

· 综合 ·



寒潮大风及海冰对北方港口波浪推算的影响*

张娜¹, 张明川¹, 王亥索², 余鑫^{1,3}, 邹国良⁴, 徐圣凯¹

(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. 天津水运工程勘察设计院有限公司, 天津 300456;

3. 天津市海岸带工程有限公司, 天津 300384; 4. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210024)

摘要: 为了探究冬季极端天气及海况对北方港口波浪推算的影响, 以黄骅港为例, 建立能够综合考虑海冰和寒潮大风影响的波浪数值模型。与实测值相比, 模拟的黄骅港外航道口门处有效波高最大值和平均值分别偏大 0.41% 和偏小 5.46%, 且演化趋势基本吻合。结果表明, 港内 2018 年寒潮大浪致灾地点处考虑海冰、强风及波浪绕射与反射影响的有效波高最大值为 1.14 m。通过敏感性分析可知, 港内波浪推算过程中若忽略寒潮大风的影响, 则有效波高严重偏小达 73.68%。如考虑海冰的影响, 有效波高将比无冰情况偏小 8.77%。

关键词: 黄骅港; 寒潮; 大风; 海冰; 波浪推算

中图分类号: P753; U652.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0001-07

Impact of cold waves, strong winds, and sea ice on wave calculation in northern ports

ZHANG Na¹, ZHANG Mingchuan¹, WANG Haisuo², YU Xin^{1,3}, ZOU Guoliang⁴, XU Shengkai¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics & Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China;

3. Tianjin Coastal Zone Engineering Co., Ltd., Tianjin 300384, China;

4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to investigate the influence of extreme winter weather and sea conditions on the design wave estimation of northern ports, using Huanghua Port as a case study, we build a comprehensive numerical wave model that accounts for the combined effects of sea ice and cold strong winds. The simulated maximum and average significant wave heights at the entrance of the outer channel of Huanghua Port are 0.41% higher and 5.46% lower than the measured, respectively, and the evolution trend is basically consistent. The results show that the maximum significant wave height, considering sea ice, strong winds, and the effects of wave diffraction and reflection, at the location of the disaster caused by the cold wave in 2018 in the harbor, is 1.14 m. Sensitivity analysis reveals that neglecting the influence of cold waves and strong winds during wave estimation within the port leads to a significant underestimation of the maximum significant wave height by 73.68%. In addition, if the effect of sea ice is considered, the significant wave height will be 8.77% lower compared to ice-free conditions.

Keywords: Huanghua Port; cold wave; strong wind; sea ice; wave calculation

冬季北方港口经常受到寒潮大风的影响, 强风可能会引发巨浪, 从而导致船舶和港口设施损

坏^[1]。而寒潮会导致局部海域结冰, 海冰阻挡了海洋与大气之间的动量交换, 不仅会减小覆冰海

收稿日期: 2024-04-08

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51509177); 天津市研究生科研创新项目 (2022SKYZ322)

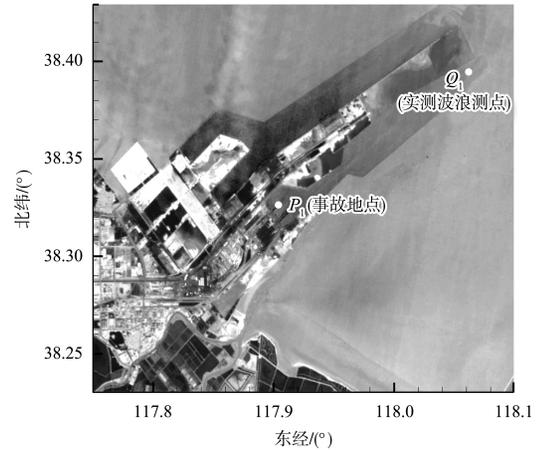
作者简介: 张娜 (1978—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 从事海冰与近岸水动力相互作用研究。

通讯作者: 王亥索 (1981—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计。E-mail: wanghs@tiwte.ac.cn

