

核电站温排水融冰特性的数值模拟

姜新舒¹, 李雨珊¹, 张真¹, 李奇¹, 马璞月¹,
张娜², 吴志发²

(1.中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2.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)

摘要: 北方核电厂建设项目环境影响评价环节中, 不考虑结冰条件会导致取水温升的选取偏保守, 从而造成经济损失。为了探讨寒区海域核电站温排水的温升及融冰特性, 采用三维潮流场和温排水模型, 考虑大气-海冰界面热流通、海冰内部热传导、海冰-海洋界面热流通与海冰生消的热力学过程, 以徐大堡核电厂为例研究了温排水在结冰条件下的扩散规律和融冰范围。结果表明, 大潮表层温升为 0.5 °C、1.0 °C 和 2 °C 考虑结冰影响的最大温升包络面积较无冰时分别减少了 38.93%、32.18% 和 3.72%; 且 1~6 号机组同时运行时的温排水融冰范围较 1~4 号机组同时运行时偏大 36.31%。此外, 暗管排水方式占主导的工况与明渠排水方式占主导的工况相反, 由于排水源更靠近底层, 因此表层、中层和底层最大温升包络面积依次增大。该项研究可为寒区海域核电站的环境影响评价提供一种新方法。

关键词: 温排水; 海冰; 融冰范围; 核电站; 数值模拟

中图分类号: X143

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2024)03-0430-08

Study on ice melting by thermal drainage of nuclear power plants based on numerical simulation

JIANG Xinshu¹, LI Yushan¹, ZHANG Zhen¹, LI Qi¹, MA Puyue¹, ZHANG Na²,
WU Zhifa²

(1.China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing 100840, China; 2.Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics & Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In the environmental impact assessment process of northern nuclear power plant construction projects, the influence of icing conditions on the water temperature rise is not considered in the numerical simulation analysis of thermal discharge, which leads to the conservative and uneconomical selection of water temperature rise. To explore the temperature rise and ice melting characteristics of thermal drainage from nuclear power plants in cold regions, a three-dimensional tidal current field and thermal drainage model are established including the thermodynamic process of air-sea ice interface heat flow, sea ice internal heat conduction, sea ice-ocean interface heat flow, and sea ice generation and dissipation. Taking Xudapu Nuclear Power Plant as an example, the diffusion law and melting range of thermal drainage with ice effects are studied. The results show that the maximum temperature rise envelope area affected by sea ice with a surface temperature rise of 0.5 °C, 1.0 °C, and 2 °C during the spring tide is reduced by 38.93%, 32.18%, and 3.72%; respectively, compared to those without sea ice effects; And the melting range caused by the temperature

收稿日期: 2023-10-26, 修订日期: 2023-12-03

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(2022SKYZ339, 2022SKYZ322)

作者简介: 姜新舒(1991-), 女, 辽宁本溪人, 博士, 工程师, 主要从事核电厂冷源安全研究, E-mail: jiangxs@cnpe.cc

通信作者: 张娜(1978-), 女, 天津人, 博士, 教授, 主要从事海冰与近岸水动力相互作用研究, E-mail: cheungna@126.com

drainage during the simultaneous operation of Units 1-6 is 36.31% larger than that during the simultaneous operation of Units 1-4. In addition, the working conditions dominated by concealed pipe drainage are opposite to those dominated by open channel drainage. As the drainage source is closer to the bottom layer, the maximum temperature rise envelope area of the surface, middle, and bottom layers increases sequentially. This study can provide a new method for environmental impact assessment of nuclear power plants in cold regions.

Key words: thermal drainage; sea ice; ice melting range; nuclear power plants; numerical simulation

在“双碳”目标下,核电作为清洁能源,迎来了规模化发展。我国核电站主要分布在沿海地区,以海水作为冷却水源^[1]。渤海每年冬季受西伯利亚冷空气的影响,环渤海近岸会结冰,冰期可达3~4个月^[2]。对厂址位于北方寒冷地区的核电站而言,红沿河核电站、徐大堡核电站和庄河核电站,冬季很可能面临海水结冰造成的取水构筑物结构性失效、取水口堵塞以及其他未知取水风险^[3-4]。与此同时,直流冷却方式会产生大量温排水排放至周边海域,温排水通常被视为可能影响海洋生态系统的热污染^[5]。因此,使用数学模型预测分析温排水对环境的影响是核电厂建设项目环境影响评价的重要工作之一。然而,通常在进行冬季核电厂温排水数学模型预测分析时,并不考虑温排水融冰的过程,导致对于取水温升的选取偏保守不经济。

