

渤海海域冰水共存期的波能流密度推算*

张娜^{1,2} 王立涛¹ 耿姗姗³ 张庆河² 尤再进⁴
李帅¹ 许宁⁵ 许钊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. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室 天津 300072; 3. 国家海洋信息中心 天津 300171; 4. 大连海事大学 港口与航运安全协创中心 辽宁大连 116026; 5. 国家海洋环境监测中心 辽宁大连 116023)

摘要 为给寒区海域的波浪能估算提供科学依据, 提出一种合理推算冰水共存海域波浪条件及波能流密度的方法, 该方法将海冰模型与水动力学模型耦合模拟得到的冰浓度以线性修正函数的方式纳入波浪模型的海面摩阻风速方程中, 并基于 MCT (model coupling toolkit) 耦合器将海冰模型、水动力学模型与波浪模型进行实时耦合。基于该方法模拟了渤海冬季寒潮大风期间的海冰以及波能流密度的演化。模拟结果表明, 在 2012 年 2 月 5~8 日寒潮大风期间, 结冰区域占到渤海总面积的 1/3, 约有 76% 的渤海海域的平均波能流密度受海冰影响减小, 其中辽东湾近岸的波能流密度平均受冰影响最多减小了 100%, 而渤海湾和莱州湾近岸受冰影响最多分别减小了 60% 和 50%。即使是无冰覆盖的老铁山水道, 其波能流密度的最大值也受冰影响减少了 14%。耦合模拟可以更为准确地对渤海冬季的波能流密度分布进行评估, 为波浪能发电厂选址提供依据。

关键词 渤海; 海冰模型; SWAN 模型; FVCOM 模型; MCT 耦合器; 海面摩阻风速; 实时耦合; 波能流密度

中图分类号 P731.22 doi: 10.11693/hyhz20210700159

波浪能是一种可再生的清洁无污染能源, 其开发利用对于缓解不可再生能源危机和减少由化石燃料导致的环境污染具有重要意义(Borthwick, 2016)。波浪能是指海面上波浪的动能和势能, 主要是由风吹过海面引起的(尤再进等, 2017)。波浪能与波高的平方以及周期成正比。波浪能应用范围广泛, 已实现的用途有发电、取水、供热、海水淡化和制氢等(Wang *et al.*, 2011; Ning *et al.*, 2016; 王鑫等, 2020)。

我国的渤海海域受季风影响, 以风浪为主, 波高分布具有明显的季节性变化特征(郑崇伟等, 2013), 波能流密度的分布与有效波高相似, 均是秋冬大, 春夏小(郑崇伟等, 2013; 姜波等, 2017)。以往的研究表

明, 渤海中部海域的波能流密度最大, 春季为 1.6~2.4 kW/m, 夏季为 0.7~1.4 kW/m, 秋季为 2.4~3.4 kW/m, 冬季为 4.2~5.4 kW/m (郑崇伟, 2014; 姜波等, 2017)。由此可见, 渤海波浪能最大的季节为冬季(万勇等, 2014), 然而冬季受西伯利亚强寒潮影响时, 一方面会导致风浪较大(郑崇伟, 2014), 另一方面又会导致海水结冰(Zhang *et al.*, 2019, 2020), 海冰的形成会隔绝海-气交换, 导致波浪能的减弱(Zhang *et al.*, 2019, 2020; 张娜等, 2021)。

渤海位于 37°~41°N, 是北半球最南端的季节性海冰区(Zhang *et al.*, 2019)。同时, 海冰已成为冬季影响渤海的主要海洋灾害之一(武浩等, 2016)。渤海的

* NSFC-山东联合重点基金, U1806227 号; 国家自然科学基金项目, 51509177 号, 51978440 号; 大连市支持高层次人才创新创业项目, 2019RJ07 号; 辽宁省科技计划项目, 2021JH2/10300004 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; 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金, HESS-1912 号; 天津市研究生科研创新项目资助, 2020YJSS081 号。

张娜, 博士, 教授, E-mail: cheungna@126.com

通信作者: 张庆河, 博士生导师, 教授, E-mail: qh Zhang@tju.edu.cn

收稿日期: 2021-07-09, 收修改稿日期: 2021-09-19

初冰日一般为 12 月上旬, 海冰首先出现在辽东湾近岸, 随后沿西海岸由北向南蔓延到渤海湾, 最后到达莱州湾, 于来年 1、2 月达到顶峰。其后春季来临, 气温升高, 海冰逐渐向北消融, 终冰日一般为 3 月中旬 (Zhang *et al*, 2019)。渤海海冰主要集中在辽东湾、莱州湾和渤海湾地区, 海冰的覆盖率随离岸距离的增加而降低 (Zhang *et al*, 2016, 2018)。我国渤海的单层平整冰的最大厚度通常不超过 60 cm (白珊等, 1999)。辽东湾作为渤海海域冰情最严重的海域, 在重冰年冰厚一般为 25~40 cm (白珊等, 1999)。以往针对渤海波浪能的研究大多没有考虑冬季海冰的影响。根据 Zhang 等 (2020) 的研究, 忽略海冰的影响会导致渤海波能流密度的高估, 而这种高估会严重误导电厂的选址。因此, 考虑海冰存在以准确估算渤海冬季波能流密度, 有待进一步研究。