域的波能,而且会减小有效风区,从而影响到无冰海域的风浪形成^[2]。因此,在冬季北方港口波浪推算时,综合考虑大风过程和海冰的影响对提高波浪推算的准确性至关重要。

近年来,随着全球气候持续变暖,季节性高纬度海域以及南北极海域出现越来越多的冰水共存现象^[3],受表面风应力的作用,冰水共存的开阔水域会形成波浪^[4]。波浪荷载会降低建筑物的使用寿命,对建筑物产生破坏作用。波浪要素如波高、周期和波长推算也是工程防浪的主要设计参数^[5],尤其是在寒潮大风等极端天气下的港内波浪演化特性研究,可为工程结构的致灾成因探究及防护提供重要参考^[6-7]。在以往的研究中,WW3和SWAN风浪模型被广泛用于小风区或者大范围波浪推算^[8-14]。近年来,海冰作为源项或者是风应力的一部分被用于冰水共存海域的波浪演化模拟和波浪能估算^[15]。

但在实际工程应用中,以往模型仍然存在局限性。以黄骅港为例,2018年冬季在一场寒潮大风过程中港内的阻挡渔船装置发生倾覆,初步推断寒潮大风引起的大浪可能是导致装置倾覆的主要原因^[16]。然而,寒潮天气还会导致渤海海域结冰,海冰的存在有可能会影响波高减小。忽略海冰的影响有可能影响到事故发生地点波浪推算的精度。黄骅港位于渤海湾,所在海域近岸冬季不仅结冰,而且受季风气候影响显著,以风浪为主,波高分布具有明显的季节性变化特征^[17]。阻挡渔船的装置位于黄骅港内(图1中 P_1 点,简称事故地点),从防波堤口门至事故地点处距离约为16 km,不仅需要考虑寒潮大风及海冰的影响,而且需要考虑港内波浪绕射与反射的影响。但目前缺少可以综合考虑大风过程、海冰以及港内波浪绕射与反射影响的波浪数值模型。为此,本文拟综合考虑以上因素探究寒潮大风及海冰对港内波浪推算的影响,为寒区海域港内波浪推算及致灾成因探讨提供新的思路。



注: $Q_1(118.06^\circ\text{E}, 38.40^\circ\text{N})$ 为实测波浪测点, $P_1(117.91^\circ\text{E}, 38.33^\circ\text{N})$ 为阻挡渔船装置发生倾覆的事故地点。

图1 黄骅港地理位置

1 考虑海冰影响的波浪数值模型

通过将卫星遥感反演的2018-03-01—2018-03-06的海冰密集度纳入SWAN波浪模型的风应力方程中,建立考虑海冰影响的黄骅港波浪数值模型。SWAN波浪模型是基于动谱平衡方程的第三代波浪模型,可用来描述风浪生成及其在近岸区的演化过程^[18]。SWAN波浪模型41.31版本中通过在方程源汇项中加入由于海冰引起的波能耗散项从而实现海冰对波浪的影响^[19]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot [(c_g + U)N] + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{1}{\sigma}(F_{in}S_{in} + S_{nl,3} + S_{nl,4}) + \frac{1}{\sigma}(S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} + a_{ice}S_{ice}) \quad (1)$$

式中: N 为波的作用谱密度,是相对波频率 σ 、方向 θ 、空间 (x, y) 和时间 (t) 的函数,使得 $N = N(\sigma, \theta, x, y, t)$; ∇_x 为二维空间 (x, y) 上的空间梯度; c_g 为群速度; U 为环境平均流量; c_σ 为与频率变化相关的传播速度; c_θ 为角度方向上的传播速度; F_{in} 为0~1之间的比例系数; S_{in} 为风输入引起的波浪增长的源项; $S_{nl,3}$ 和 $S_{nl,4}$ 为三波和四波相互作用引起的非线性波浪能量传递; $S_{ds,w}$ 、 $S_{ds,b}$ 和 $S_{ds,br}$ 分别为白浪、底部摩擦和深度有限破碎引起的波浪耗散; S_{ice} 为由于海冰引起的波能耗散项; a_{ice} 为海冰密集度。

与上述方式不同, 本文将海冰作为风应力的一部分用于描述冰水共存海域的波浪传播演化, 该模型为张娜等^[20]在 SWAN 波浪模型 41.20 版本的基础上进行了二次开发, 将冰密集度以线性变化百分比的方式纳入 SWAN 模型的摩阻风速方程中用来模拟冰水共存海域的波浪传播演化:

$$U_f = \sqrt{C_d(1-a_{ice})} \cdot W_{10} \quad (2)$$

式中: U_f 为海面风摩擦速度; C_d 为风拖曳力系数, 取值为 $0.0013^{[21]}$; a_{ice} 为冰密集度, 由中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 卫星遥感数据反演获取, 采用的反演方法是 Zhang 等^[24]建立的 CART 决策树模型。