以往针对电厂温排水的研究方法包括卫星遥感、实测资料分析以及数值模拟^[6]。卫星遥感可以直观地观察温排水的分布特征,但容易受天气影响,且无法获取连续时间内的垂向海温分布^[6-7]。实测资料分析可以更加精确地研究某个站点温排水的垂向分布,但由于实测点位较少,无法对整个工程区的温升特征进行分析^[8]。数值模拟技术可以弥补卫星遥感和实测资料分析方法在电厂温排水研究方面带来的局限性,如MIKE 21及MIKE 3模型中基于热通量法的温盐模块被用来模拟热污染及温排水扩散情况^[9-10]。水平曲线非正交网格模式(estuarine coastal and ocean model, ECOM)被用于研究长江河口夏季温排水向下游输移扩散的规律^[11]。拉格朗日相干结构方法被用于模拟分析大亚湾核电站温排水的输送轨迹^[12]。非结构化网格有限体积法的FVCOM模型被用来模拟杭州湾强潮水域电厂温排水的平面二维温升扩散规律^[13]。三维有限元数学模型RMA2和RMA4被应用于研究电厂

热羽流对珊瑚礁的影响^[14],RMA-10被用于研究鲛鱼圈热电厂温排水的热污染问题^[15]。然而,现有关电厂温排水的研究多是无冰区域,即使是结冰区域也少有考虑海冰的影响。

利用温排水余热融冰既有利于缓解海冰入侵取水口,又可以降低温排水带来的热污染,是一种变废为宝的办法。丹东电厂率先开展了温排水余热缓冰工程研究^[16]。而核电站温排水的融冰效应可能会对辽东湾斑海豹的栖息地造成影响^[17]。主导海冰生消的两大理论分别是海冰热力学与动力学^[18-19]。虽然前人分别对海冰的生消机制与温排水的扩散机理做了大量的研究,但针对温排水融冰的三维数值模拟研究较少。

本研究拟针对徐大堡核电站建立温排水融冰的三维数值模型,模拟分析温排水在结冰条件下的输运和扩散规律,系统性考虑大气-海冰界面热流通、海冰内部热传导、海冰-海洋界面热流通与海冰生消等海冰热力学过程,并对温排水融冰范围进行数学模型研究,为徐大堡核电厂取排水工程的设计和环境影响评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 温排水融冰过程的数值方法

1.1.1 三维潮流及温排水模型基本方程

温排水融冰数值模拟基于非结构化网格有限体积法的FVCOM(Finite Volume Coastal Ocean Model)模型开展,该模式采用非结构化网格有限体积法,对连续性方程、动量方程及状态方程进行离散^[20]。

在 σ 坐标系下,三维温排水的温度对流—扩散方程为^[20]:

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TuD}{\partial x} + \frac{\partial TvD}{\partial y} + \frac{\partial Tw}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + DT_0 + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h H \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h H \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中: T 为温升; K_h , A_h 分别为垂向和水平热扩散系数, 其值通过水动力学中湍流封闭模型求得; T_0 为温排水的初始温度。

1.1.2 海冰热力过程模型基本方程

在自然状态下, 海冰热力过程主要包括: 大气-海冰界面热流通、海冰内部热传导、海冰-海洋界面热流通与海冰消融^[21]。在温排水融冰数值模拟过程中, 海冰-海洋界面的热通量对于海冰消融起主导作用。

1) 海冰-海洋界面的热交换

海冰底面的热通量主要由海洋热通量 Q_w 与海冰在底面上的热传导 Q_{cb} 决定^[22], 可写作:

$$Q_{bot} = Q_w + Q_{cb} \quad (2)$$

$$Q_{cb} = k_i \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_{bot}} \quad (3)$$