以往的研究表明波流耦合模型能够有效提高近岸水域风浪计算精度与浅水水域波浪模拟精度 (夏波等, 2013)。为了模拟更接近实际冰水共存海域动力环境的波浪演化过程, 本课题在 Chen 等 (2018) 前期工作的基础上, 采用 MCT (model coupling toolkit) 耦合器将 FVCOM (finite-volume community ocean model) 水动力学模型、海冰模型与 SWAN (simulating wave nearshore) 波浪模型实时耦合, 并在此基础上研究寒潮大风过程中渤海海冰对波浪模拟的影响, 从而实现冰水共存海域下波能流密度的准确评估。

1 数值模型

本文采用非结构化网格有限体积法的海洋模型 FVCOM (finite-volume community ocean model) 模拟渤海海冰 (Chen *et al*, 2003)。该模型包括水动力学模块和非结构化网格的海冰模块, 其中水动力学模块涉及到潮、流、海温和盐度方程的求解, 海冰模块的求解涉及到海冰热力学、动力学、传输以及本构方程的求解 (Chen *et al*, 2003; Gao *et al*, 2011; 张庆河等, 2013)。波浪的模拟采用第三代风浪模式 SWAN (simulating wave nearshore), 版本号为 41.01 (the SWAN Team, 2018)。SWAN 模型是基于包含源汇项的动谱平衡方程描述风浪生成及其在近岸区的演化过程, 具体方程描述参见文献 (Booij *et al*, 1999)。

1.1 海冰模型-水动力学模型-波浪模型的耦合原理

本文在 Chen 等 (2018) 的波流耦合系统的基础上基于 MCT (model coupling toolkit) 耦合器建立了海冰模型-水动力学模型-波浪模型的实时耦合模式。MCT 耦

合器是一套能够使独立的模型实现互相耦合的开源程序工具包, 它采用 Fortran90 进行编写, 能够支持串行和基于 MPI (message passing interface) 的并行运算。MCT 耦合器能够为每个模型分配系统工作进程, 各子模型通过调用 MCT 模块实现变量传递。MCT 耦合器的具体描述参见文献 (Warner *et al*, 2008)。

耦合模型包括 FVCOM 水动力学模型、海冰模型和 SWAN 波浪模型, 由主程序调用各子模型同时独立运行, 当达到用户设定的数据交换时间时, 各子模型通过 MCT 耦合器进行实时变量交换, 交换结束后, 各子模型继续进行运算, 循环进行直至达到用户设定的结束时间, 结束运算。FVCOM 水动力学模型、海冰模型与 SWAN 波浪模型采用了相同的非结构化三角形网格, 不需进行插值计算。

海冰模型-水动力学模型-波浪模型耦合模式之间的变量交换为: (1) 水动力学模型中的潮位 (E_{lev})、垂向平均流速分量 (U_a 、 V_a); (2) 海冰模型中的海冰浓度 (A_{ice}); (3) SWAN 中的波长 (L)、波向 (D_{ir})、有效波高 (H_s)、谱峰波周期 (T_p)、平均波周期 (T_{01})、底部波周期 (T_{bot}) 以及底部波动轨迹速度 (U_{bot}), 如图 1 所示。

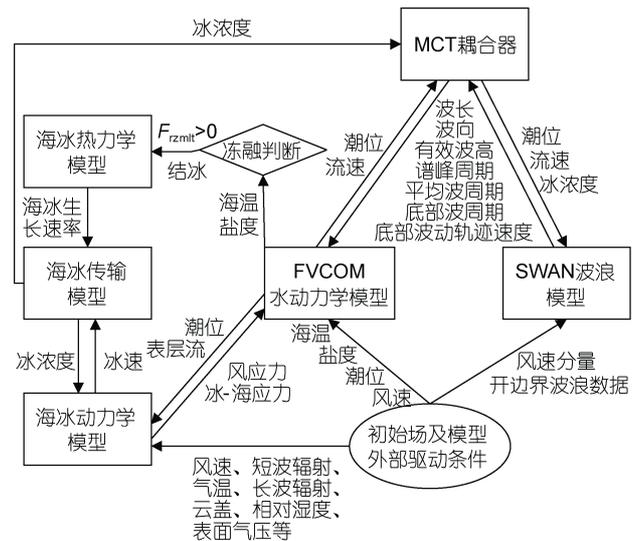


图 1 耦合流程及变量关系传递图

Fig. 1 Model coupling process and its variable transfer
注: F_{rzmit} 为海水结冰的判定条件, 当 $F_{rzmit} > 0$ 时即认为海水开始结冰

1.2 由冰引起的波浪衰减原理

当达到用户设定的交换时间时, 海冰模型将模拟得到的海冰浓度与水动力学模型计算得到的潮位和垂向平均的流速分量传递给 MCT 耦合器, 由 MCT 耦合器将这些变量传递给 SWAN 波浪模型, 以此考

虑潮流和海冰对波浪场的影响。同时 FVCOM 水动力学模型通过 MCT 耦合器接收 SWAN 波浪模型计算得到的包含冰影响的波长、波向、有效波高、谱峰波周期、平均波周期、底部波周期以及底部波动轨迹速度,从而计算出新的潮位和流速传输给海冰模型用于计算新的冰浓度,而新的冰浓度与新的潮位和流速又用于传输给 SWAN 波浪模型,从而实现海冰模型-水动力学模型-波浪模型的耦合。当达到用户设定的结束时间时,计算终止。

