of the Bohai Bay[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1991, 9(3): 50–58.
- [3] Miao Qingsheng, Yang Jinkun, Wang Zhifeng, et al. A study on wave climate variability along the nearshore regions of Bohai Sea based on long term observation data[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 304: 117947.
- [4] 龙强, 王锋, 项青霞, 等. 唐山南部近海海浪特征及风浪预报方法分析研究[J]. 海洋预报, 2016, 33(3): 27–33.
Long Qiang, Wang Feng, Xiang Qingxia, et al. Research about wave features and wind wave height forecasting methods of Tangshan southern coastal area[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(3): 27–33.
- [5] Wang Juanjuan, Li Benxia, Gao Zhiyi, et al. Comparison of ECMWF significant wave height forecasts in the China sea with buoy data[J]. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(6): 1693–1704.
- [6] 王广运, 赵进平, 宋如轼. 利用卫星微波遥感资料推算波浪极值[J]. 港工技术, 2000(1): 11–18.
Wang Guangyun, Zhao Jinping, Song Rushi. Sea-wave extreme estimation using satellite macro-wave remote-sense data[J]. Port Engineering Technology, 2000(1): 11–18.
- [7] 尹宝树, 王涛, 范顺庭. YW-SWP 海浪数值预报模式及其应用[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(3): 293–300.
Yin Baoshu, Wang Tao, Fan Shunting. YW-SWP sea wave numerical prediction model and its application[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(3): 293–300.
- [8] 李文博, 李锐, 王彬, 等. 不同海浪数值预报产品在渤海和黄海的预报水平评估[J]. 海洋预报, 2023, 40(4): 10–21.
Li Wenbo, Li Rui, Wang Bin, et al. Evaluation of different wave numerical forecast products in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(4): 10–21.
- [9] 黄必桂. 渤海海浪的数值模拟和涌浪对风浪影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Huang Bigui. Numerical simulation of waves in Bohai Sea and research on the influence of swells on wind waves[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [10] 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.
- [11] 刘东昂, 管长龙, 孙建. 渤海 WAVEWATCH III®不同海冰模型的模拟结果比较[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 12–18.
Liu Dong'ang, Guan Changlong, Sun Jian. A comparison of ice modules in WAVEWATCH III® in the Bohai Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(6): 12–18.
- [12] Yue Che, Li Jingkai, Guan Changlong, et al. Surface wave simulation during winter with sea ice in the Bohai Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(6): 1857–1867.
- [13] 任国庆, 程天宜, 马昕, 等. 漂流式波浪浮标及其在西北太平洋的观测应用[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(4): 37–44.

- Ren Guoqing, Cheng Tianyi, Ma Xin, et al. Drifting wave buoys and their observational applications in the Northwest Pacific[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2021, 40(4): 37–44.
- [14] Cheng Tianyi, Chen Zhaohui, Li Jingkai, et al. Surface wave height regulated by ocean currents: an observational perspective[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2022, 179: 103666.
- [15] 党超群, 李明兵, 王斌, 等. 基于 MEMS 运动传感器的波浪谱浮子设计研究[J]. *海洋测绘*, 2024, 44(5): 57–61.
- Dang Chaoqun, Li Mingbing, Wang Bin, et al. Research on wave spectra float based on MEMS motion sensor[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2024, 44(5): 57–61.
- [16] 祁祥礼, 郑向阳, 谌业良. 渤海湾中部波浪特征分析[J]. *水道港口*, 2018, 39(3): 288–293.
- Qi Xiangli, Zheng Xiangyang, Shen Yeliang. Analysis of wave characteristic in the middle part of the Bohai Bay[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2018, 39(3): 288–293.
- [17] Kuik A J, van Vledder G P, Holthuijsen L H. A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave data[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1988, 18(7): 1020–1034.
- [18] 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.
- [19] Rogers W E, Thomson J, Shen H H, et al. Dissipation of wind waves by pancake and frazil ice in the autumn Beaufort Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(11): 7991–8007.
- [20] 冯士筭. 渤海环境动力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- Feng Shizuo. Introduction to environmental dynamics of Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [21] Squire V A. Of ocean waves and sea-ice revisited[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 49(2): 110–133.
- [22] Group T W. The WAM model—a third generation ocean wave prediction model[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1988, 18(12): 1775–1810.
- [23] The WAVEWATCH III[®] Development Group. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III[®] version 5.16[R]. College Park: The WAVEWATCH III[®] Development Group, 2016.
- [24] Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C4): 7649–7666.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Komen G J, Cavaleri L, Donelan M, et al. Dynamics and Modelling of Ocean Waves[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [28] Rogers W E, Babanin A V, Wang D W. Observation-consistent input and whitecapping dissipation in a model for wind-generated surface waves: description and simple calculations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(9): 1329–1346.
- [29] Komen G J, Hasselmann K, Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, 14(8): 1271–1285.
- [30] Eldeberky Y, Battjes J A. Spectral modeling of wave breaking: application to Boussinesq equations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, 101(C1): 1253–1264.
- [31] Hasselmann S, Hasselmann K, Allender J H, et al. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1985, 15(11): 1378–1391.
- [32] Hasselmann K F, Barnett T P, Bouws E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)[C]. Hamburg: Deutsche Hydrographische Institute, 1973.
- [33] Battjes J A, Janssen J P F M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves[C]// 16th International Conference on Coastal Engineering. Hamburg: American Society of Civil Engineers, 569–587.

The wave feature analysis of Bohai Sea in winter of 2023–2025 based on buoy measurements and numeric modeling

Wu Hongxuan^{1,2}, Yue Che³, Li Jingkai¹, Ma Xin¹, Ma Yechi¹, Li Rui³

(1. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Ningde Marine Center, Ministry of Natural Resources, Ningde 352100, China; 3. North China Sea Marine Forecasting and Disaster Mitigation Center, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the observations of 3 wave buoys deployed in Liaodong Bay in winter of 2023–2025 and wave numerical model, this paper analyzes the characteristics of waves during freezing winter of Bohai Sea. According to the statistic results, the mean significant wave heights (mean significant wave periods) observed by 2 buoys in the center of Bohai Sea are about 1 m (4–5 s). Observations from the located buoy in Liaodong Bay indicate that waves are great affected by sea ice. When the buoy locates in a freezing region, the observed mean significant wave heights (mean significant periods) are 0.2 m (9 s), indicating a 54% reduction (98% increase) compared to the measurements without sea ice. The existence of sea ice may also lead the peak wave direction differ from the dominant wind direction. On the perspective of numeric modeling, the error of simulated wave heights can be reduced by 33% via adding ice-wave terms compared to the model without ice terms. By comparing two wind input terms (Komen and ST6), this paper finds that the simulations match the observations well and the error is comparable. Based on observations of buoys, the results rich the acknowledgements of people in the wave features in Bohai Sea during the freezing winter.

Key words: Bohai Sea; SWAN; drifting buoys; significant wave height; freezing winter