式中: k_i 为海冰的热传导系数; z_{bot} 代表海冰底面坐标 (m)。当 $Q_{bot} > 0$ 时, 海冰底面开始消融; 否则, 有新冰生成。

2) 海冰表面的消融变化

海冰表面的消融变化主要是由冰面的热收支平衡 Q_{top} 决定的^[23], 可用以下方程表示:

$$-q \frac{dh}{dt} \Big|_{z=0} = \begin{cases} 0 & Q_{top}|_{T=0} < 0 \\ Q_{top} & Q_{top}|_{T=0} \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: q 为融化单位体积海冰所需要的能量 ($J \cdot m^3$); h 为海冰厚度 (m)。

1.2 建模及验证

1.2.1 三维温排水数值建模

辽宁徐大堡核电厂位于辽东湾西部, 工程海域的潮流场会受到核电厂排水的影响。为此, 我们采用双重嵌套模型即整个渤海模型作为大模型, 并对辽宁徐大堡核电厂址海域进行局部加密作为小模型来开展数值模拟, 如图 1 所示。其

中, 渤海计算水域面积约 $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 核电厂小模型的计算水域面积约 824.7 km^2 。开边界潮位数据从中国近海潮汐预报系统 Chinatide 获取^[24]。FVCOM 模型风场驱动数据来自美国国家环境预报中心 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)的逐时再分析气象数据^[25]。模型参数的选取基于潮位、流速和水温实测与模拟值的校核确定: 水平涡黏系数和水平方向的热扩散系数为 $0.24 \text{ m}^2/\text{s}$, 由 Smagorinsky 公式计算; Mellor Yamada 2.5 阶湍流闭合模型的垂向热扩散系数是 $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$; 底部粗糙高度设置为 0.001 m 。模型参数的率定采用 2019 年的实测水文资料进行。

1.2.2 模型验证

潮位的验证时间是从 2019 年 11 月 28 日 13 时至 12 月 8 日 6 时, #1 测点的实测与模拟潮位的对比结果如图 2 所示。#1 测点的模拟潮位最大值为 1.23 m , 与实测值的相对误差为 -4.65% ; 模拟潮位的最小值为 -1.34 m , 与实测值的相对误差为 -3.60% 。

流速的验证时间是从 2019 年 11 月 28 日 13 时至 29 日 14 时。如图 3 所示, #2 站点的表层模拟流速平均值为 0.32 m/s , 相对于实测值的相对误差为 -5.88% ; 最大模拟流速值为 0.62 m/s , 与实测值的相对误差为 9.82% 。

海温的验证时间是从 2019 年 11 月 28 日 13 时至 29 日 14 时的典型大潮期间。水温实测 #3 站点的表层水温模拟值与实测值的对比如图 4 所示。通过对比可得, 模拟的海表面温度与实测结果具有显著的一致性, 表明所构建的模型成功地反映了工程海域大潮期间水温随时间变化的特征。这一结果证明了在大潮期间所选用的模