在冬季,渤海海域寒潮大风频发,强风是浪的主要驱动条件。在寒潮大风期间,低气温导致海水结冰,而海冰的出现会影响大气与海表面之间的动量交换,从而影响了风浪的形成。根据 Connolley 等(2004)的结果,在冰水共存的海域中,海表面风应力可利用冰浓度的线性修正函数表示。因此本文将海冰模型和水动力学模型耦合模拟得到的冰浓度 A_{ice} 作为海表面应力的一部分,以线性变化加权百分比的方式纳入 SWAN 模型的海面摩阻风速方程中,用于模拟冰水共存条件下的波浪演化过程。在冰水共存海域的波浪模型中,海面摩阻风速 U_{fric} 的表达式被改写为:

$$U_{fric} = \sqrt{C_{drag} \times (1 - A_{ice})} \times U_{10}, \quad (1)$$

式中, C_{drag} 为风拖曳力系数(Wu, 1982); A_{ice} 为冰浓度,由 FVCOM 模型的海冰模块计算输出(Thorndike *et al.*, 1975); U_{10} 为 10 m 高度处的风速。根据式(1)计算出的海面摩阻风速计算 JONSWAP (joint North Sea wave project)谱;接着再输入谱峰波周期对应的频率计算出当前时刻下的作用密度,进而得到波能密度的零阶矩,最终得到考虑冰影响的波浪参数。

1.3 波能流密度的计算公式

单位时间内波浪在传播方向上通过单位波峰宽度上的能量被定义为波能流密度,用 P 表示,单位为 kW/m。由定义可得,波能流密度的计算公式(2)可写为(Brooke, 2003):

$$P = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(f, h) S(f, \theta) df d\theta, \quad (2)$$

式中, ρ 为海水密度; g 为重力加速度; $C_g(f, h)$ 为波群速度; $S(f, \theta)$ 为波浪谱能量密度; f 为波浪频率; h 为水深; θ 为波的传播方向。

有效波高 (Ochi, 1998) 通常定义为 $H_s =$

$$4 \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta}。因此,公式(2)可改写为:$$

$$P = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 C_g(f, h), \quad (3)$$

式中,波群速度 $C_g(f, h)$ 与水深 h 有关(Barbariol *et al.*, 2013):

$$C_g(f, h) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \times \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}, \quad (4)$$

k 为频率,对应波数为(Dean *et al.*, 1991)

$$k = \frac{2\pi}{L}, \quad (5)$$

或者

$$\sigma^2 = \left(\frac{2\pi}{T_e} \right)^2 = gk \tanh(kh), \quad (6)$$

式中, L 为波长; σ 为波的角频率; T_e 为波能量周期。

结合公式(4)~(6), $C_g(f, h)$ 波群速度可以表示为(Liang *et al.*, 2017)

$$C_g(f, h) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \frac{L}{T_e}. \quad (7)$$

结合公式(3)和公式(7),波能流密度公式可以进一步表示为

$$P = \frac{1}{32} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \rho g H_s^2 \frac{L}{T_e}. \quad (8)$$

对于深水区($kh > \pi$, 也即 $h > \frac{L}{2}$ 时), $L = \frac{g}{2\pi} T_e^2$, 波能流密度公式可以进一步简化为(Liang *et al.*, 2017)

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e. \quad (9)$$

1.4 数据来源及模型网格

FVCOM 模型的输入数据包括气象数据(如气温、风、相对湿度、气压、云盖、短波辐射、长波辐射等)、开边界的驱动数据(如潮、海温等)以及初始场数据(海温、盐度)。SWAN 模型的输入数据为 10 m 高度处的风和波浪开边界。

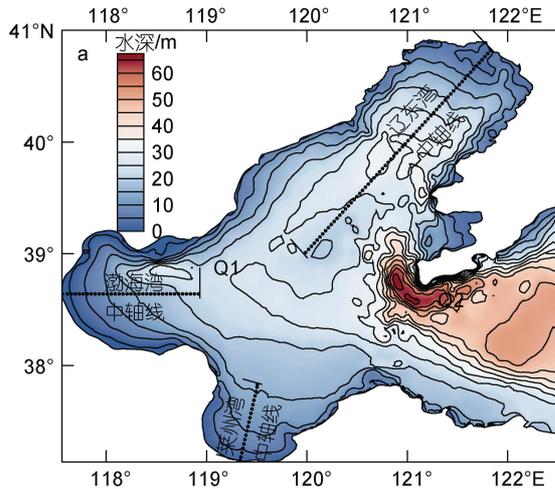
气象数据来自美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP),其时间和空间分辨率分别为 1 h 和 0.2° (Saha *et al.*, 2010)。FVCOM 模型的开边界潮位数据来自 Chinatide (李孟国等, 2007),开边界和初始场的海温和盐度数据来自 HYCOM (HYbrid coordinate ocean model) (Chassignet *et al.*, 2007)。SWAN 模型的开边界波浪数据由第五代欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts)再分析数据提供,时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 0.5° (Hersbach *et al.*, 2016)。以往的研究表明,以上数据与实测值吻合较好,能够为数值模拟提供合理的模型驱动条件(Zhang *et al.*, 2020)。

地形水深来自渤海 1:15 万海图地理信息系统数

据(1999 年), 结合近岸较高分辨率的海图数据以及实测地形数据加密, 最小空间分辨率为 800 m, 如图 2 所示。

2 模型验证

模型验证包括海冰和波浪两部分。海冰验证资料采用 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) 卫星遥感图像, 波浪验证基于全国海洋立体观测网中的浮标观测波浪资料。