在进行港内波浪推算时除了采用 SWAN 模型考虑海冰和大风过程, 还采用了基于 Boussinesq 方程的模型 FUNWAVE^[25]考虑港内波浪绕射与反射, 并基于以下计算式对黄骅港内事故地点海域

的有效波高 H_R 进行推算:

$$H_R = \sqrt{H_W^2 + H_S^2} \quad (3)$$

式中: H_W 为基于 SWAN 模型推算的考虑海冰以及大风过程的有效波高, H_S 为基于 Boussinesq 方程模型模拟的考虑港内波浪绕射与反射效应的有效波高^[26]。其中 Boussinesq 方程模型采用域内造波, 造波边界选在距离黄骅港口门 10 倍波长处的外海区域, 开边界处的入射波谱采用 JONSWAP 波谱模拟, 域内造波的波浪要素由 SWAN 模型提供。

1.1 数据来源

SWAN 模型的波浪开边界数据由欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供^[27-28]。SWAN 模型的输入风场来自美国国家环境预报中心 (NCEP) 逐时再分析数据。NCEP 输入风场数据的风速和风向与黄骅港 2018 年 3 月的实测值对比, 见图 2。结果显示, 再分析风速和风向数据与实测值吻合较好。

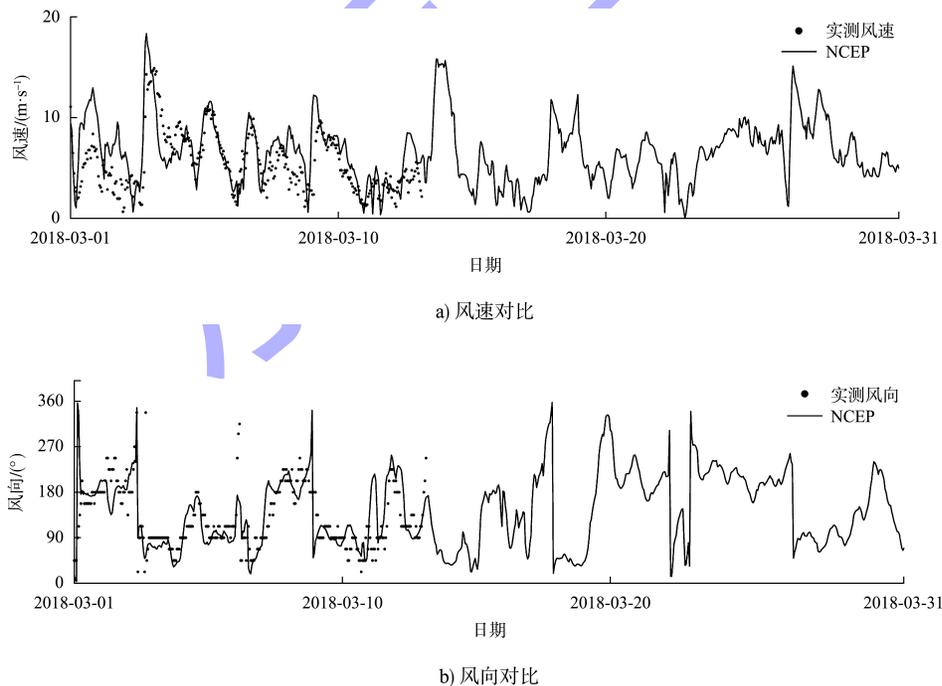


图 2 黄骅港外航道 (118.05°E, 38.91°N) 实测值与 NCEP 每小时 1 次的风速和风向对比

2018年冬季，最大海冰覆盖时刻的结冰海域面积占整个渤海范围的23.68%，将MODIS遥感反演的海冰作为波浪模型驱动输入文件，见图3。