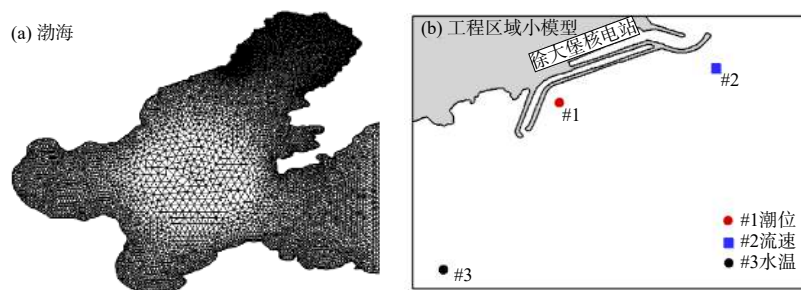


图 1 徐大堡核电站位置及测点布置

Fig. 1 Xudapu Nuclear Power Station location and measurement station

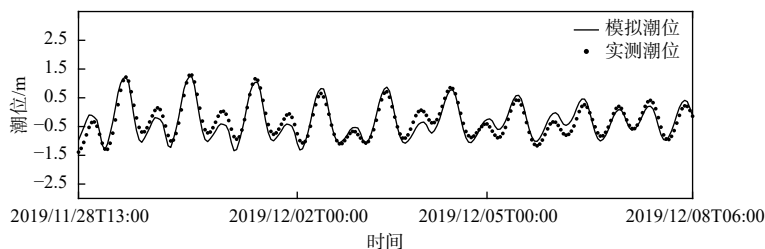


图2 #1 实测与模拟潮位对比

Fig. 2 #1 Comparison of measured and simulated tide levels

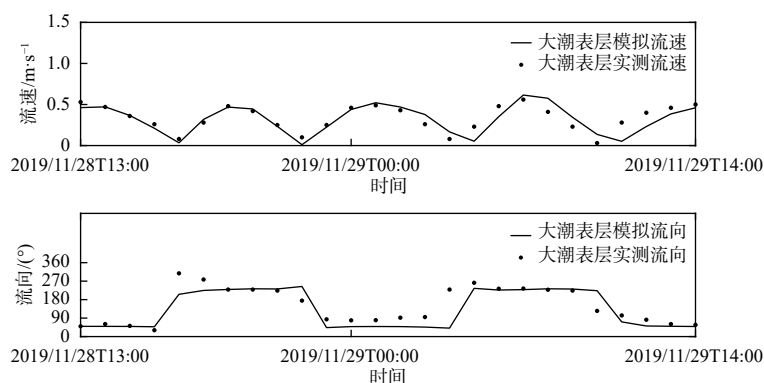


图3 表层流速、流向模拟值与实测值的对比

Fig. 3 Comparison of measured and simulated surface current speed and direction

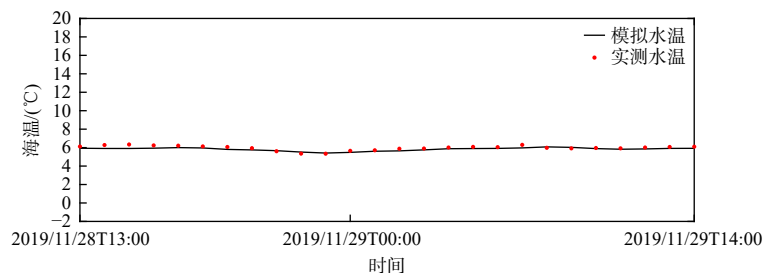


图4 实测与模拟海表面温度对比

Fig. 4 Comparison of measured and simulated sea surface temperature

型计算参数具有合理性,所建立的模型可用于徐大堡核电厂温排水的模拟研究。

1.3 温排水融冰过程的数值模拟

核电厂温排水计算工况见表1,其中,1/2号和5/6号机组采用明渠排放方式,3/4号机组采用暗管排放方式。海水初始水温为 -1.73°C ,海冰初始冰厚为24 cm,海冰初始平均温度为 -3°C ,海冰盐度为4.1,海冰密度为 835 kg/m^3 。模拟时间为2019年11月28日13时至29日14时典型大潮期。为了防止初始固定冰受高气温影响快速融化,模型大气驱动采用2010年1月13日

至14日的低气温。

2 结果与讨论

2.1 考虑海冰的温排水模拟结果分析

徐大堡核电站各工况冬季典型大潮表层、中层和底层的最大和平均温升包络面积见表2。对于1~6号机组同时运行和1~2号机组同时运行这两种明渠排水方式占主导的工况而言,表层、中层和底层最大温升包络面积逐步降低。当3~4号机组同时运行时,由于仅采用暗管排水方式,排水源靠近底层,因此,表层、中层和底

表 1 计算工况及主要参数
Tab.1 Calculation conditions and main parameters

温升/℃	机组排水量/m ³ ·s ⁻¹	机组启用数	温排水盐度
13.33	42.02×2	2 (1, 2号机组)	32.14
13.33	42.02×2	4 (1-4号机组)	32.16
12.10	41.02×2		
13.33	42.02×2	6 (1-6号机组)	31.98
12.10	41.02×2		
13.33	42.02×2		
13.33	41.02×2	2 (3, 4号机组)	31.98

层最大温升包络面积逐步增大。当 1~4 号机组同时运行时,明渠和暗管的排水量相同,但暗管的取水温升较低,0.5℃、1℃和2℃的表层、中层和底层最大温升包络面积逐步降低,而3℃和4℃的表层最大温升包络面积最大,中层和底层最大温升包络面积基本相当。