2.1 海冰模型验证

2012 年 2 月 8 日, 渤海海冰覆盖范围最大, 模拟的渤海海冰面积约为 $29.79 \times 10^3 \text{ km}^2$, 其中辽东湾占比 71.1%, 渤海湾占比 22.3%, 莱州湾占比 6.6%。模拟的渤海海冰面积占整个渤海面积的 30%, 比 MODIS 的海冰面积偏小 1.2%。渤海湾、辽东湾和莱州湾数值模拟的海冰分布及最大离岸距离与卫星遥感图像基本一致, 如图 3 所示。

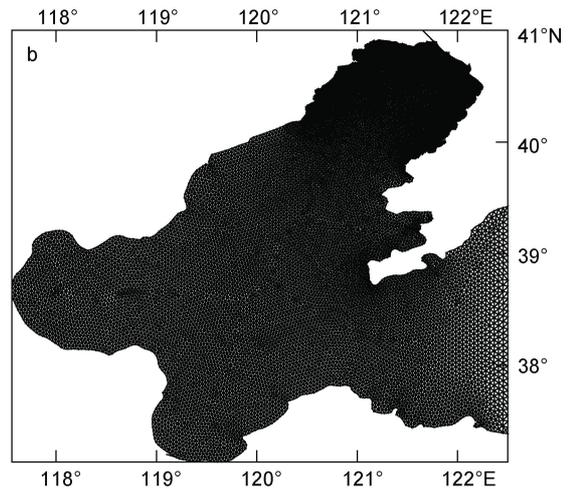


图 2 渤海水深(a)与网格划分(b)

Fig.2 Water depth (a) and grid (b) in the Bohai Sea
注: Q1 和 Q2 分别表示位于渤海湾和老铁山水道的观测点

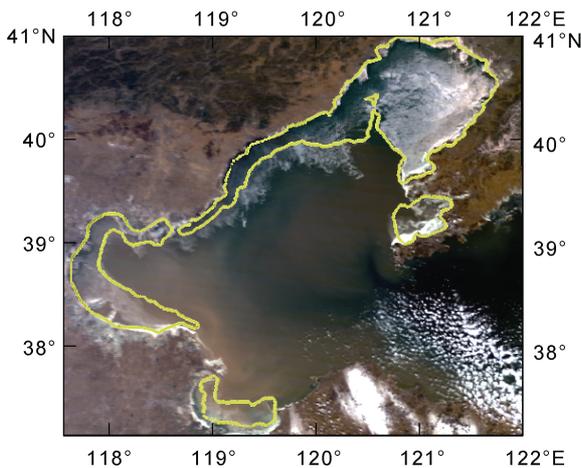


图 3 渤海海冰数值模拟结果与 MODIS 卫星遥感图像对比

Fig.3 Comparison between sea ice numerical simulation result and MODIS satellite remote sensing image of the Bohai Sea
注: 黄色线为数值模拟的海冰轮廓线

2.2 波浪模拟结果的验证

波浪模拟结果的验证取自 2012 年 2 月 5~8 日的

一个寒潮大风过程, 受低气温影响, 此时渤海海冰达到年度最大值。如图 4 所示, 2 月 6~8 日期间, 实测日最大风速在 14.4~15.0 m/s 之间, 风向为 NE 和 NW 向。波浪模拟结果验证包括以下 2 种。(1) 不考虑海冰影响的波浪模拟结果; (2) 通过海冰模型-水动力学模型-波浪模型实时耦合模拟得到的波浪结果。从图 4 中可以看出, 第 2 种实时耦合模式模拟得到的有效波高值与实测值最为接近, 尤其是最大值几乎与实测值吻合。第 1 种无冰影响的有效波高模拟值在大风期间要远远大于实测值, 最大有效波高比实测值偏大 15%。大风期间不考虑海冰影响的有效波高模拟值与实测值的平均相对误差是实时耦合模式的 1.7 倍。

3 海冰对波能流密度的影响

2012 年 2 月 5 日至 8 日, 渤海最低气温为 -24°C , 平均气温为 -20°C 。渤海三个湾均被海冰覆盖, 分布范围达到最大值。从图 5 可知, 2012 年 2 月 5~8 日, 辽东湾近岸的海冰出现概率最大高达 95%, 渤海湾近岸的海冰出现概率最大为 50%, 而莱州湾的海冰出