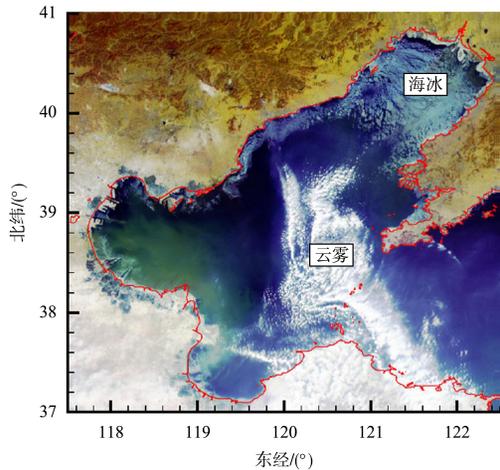
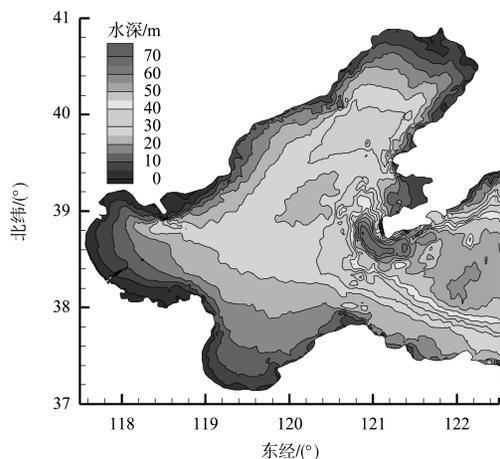


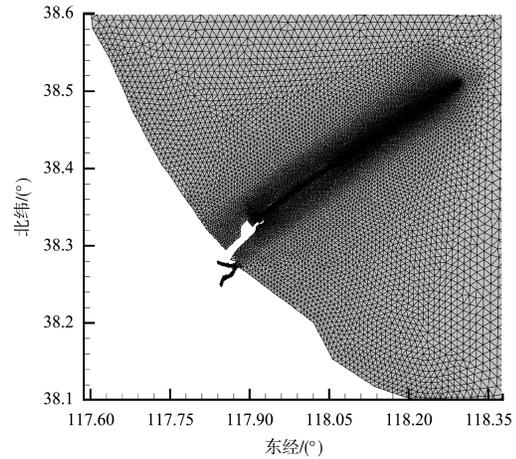
图3 MODIS监测的海冰分布

1.2 水深及模型网格

采用渤海大范围模型嵌套黄骅港工程区小模型的方式进行波浪模拟，水深分布及小模型网格分布见图4。渤海大范围模型网格单元数为4.7135万个，节点数为2.4046万个，网格分辨率最小为1 km。近岸黄骅港工程区小模型同样采用非结构化网格，模型经度范围为117.6°E—118.39°E，纬度范围为38.095°N—38.624°N，单元数为2.7253万个，节点数为1.3968万个，并在航道和港池进行了加密，最小网格空间分辨率为30 m。



a) 渤海大模型及其水深分布



b) 黄骅港小模型网格布置

图4 模型网格布置

2 模型验证

基于二次开发的SWAN波浪模型对2018-03-01 T08:00:00—2018-03-06T08:00:00的渤海冬季寒潮大风过程进行波浪数值模拟并验证。实测数据时间为2018-03-04T05:00:00—2018-03-05T19:00:00，验证点 Q_1 的有效波高验证结果见图5。数值模拟的有效波高最大值为3.35 m，与同时段实测值的相对误差为0.41%；有效波高平均值为2.41 m，与实测值的相对误差为5.46%。从验证结果来看，本文建立的黄骅港波浪数值模型能较好地模拟寒潮大风过程中的波浪演化过程。