表 2 各工况最大和平均温升包络面积
Tab.2 Maximum and average temperature rise envelope area under various calculation conditions

运行机组	垂向位置	最大温升包络面积 (km ²)					平均温升包络面积 (km ²)				
		0.5℃	1℃	2℃	3℃	4℃	0.5℃	1℃	2℃	3℃	4℃
1~6号	表层	32.03	26.18	19.53	15.27	11.12	18.93	10.08	0.82	0.32	0.29
	中层	30.98	23.99	14.00	9.40	7.20	13.55	7.49	2.12	0.49	0.32
	底层	29.04	19.03	10.21	8.19	6.50	11.90	7.14	3.65	2.43	1.67
1-4号	表层	26.25	18.06	13.46	8.45	3.89	12.39	4.53	0.57	0.30	0.28
	中层	23.12	13.91	7.40	5.04	3.34	9.07	3.79	0.84	0.40	0.30
	底层	19.16	11.95	7.11	5.08	3.64	8.64	4.35	2.24	1.37	0.86
1~2号	表层	17.75	11.78	6.50	3.71	2.82	4.87	1.12	0.44	0.29	0.27
	中层	16.96	10.89	5.19	2.23	1.10	3.27	1.01	0.33	0.28	0.26
	底层	16.51	10.09	3.64	1.12	0.63	2.38	0.70	0.29	0.27	0.26
3-4号	表层	15.63	8.73	0.79	0.30	0.17	1.89	0.07	0.01	0.00	0.00
	中层	17.08	10.70	3.52	1.31	0.67	5.08	0.34	0.06	0.02	0.01
	底层	19.07	11.13	6.56	3.64	2.42	7.08	2.70	1.01	0.46	0.26

在 1~4 号机组同时运行和 1~6 号机组同时运行时,2℃、3℃和4℃的平均温升包络面积底层反而比表层大,或者基本相当。最大温升一般都发生在典型大潮的最后时刻,而此时工程海域的海冰已经融化,作用在海表面的冰拖曳力消失,海表面的热扩散速度加快,因此表层最大温升包络面积大于底层。而平均温升包络面积则是针对整个大潮期间的平均值,尤其是对于靠近排水机组的2℃~4℃温升区域来说,温排水释放的热能大部分要被冰层吸收,因此表层平均温升包络面积比底层略小或相差不多。

2.2 温排水融冰数值模拟结果

当大潮 1~6 号机组同时运行时,温排水的

融冰范围为 15.58 km²,大潮 1~4 号机组同时运行时,温排水的融冰范围为 11.43 km²(图 5)。由于在典型大潮时,潮差和流速相对较大,水体的水平和垂直混合速度较快,温排水的温升扩散速度相应增快,导致明渠内外温排水的大范围融冰现象。当 1~6 号机组同时运行时,明渠内排水流量增加一倍,导致水体的水平热扩散速度显著提升,这也导致了 1~6 号机组同时运行时温排水融冰范围比 1~4 号机组同时运行时更大。