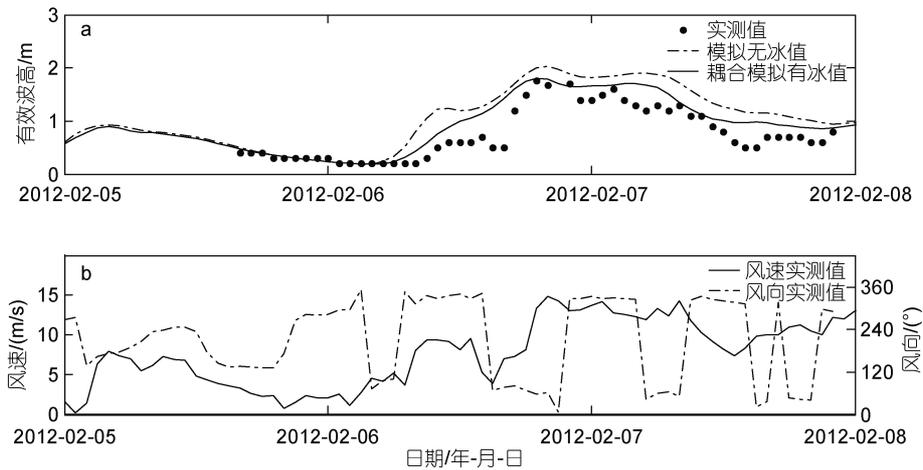


图 4 实时耦合模式模拟的渤海湾 Q1 点(119.0°E, 38.9°N)的有效波高与不考虑海冰影响的模拟值及实测值的对比
 Fig.4 Comparison between significant wave heights simulated by real-time coupled model with sea ice without sea ice and the measured values at point Q1 (119.0°E, 38.9°N) in Bohai Bay

现概率最大为 40%，结冰区域面积占到了渤海总面积的三分之一。

3.1 平均波能流密度及其受海冰影响的空间分布

根据图 6, 2012 年 2 月 5 日 0 时至 2012 年 2 月 8 日 0 时, 在考虑海冰影响的情况下, 辽东湾、渤海湾和莱州湾平均波能流密度的最大值分别为 5.9、6.1 和 5.6 kW/m, 分别位于各自的湾口位置处, 比不考虑海冰影响时分别减小了 10.6%、1.6%和 1.8%。辽东湾、渤海湾和莱州湾近岸区域的平均波能流密度较不考虑海冰影响时最多分别减少了 100%、60%和 50%, 见表 1。

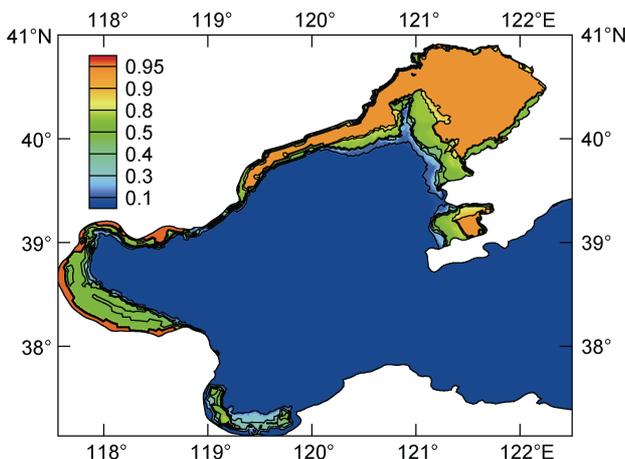


图 5 2012 年 2 月 5~8 日渤海海冰出现概率分布
 Fig.5 Probability of sea ice occurrence in the Bohai Sea from Feb. 5 to 8, 2012

3.2 平均波能流密度沿中轴线受海冰影响的程度

为了深入研究海水结冰对渤海三个湾波能流密

度的影响, 图 7 给出了渤海各湾中轴线处平均波能流密度受冰影响的程度, 中轴线位置见图 2a。2012 年 2 月 5 日 0 时至 2012 年 2 月 8 日 0 时, 距辽东湾湾顶 129.2 km 是海冰沿中轴线处出现的最大离岸距离。其中沿辽东湾中轴线方向距湾顶 78.2 km 内, 海冰出现概率为 95%, 其平均波能流密度受海冰影响最为严重, 减少了 100%。而在距辽东湾顶 78.2~129.2 km 范围内, 随着海冰出现概率逐渐减小, 平均波能流密度受海冰影响的程度也越来越小, 从 100%减小到 32%。而在距辽东湾顶 129.2~255.1 km 范围内, 虽然没有海冰覆盖, 但平均波能流密度仍然受海冰影响而减小, 减小程度从 32%到 10%。这主要是由于海冰的出现阻隔了海-气之间的热量和动量交换, 相当于减小了渤海的有效风区, 从而使得无冰海域的平均波能流密度也会减小。

2012 年 2 月 5 日 0 时至 2012 年 2 月 8 日 0 时, 渤海湾沿着中轴线距离湾顶的海冰最大覆盖范围为 35.3 km, 其中距离湾顶 21.6 km 范围内的平均波能流密度受海冰影响最为严重, 最大减少了 52%。在距渤海湾顶 21.6~35.3 km 范围内, 随着海冰出现概率的逐渐减小, 平均波能流密度受冰影响的减小程度从 52%到 21%。而在距渤海湾顶 35.3~117.7 km 范围内, 虽然没有海冰覆盖, 但平均波能流密度仍然受海冰影响而减小, 减小程度从 21%到 5%。

莱州湾与渤海湾情况类似。2012 年 2 月 5 日 0 时至 2012 年 2 月 8 日 0 时, 莱州湾沿着中轴线距离湾顶的海冰最大覆盖范围为 25.8 km, 在距湾顶 8.0 km 范围内, 平均波能流密度受海冰影响最为严