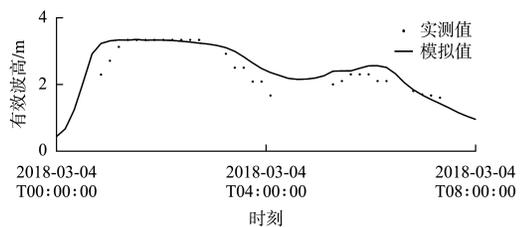


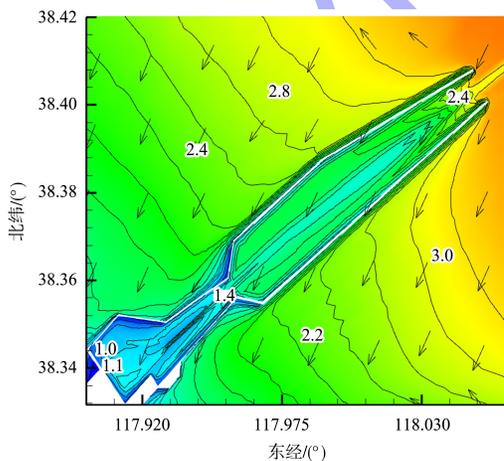
图5 Q_1 点数值模拟的有效波高与实测值对比

3 寒潮大风对波浪推算的影响

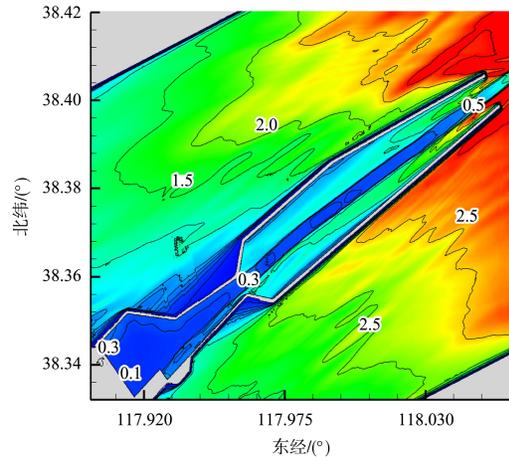
黄骅港位于渤海湾西南部，在2018-03-01 T08:00:00—2018-03-06T08:00:00寒潮大风天气影响下，外海有效波高在进入港池口门后发生绕射，绕射波进入港池口门后继续沿着航道方向传播，沿程最大有效波高从2.40 m衰减到第2个口门的

1.40 m, 最终到达港内事故地点的最大有效波高为 1.00~1.10 m, 见图 6a)。该值超过原设计有效波高 0.80 m, 超过幅度最大高达 37.50%。

由于阻挡渔船的装置位于黄骅港内, 且距离港区口门约 16 km, 需要充分考虑大风过程对波浪推算的影响, 因此需要 SWAN 波浪模型进行风浪推算。而当波浪从港区口门传至事故地点海域, 需要考虑港内波浪绕射与反射的影响, 因此基于 Boussinesq 方程的模型 FUNWAVE 进行港内波浪推算得到黄骅港考虑绕射与反射影响的最大有效波高见图 6b)。最后将考虑寒潮大风过程的波浪推算结果与 Boussinesq 方程模型模拟的港内波浪结果叠加获得综合考虑寒潮大风过程及港内波浪绕射与反射的有效波高值, 见图 7。SWAN 模型推算的 2018 年冬季寒潮大风期间黄骅港事故地点处 (P_1) 的最大有效波高为 1.10 m, 出现在 2018-03-04T05:00:00。而基于 Boussinesq 方程模型 FUNWAVE 模拟的 P_1 点最大有效波高仅为 0.30 m。二者基于式(3)叠加后的有效波高为 1.14 m, 超过原设计有效波高 0.80 m 近 42.50%。根据模拟结果, 不考虑大风过程会导致波浪推算结果偏小 73.68%。因此, 寒潮大风过程在港内波浪推算过程中不可忽略。



a) 基于SWAN模型考虑寒潮大风过程推算的最大有效波高及波向分布



b) 基于Boussinesq方程模型模拟的最大有效波高分布

图 6 黄骅港 SWAN 模型以及 Boussinesq 方程模型模拟的最大有效波高分布 (单位: m)

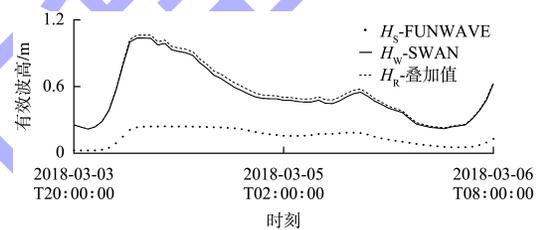


图 7 寒潮大风期间 P_1 测点的有效波高随时间的变化

4 海冰对波浪推算结果的影响

寒潮大风过程中的大风因素会引起有效波高的增大, 但实际上这个过程还会伴随海冰的产生, 而海冰的出现往往会降低海冰覆盖区域的波能, 减小有效风区, 从而降低有效波高。因此, 为探究海冰对黄骅港港内事故地点有效波高的影响, 分别针对 2018 年冬季渤海海冰覆盖率最大时 (23.68%) 以及无冰两种工况进行对比。其中, 海冰覆盖率为海冰覆盖面积所占渤海总面积的比值。在这两种工况中, 除了海冰的输入条件改变, 模型的外部驱动风场仍然采用 2018-03-03T20:00:00—2018-03-06T08:00:00 的寒潮大风。两种工况下, 黄骅港内 P_1 点的有效波高模拟结果随时间的演化见图 8。