2.3 排水明渠垂向剖面温升结果

典型大潮水文条件下,图 6 (a) 展示了 1-6 号机组运行时排水明渠温升剖面选取图,其中

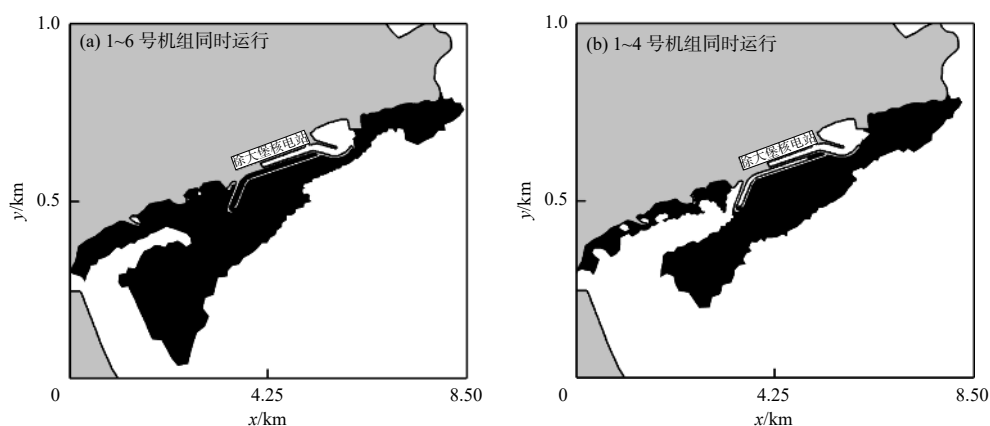


图5 冬季典型大潮融冰范围

Fig. 5 Melting range of typical spring tides in winter

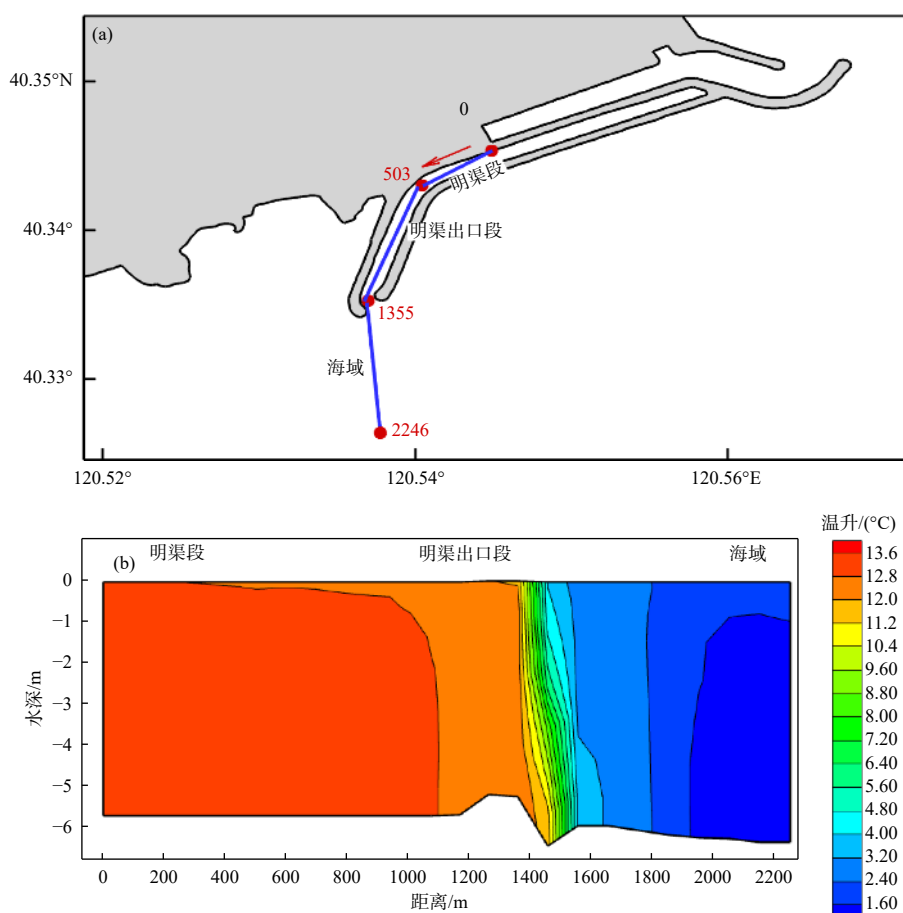


图6 大潮1~6号机组运行时排水明渠剖面选取(a)及其温升图(b)(0~503 m为明渠段, 503~1355 m为明渠出口段, 1355~2246 m为海域段)

Fig. 6 The selection of the drainage channel cross-section (a) and its temperature rise (b) during the spring tide under the operation of Units 1-6 (0-503 m is the open channel section, 503-1355 m is the open channel outlet section, and 1355-2246 m is the sea area section)