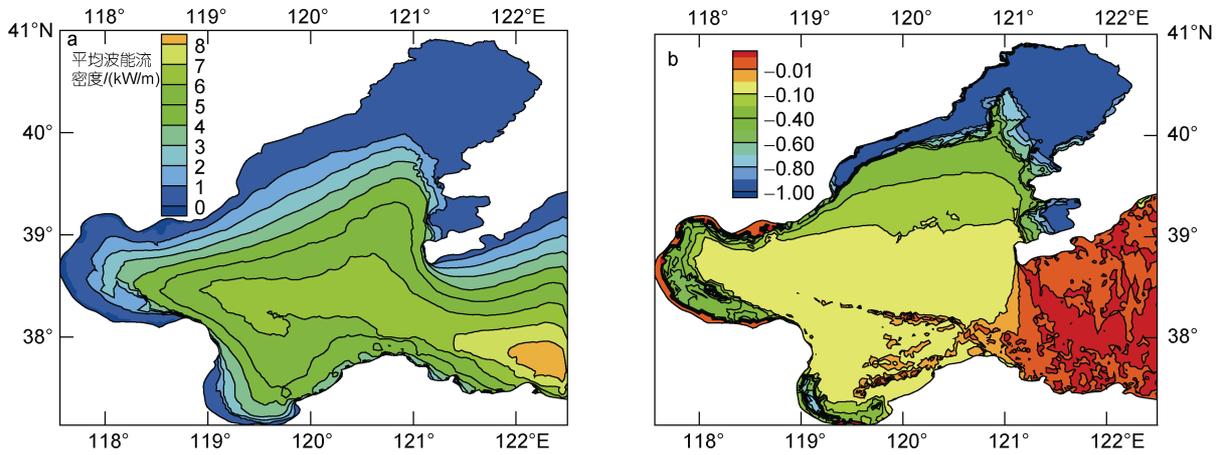


图 6 2012 年 2 月 5 日至 8 日渤海考虑海冰影响的平均波能流密度(a)和受海冰影响的程度(b)

Fig.6 Average wave energy flux with sea ice effect (a) and the influence of sea ice (b) in the Bohai Sea from Feb. 5 to 8, 2012

表 1 渤海平均波能流密度受冰影响区域占比及受冰影响程度

Tab.1 Proportion of the area and the maximum extent of wave energy flux affected by sea ice in the Bohai Sea

统计内容	辽东湾	渤海湾	莱州湾
受冰影响区域占比	100%	100%	100%
受冰影响最大程度	-100%	-60%	-50%

重, 最大减少了 50%。在距莱州湾顶 8.0~25.8 km 范围内, 随着海冰出现概率的逐渐减小, 平均波能流密度受冰影响的减小程度从 50%到 8%。而在距莱州湾顶 25.8~77.1 km 范围内, 虽然没有海冰覆盖, 但平均波能流密度仍然受海冰影响而减小, 减小程度从 8%到 3%。

3.3 无冰覆盖区域波能流密度随时间的演化

渤海的海冰主要位于渤海湾, 辽东湾和莱州湾

的近岸区域, 且辽东湾的冰情最重, 如图 3 所示。海冰的存在阻隔了海-气之间的热量和动量交换, 减小了渤海的有效风区, 可能导致无冰海域的波能流密度减小。为了探讨无冰覆盖海域的波能流密度在考虑和不考虑海冰影响时随时间演化的规律, 挑选了 2012 年 2 月 5 日 0 时至 2012 年 2 月 8 日 0 时渤海海冰年度最大期间渤海湾 Q1 点与老铁山水道 Q2 点进行对比分析。这两个点在这段时间内均无海冰覆盖, 因此我们可以通过对比考虑和不考虑海冰影响两种情况下波能流密度随时间的演化进而判断海冰是否能通过减小有效风区(也即开阔水域)的占比而使得无冰区域的波能流密度减小。

在考虑海冰影响的情况下, 位于渤海湾 Q1 点的波能流密度在 2012 年 2 月 5 日 0 时至 2012 年 2 月 8

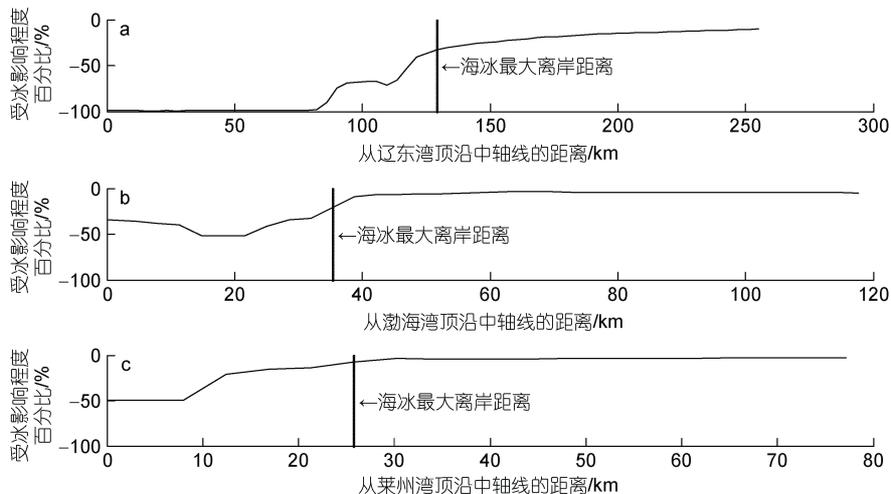


图 7 渤海各湾中轴线处平均波能流密度受冰影响的程度

Fig.7 Effect of sea ice on average wave energy flux at central axis of each bay of the Bohai Sea
注: a: 辽东湾; b: 渤海湾; c: 莱州湾