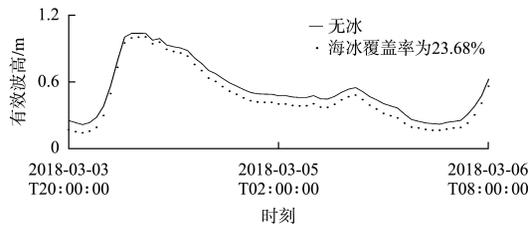


图8 寒潮大风期间 P_1 点不同海冰覆盖情况下有效波高随时间演化对比

P_1 点最大有效波高受海冰覆盖率的影响程度见表1。可以看出,当渤海海冰覆盖率为23.68%时,黄骅港 P_1 点处的有效波高最大值为1.04 m,较无冰时的最大有效波高1.14 m,减小了8.77%。由此可见,寒潮大风过程中的大风因素不仅会增大有效波高,其中的海冰因素也会减小有效波高。海冰对本次事故发生地的有效波高影响程度较轻,主要是因为事故发生地并没有结冰,海冰仅在渤海湾、莱州湾近岸及辽东湾出现,是通过减小有效风区从而间接引起黄骅港事故地点港域的有效波高减小。而综合考虑寒潮大风过程和海冰影响的黄骅港事故地点的有效波高仍超原设计有效波高30.00%。因此,在北方港口的波浪推算及致灾成因探究中,寒潮大风及海冰的影响均不可忽略。

表1 P_1 点最大有效波高受海冰覆盖率的影响程度

海冰覆盖率/ %	P_1 点最大有效 波高/m	有效波高受海冰 影响程度/%
0	1.14	-
23.68	1.04	8.77

5 结论

1) 在2018-03-03T20:00:00—2018-03-06T08:00:00寒潮大风的驱动下,外海波浪在进入黄骅港港区口门后发生绕射,绕射波继续沿航道方向传播,沿程最大有效波高从口门处的2.40 m衰减到第2个口门的1.40 m,最终到达港内事故地点的最大有效波高为1.10 m,叠加 Boussinesq 方程模型模拟的港内有效波高,推算的最大有效波高为1.14 m,超过原设计有效波高0.8 m近42.50%。忽略寒潮

大风的影响会导致波浪推算结果偏小73.68%。

2) 当渤海海冰覆盖率从0%增至2018年冬季海冰覆盖率最大值23.68%时,黄骅港内事故地点的有效波高最大从1.14 m降至1.04 m,减小幅度为8.77%,仍然超过原设计有效波高30.00%。海冰对事故地点的有效波高影响程度较轻,主要是因为事故地点并没有结冰,海冰是通过减小有效风区从而间接减小黄骅港港内事故地点的有效波高。

3) 根据模拟结果,在北方港口冬季寒潮天气下进行港内波浪推算时需要综合考虑寒潮大风及海冰的影响。本文为寒区结冰海域的港内波浪推算及致灾成因探讨提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] ZHANG N, WU Y S, ZHANG Q H. Forecasting the evolution of the sea ice in the Liaodong Bay using meteorological data [J]. Cold regions science & technology, 2016, 125(5): 21-30.
- [2] ZHANG N, WANG J, WU Y S, et al. A modelling study of ice effect on tidal damping in the Bohai Sea [J]. Ocean engineering, 2019, 173(2): 748-760.
- [3] 张娜, 王立涛, 耿姗姗, 等. 渤海海域冰水共存期的波能流密度推算[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 981-989.
- [4] ZHANG N, LI S, WU Y S, et al. Effects of sea ice on wave energy flux distribution in the Bohai Sea [J]. Renewable energy, 2020, 162(12): 2330-2343.
- [5] XIONG J L, YOU Z J, LI J, et al. Variations of wave parameter statistics as influenced by water depth in coastal and inner shelf areas [J]. Coastal engineering, 2020, 159: 103714.
- [6] LIANG B C, SHAO Z X, WU G X, et al. New equations of wave energy assessment accounting for the water depth [J]. Applied energy, 2017, 188(2): 130-139.
- [7] 姜波, 丁杰, 武贺, 等. 渤海、黄海、东海波浪能资源评估[J]. 太阳能学报, 2017, 38(6): 1711-1716.
- [8] SHAO W Z, YU W P, JIANG X W, et al. Analysis of wave