0~503 m为明渠段, 503~1355 m为明渠出口段, 1355~2246 m为海域段。由图6(b)可知,

1~6号机组运行时, 排水明渠内1/2号机组和5/6号机组的排水温升均为13.3℃。排水明渠段至

明渠出口段存在温升跃层情况,表层温升略小于中层和底层温升。这一现象主要由于该段区域受 1/2 号机组和 5/6 号机组持续排放的温水影响,使得海温整体较为升高。此外,排水明渠内的表层海水在融冰后受低气温影响,使其温度略低于中层和底层海温。然而,在海域段,由于外海水温较低,排水明渠内 1/2 号机组和 5/6 号机组持续排放温水,导致表层海水在融冰后的表层温升略高于中层和底层温升。

2.4 有冰与无冰温排水模拟结果对比

表层、中层、底层最大温升等值线模拟结果的对比如图 7 所示。对于表层水体,考虑结冰比不考虑结冰时 0.5 °C 和 1.0 °C 最大温升包络面

积分别小 38.93% 和 32.18%, 2 °C ~ 4 °C 最大温升包络面积逐步接近。对于中层水体,考虑结冰比不考虑结冰时 0.5 °C、1.0 °C 和 2 °C 最大温升包络面积减小 46% ~ 47%。对于底层水体,考虑结冰比不考虑结冰时 0.5 °C 和 1.0 °C 最大温升包络面积减小 54%。值得注意的是,考虑结冰时 0.5 °C 最大温升包络面积明显小于不考虑结冰时,因为温排水释放的热量一部分被用于融化海冰。此外,海表面流速也会受到海冰拖曳力的影响变小,导致水平和垂向的热扩散速度变慢。最终,由于靠近排水热源的海冰最先融化,因此在 3 °C 与 4 °C 的情况下,考虑结冰与不考虑结冰时的最大温升包络面积差异不大。

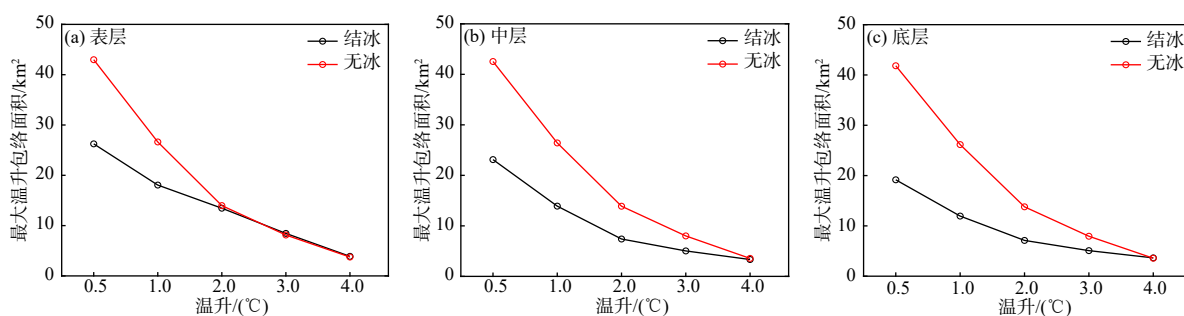


图 7 1~4 号机组同时运行冬季典型大潮最大温升包络面积

Fig. 7 The maximum temperature rise envelope area of typical spring tide during winter when units 1-4 are operating simultaneously

3 结论

(1) 对明渠排水方式占主导的工况而言,表层最大温升包络面积最大,中层次之,底层温升最小。随深度的增加,最大温升包络面积依次减小。然而,对于暗管排水方式占主导的工况,则相反。由于排水源靠近底层,因此,表层、中层和底层最大温升包络面积依次增大。

(2) 考虑结冰的情况下,大潮 0.5 °C、1 °C 和 2 °C 温升时的表层最大温升包络面积较无冰时分别减小 38.93%、32.18% 和 3.72%; 然而, 3 °C 和 4 °C 时两者相差不大。

(3) 大潮 1~6 号机组同时运行时,温排水的融冰范围为 15.58 km²。大潮 1~4 号机组同时运行时,温排水的融冰范围为 11.43 km²。由于典型大潮时潮差和流速较大,水体的水平和垂向

混合较为迅速,温排水的温升扩散速度较快,导致排水明渠内以及明渠外温排水的大范围融冰。1~6 号机组同时运行时较 1~4 号机组同时运行时明渠内排水流量增加 1 倍,水体的水平热扩散速度增大,导致 1~6 号机组同时运行时温排水的融冰范围较 1~4 号机组同时运行时偏大。