日 0 时的平均值为 2.5 kW/m, 比不考虑海冰影响时减小了 24%, 最大值为 8.4 kW/m, 比不考虑海冰影响时减小了 18%, 如图 8a 所示。老铁山水道 Q2 点在考虑海冰影响下的波能流密度平均值为 4.3 kW/m, 比不考虑海冰影响时减小了 19%; 最大值为 15.4 kW/m, 比不考虑海冰影响时减小了 14%, 如图 8b 所示。其中, 从 2 月 5 日 0 时至 2 月 6 日 7 时期间平均风速约

为 4.0 m/s, 海冰对波能流密度的影响几乎可以忽略。在 2 月 6 日 8 时至 2 月 8 日 0 时期间, 平均风速为 10.6 m/s, 在考虑海冰影响的情况下渤海湾 Q1 点的平均波能流密度为 4.0 kW/m, 比不考虑海冰影响时减小了 25%。老铁山水道 Q2 点的平均波能流密度为 7.8 kW/m, 比不考虑海冰影响时减小了 20%。由此可见在强风作用下海冰的消浪效果是十分显著的。

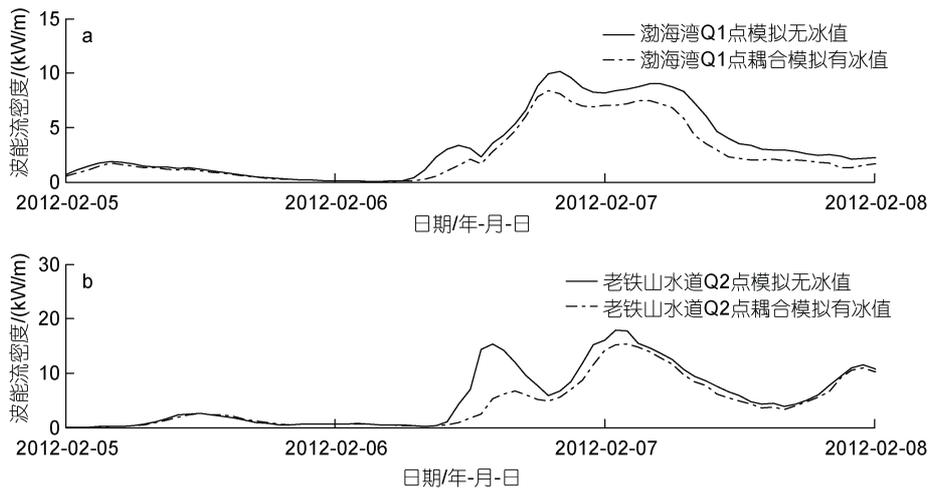


图 8 有无海冰影响的平均波能流密度随时间演化的对比

Fig.8 Comparison in average wave energy flux of time series with and without sea ice effect
注: a: 渤海湾 Q1 点(119.0°E, 38.9°N); b: 老铁山水道 Q2 点(121.078°E, 38.617°N)

与图 8a 的渤海湾 Q1 点相比, 老铁山水道的波能流密度几乎是它的两倍, 即使是在海冰分布年度最大的时刻, 老铁山水道的波能流密度仍然更适合用于波能发电。

4 结语

根据模型验证结果可知, 本文建立的海冰模型-水动力学模型-波浪模型的实时耦合模式能够较好地模拟渤海冬季寒潮大风期间的海冰及波能流密度的分布。根据模拟结果可知, 寒潮大风期间渤海约 1/3 的海域被海冰覆盖, 然而其平均波能流密度受冰影响的区域占整个渤海的 76%, 辽东湾、渤海湾和莱州湾的平均波能流密度受冰影响最多分别减小了 100%, 60%和 50%。

老铁山水道虽然冬季不结冰, 但在寒潮大风期间, 波能流密度的平均值仍然比不考虑海冰影响时减小了 19%。这说明海水结冰不仅导致结冰区域的有效波高和波能流密度会受到海冰影响而减小, 也会导致不结冰海域的有效风区(开阔水域面积)减小, 从而造成不结冰海域的波能流密度减小。此外, 老

铁山水道的波能流密度几乎是渤海湾口的两倍, 即使是在海冰严重的时期, 其波能流密度仍然符合发电需求。

参 考 文 献

- 万勇, 张杰, 孟俊敏, 等, 2014. 基于 ERA-Interim 再分析数据的 OE-W01 区块波浪能资源评估[J]. 资源科学, 36(6): 1278-1287.
- 王鑫, 李大鸣, 王兵振, 等, 2020. 点吸收式波浪能俘获装置结构优化方法研究[J]. 海洋与湖沼, 51(2): 293-297.
- 尤再进, 尹宝树, 石洪源, 2017. 应用“跨零-能量”法估算海洋波浪再生能资源[J]. 海洋与湖沼, 48(5): 926-931.
- 白珊, 刘钦政, 李海, 等, 1999. 渤海的海冰[J]. 海洋预报(3): 1-9.
- 李孟国, 郑敬云, 2007. 中国海域潮汐预报软件 Chinatide 的应用[J]. 水道港口, 28(1): 65-68.
- 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): 1231-1237.
- 张庆河, 张娜, 2013. 渤海海冰演化的三维数值模型[J]. 天津大学学报, 46(4): 333-341.
- 武浩, 夏芸, 许映军, 等, 2016. 2004 年以来中国渤海海冰灾害时空特征分析[J]. 自然灾害学报, 25(5): 81-87.
- 郑崇伟, 2014. 利用 WW3 模式实现中国周边海域波浪能流密度数值预报——以 2 次冷空气过程为例[J]. 亚热带资源与环境学报, 9(2): 18-25.