- distributions using the WAVEWATCH-III model in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2022, 21(1): 15-27.
- [9] 李靖, 郑崇伟, 刘克建, 等. 波浪能传播规律的数值分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(1): 49-54.
- [10] CHEN T Q, ZHANG Q H, WU Y S, et al. Development of a wave-current model through coupling of FVCOM and SWAN[J]. *Ocean engineering*, 2018, 164(9): 443-454.
- [11] ABOOBACKER V M. Wave energy resource assessment for eastern bay of Bengal and Malacca Strait [J]. *Renewable energy*, 2016, 114: 72-84.
- [12] ABOOBACKER V M, SHANAS P R, ALSAAFANI M A, et al. Wave energy resource assessment for Red Sea[J]. *Renewable energy*, 2016, 114: 46-58.
- [13] XIONG J L, WANG Y P, GAO S, et al. On estimation of coastal wave parameters and wave-induced shear stresses [J]. *Limnology and oceanography methods*, 2018, 16(9): 594-606.
- [14] 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(4): 7649-7666.
- [15] 张娜, 徐圣凯, 许宁, 等. 寒潮天气下高风险冰块追踪预测方法及数值模拟[J]. *海洋学报*, 2023, 45(2): 110-117.
- [16] 王亥索. 神华黄骅港务公司港池安装阻挡渔船装置及护栏栏杆项目设计波高复核报告[R]. 天津: 天津水运勘察设计院有限公司, 2021.
- [17] LIN Y F, DONG S, WANG Z F, et al. Wave energy assessment in the China adjacent seas on the basis of a 20-year SWAN simulation with unstructured grids [J]. *Renewable energy*, 2019, 136(6): 275-295.
- [18] The SWAN Team. SWAN scientific and technical documentation SWAN cycle III version 41. 20AB [R]. Delft : Delft University of Technology, 2018.
- [19] KUMAR N, ROGERS W E, THOMSON J, et al. Wave-ice interaction for regional applications: SWAN developments and validations [J]. *Authorea preprints*, 2022(9): 1-31.
- [20] 张娜, 李帅, 耿姗姗, 等. 渤海海冰对波浪推算的影响[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(11): 1604-1610.
- [21] WU J. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane [J]. *Journal of geophysical research (Oceans)*, 1982, 87(12): 9704-9706.
- [22] 张娜, 张庆河. 基于 CART 决策树方法的 MODIS 数据海冰反演[J]. *海洋通报*, 2014, 33(3): 321-327.
- [23] 史凯琦, 邹斌, 陈树果, 等. 中分辨率成像光谱仪的海冰密集度遥感反演 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(3): 753-764.
- [24] ZHANG N, WU Y S, ZHANG Q H. Detection of sea ice in sediment laden water using MODIS in the Bohai Sea: a CART decision tree method [J]. *International journal of remote sensing*, 2015, 36(6): 1661-1674.
- [25] 林华东, 李本霞. 基于 FUNWAVE-GPU 模型的近岸海浪传播变形的数值模拟研究 [J]. *海洋预报*, 2023, 40(3): 1-10.
- [26] 邹文峰, 王平, 刘忠波, 等. 基于双层 Boussinesq 方程的三维波浪数值模型及其验证 [J]. *海洋工程*, 2022, 40(6): 41-50.
- [27] CHASSIGNET E P, HULBURT H E, SMEDSTAD O M, et al. The HYCOM(hybrid coordinate ocean model) data assimilative system [J]. *Journal of marine systems*, 2005, 65(1): 60-83.
- [28] 万勇, 沈培, 范陈清. 基于 ERA5 海浪再分析数据的风浪涌浪分离方法 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(8): 1283-1287, 1312.

(本文编辑 王璁)