参考文献:

- [1] PAN S Y, SNYDER S W, PACKMAN A I, et al. Cooling water use in thermoelectric power generation and its associated challenges for addressing water-energy nexus[J]. *Water-Energy Nexus*, 2018, 1(1): 26-41.
- [2] 许宁,袁帅,史文奇,等.海冰预警监测综合信息服务平台设计与实现[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(3): 447-452.
- [3] 史文奇,袁帅,宋丽娜,等.针对红沿河核电站冷源取水海冰堵塞风险的数值模拟预警设计初探[J]. *海洋通报*, 2020, 39(4): 439-446.

- [4] 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.
- [5] GUIMARÃES L S F, DE CARVALHO-JUNIOR L, FAÇANHA G L, et al. Meta-analysis of the thermal pollution caused by coastal nuclear power plants and its effects on marine biodiversity[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 195: 115452.
- [6] 张永红,李家国,朱利,等.温排水监测海面采样与空间插值方法优化研究[J].海洋环境科学,2017,36(5):765-773.
- [7] 王祥,苏岫,王新新,等.基于Landsat-8卫星数据的红沿河核电站温排水监测[J].*红外*,2015,36(8):22-27.
- [8] 苗庆生,周良明,邓兆青.象山港电厂温排水的实测和数值模拟研究[J].海岸工程,2010,29(4):1-11.
- [9] ABBASPOUR M, JAVID A H, MOGHIMI P, et al. Modeling of thermal pollution in coastal area and its economical and environmental assessment[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2005, 2(1): 13-26.
- [10] ZHANG X R, SHI H Y, ZHAN C, et al. Numerical simulation calculation of thermal discharge water diffusion in coastal nuclear power plants[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(9): 1371.
- [11] 吴宇帆,朱建荣.长江河口电厂温排水输运扩散数值模拟[J].华东师范大学学报(自然科学版),2017(2):126-137,147.
- [12] WEI X, NI P T, ZHAN H G. Monitoring cooling water discharge using Lagrangian coherent structures: a case study in Daya Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 75(1/2): 105-113.
- [13] 汪求顺,刘成刚,李志永,等.杭州湾温排水热扩散的数值模拟[J].水动力学研究与进展,2019,34(5):630-636.
- [14] MUKHTASOR, SAPTARINI D, FUDLAILAH P, et al. On defining the effects of water temperatures increase to the coral reef: a case study of cooling water discharge from a power generation[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 14: 152-160.
- [15] 颜钰,邵冬冬,顾卫,等.鲛鱼圈热电厂温排水的现场观测和三维数值模拟[J].海洋环境科学,2016,35(4):571-579.
- [16] 贺益英.寒区工业取水口防冰工程新方法的研究[J].*水利学报*,2003(1):7-11.
- [17] 徐月平,张晓峰,张兵,等.核电厂温排水融冰预测及影响评估[J].环境科学与技术,2012,35(S2):330-333.
- [18] 陈晓东,王安良,HOYLAND K,等.海冰盐度影响下冰水热力过程的试验研究[J].海洋通报,2019,38(1):38-46.
- [19] FANG Y J, WU T W, HU A X, et al. A modified thermodynamic sea ice model and its application[J]. *Ocean Modelling*, 2022, 178: 102096.
- [20] CHEN C S, LIU H D, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(1): 159-186.
- [21] 张庆河,张娜.渤海海冰演化的三维数值模型[J].天津大学学报,2013,46(4):333-341.
- [22] ÓLASON E Ö, HARMS I. Polynyas in a dynamic-thermodynamic sea-ice model[J]. *The Cryosphere*, 2010, 4(2): 147-160.
- [23] STEELE M, MELLOR G L, MCPHEE M G. Role of the molecular sublayer in the melting or freezing of sea ice[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19(1): 139-147.
- [24] 李孟国,郑敬云.中国海域潮汐预报软件Chinatide的应用[J].*水道港口*,2007(1):65-68.
- [25] SAHA S, MOORTHY S, PAN H L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(8): 1015-1058.

(本文编辑:曲丽梅)