- 郑崇伟, 苏勤, 刘铁军, 2013. 1988—2010 年中国海域波浪能资源模拟及优势区域划分[J]. 海洋学报, 35(3): 104-111.
- 姜波, 丁杰, 武贺, 等, 2017. 渤海、黄海、东海波浪能资源评估[J]. 太阳能学报, 38(6): 1711-1716.
- 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.
- BARBARIOL F, BENETAZZO A, CARNIEL S, *et al*, 2013. Improving the assessment of wave energy resources by means of coupled wave-ocean numerical modeling [J]. *Renewable Energy*, 60: 462-471.
- BOOIJ N, RIS R C, HOLTTHUIJSEN L H, 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4): 7649-7666.
- BORTHWICK A G L, 2016. Marine renewable energy seascape [J]. *Engineering*, 2(1): 69-78.
- BROOKE J, 2003. *Wave Energy Conversion* [M]. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd: 157-164.
- CHASSIGNET E P, HURLBURT H E, SMEDSTAD O M, *et al*, 2007. The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system [J]. *Journal of Marine Systems*, 65(1/4): 60-83.
- CHEN C S, LIU H D, BEARDSLEY R C, 2003. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(1): 159-186.
- CHEN T Q, ZHANG Q H, WU Y S, *et al*, 2018. Development of a wave-current model through coupling of FVCOM and SWAN [J]. *Ocean Engineering*, 164: 443-454.
- CONNOLLEY W M, GREGORY J M, HUNKE E, *et al*, 2004. On the consistent scaling of terms in the sea-ice dynamics equation [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 34(7): 1776-1780.
- DEAN R G, DALRYMPLE R A, 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists* [M]. Teaneck, NJ: World Scientific Publishing Company: 55-61.
- GAO G P, CHEN C S, QI J H, *et al*, 2011. An unstructured-grid, finite-volume sea ice model: development, validation, and application [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C8): C00D04.
- HERSBACH H, DEE D, 2016. ERA5 reanalysis is in production [J]. *ECMWF Newsletter*, 147: 7, <https://www.ecmwf.int/en/e-library/16299-newsletter-no-147-spring-2016>.
- 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.
- 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.
- OCHI M K, 1998. *Ocean Waves: the Stochastic Approach* [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 92-95.
- SAHA S, MOORTHI S, PAN H L, *et al*, 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8): 1015-1058.
- THE SWAN TEAM, 2018. SWAN user manual [S]. SWAN cycle III version 41.01. Delft, Netherlands: Delft University of Technology: 1-125, <https://swanmodel.sourceforge.io/>.
- 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 S J, YUAN P, LI D, *et al*, 2011. An overview of ocean renewable energy in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1): 91-111.
- WARNER J C, PERLIN N, SKYLLINGSTAD E D, 2008. Using the Model Coupling Toolkit to couple earth system models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 23(10/11): 1240-1249.
- WU J, 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C12): 9704-9706.
- 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, MA Y T, ZHANG Q H, 2018. Prediction of sea ice evolution in Liaodong Bay based on a back-propagation neural network model [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 145: 65-75.
- 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.
- ZHANG N, WU Y S, ZHANG Q H, 2016. Forecasting the evolution of the sea ice in the Liaodong Bay using meteorological data [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 125: 21-30.

ESTIMATION OF WAVE ENERGY FLUX DURING ICE WATER COEXISTENCE IN THE BOHAI SEA

ZHANG Na^{1,2}, WANG Li-Tao¹, GENG Shan-Shan³, ZHANG Qing-He², YOU Zai-Jin⁴,
LI Shuai¹, XU Ning⁵, XU Zhao¹

(1. *Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics & Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; 3. *National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China*; 4. *Centre for Ports and Maritime Safety, Dalian Maritime University, Dalian 116026*; 5. *National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China*)

Abstract To select a candidate site for wave-power plant in the Bohai Sea, a method for estimating wave conditions and wave energy flux in ice-water coexistence sea area was proposed by coupling the sea ice model, hydrodynamic model, and wave model are coupled in real time based on MCT (Model Coupling Toolkit) coupler, in which the ice concentration obtained from the coupling simulation of sea ice model and hydrodynamic model is incorporated into the sea surface friction wind speed equation of wave model in the form of linear correction function. With this method, the evolution of sea ice and wave energy flux in the Bohai Sea during cold and strong winds in winter were simulated. The simulated results show that during the cold wave gale period from February 5 to 8, 2012, the frozen area accounted for 1/3 of the total area of the Bohai Sea, and about 76% area of the average wave energy flux in the Bohai Sea were reduced by sea ice; the average wave energy flux in the Liaodong Bay were reduced by up to 100% due to ice, and the coastal areas of Bohai Bay and Laizhou Bay were most affected by ice by up to 60% and 50%, respectively. The maximum wave energy flux was reduced by 14% even though the Laotieshan Channel was not covered by ice. The method can more accurately evaluate the wave energy flux distribution in the Bohai Sea in winter, and provide a basis for the site selection of wave-power plant.

Key words the Bohai Sea; sea ice model; SWAN model; FVCOM model; MCT coupler; wind friction velocity; real-time coupling; wave energy flux