

韩瑞, 杨红义, 赵懿珺, 等. 滨海核电厂取水明渠防波堤设计对取水卷载效应的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(9): 245-256. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.019

HAN Rui, YANG Hongyi, ZHAO Yijun, et al. Impact of breakwater design in water intake open channels of coastal nuclear power plants on entrainment effects [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(9): 245-256. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.019

滨海核电厂取水明渠防波堤设计对取水卷载效应的影响

韩 瑞¹, 杨红义¹, 赵懿珺¹, 曾 利¹, 梁洪华¹, 曹冉冉², 杨 嘉²

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038; 2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘 要:【目的】核电厂冷源安全是保障机组安全稳定运行的前提。近年来, 受海洋环境变化影响, 海洋生物大规模聚集引发取水系统堵塞事件频发, 对核电冷源安全构成严峻威胁。为系统性提升取水安全保障能力, 同时减轻取水工程对海洋生态环境的影响, 开展了取水卷载的针对性研究。【方法】采用三维水动力模型耦合粒子迁移模型, 系统研究了核电厂取水明渠不同防波堤设计对取水流场分布及取水生物卷载效应的影响。【结果】结果显示: 防波堤设计弧度为 90°, 取水设计流速小于潮流平均流速, 取水口进流非均匀度约为 3 时, 水流对生物的疏导效应较好, 生物卷载率较低, 与其他设计情况相比, 生物卷载率可减少约 50.5%。【结论】不同防波堤设计对明渠取水流场特性等存在明显影响, 对取水口随流迁移的海洋生物产生了一定的聚集或疏导效应, 进而影响了取水生物卷载。适宜的防波堤设计可以显著减缓取水对海洋生物的影响, 降低冷源堵塞风险。研究可为滨海核电厂取水工程设计优化、取水卷载效应定量评估提供方法, 为保障取水安全及生态运行提供依据。

关键词: 取水明渠; 防波堤; 水动力; 卷载效应; 核电冷源安全; 滨海核电厂; 粒子迁移模型; 海洋生态效应

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.019

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)09-0245-12



Impact of breakwater design in water intake open channels of coastal nuclear power plants on entrainment effects

HAN Rui¹, YANG Hongyi¹, ZHAO Yijun¹, ZENG Li¹, LIANG Honghua¹, CAO Ranran², YANG Jia²

(1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: [Objective] The safety of the nuclear power plant cold source is a prerequisite for ensuring the safe and stable operation of generating units. In recent years, frequent incidents of water intake system blockage triggered by large-scale

收稿日期: 2025-05-20; 修回日期: 2025-07-11; 录用日期: 2025-07-17; 网络出版日期: 2025-09-11

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3203903); 国家自然科学基金(52179083); 国家自然科学基金(42206214)

作者简介: 韩 瑞(1986—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要研究方向为滨海核电厂取水关键技术。E-mail: hanrui_first@163.com

通信作者: 杨红义(1997—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为滨海核电厂取水卷吸效应。E-mail: hongyi_yang1103@hotmail.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

aggregation of marine organisms driven by environmental changes in marine ecosystems have posed serious threats to the safety of nuclear power plant cold source. To systematically enhance the safeguarding capacity of water intake systems while mitigating the impact of intake engineering projects on the marine ecological environment, it is imperative to conduct targeted research on water intake entrainment. [Methods] A three-dimensional hydrodynamic model coupled with a particle migration model was used to systematically investigate the impact of different breakwater designs in water intake open channels of nuclear power plants on the distribution of intake flow fields and the biological entrainment effect of water intake. [Results] The result showed that when the breakwater was designed with a curvature of 90° , the designed water intake velocity was lower than the average tidal flow velocity. The inflow non-uniformity at the intake was approximately 3, and the hydrodynamic conditions demonstrated favorable guiding effects on marine organisms and a lower entrainment rate. Compared to other design scenarios, this configuration could reduce entrainment by approximately 50.5%. [Conclusion] Different breakwater designs significantly affect the flow field characteristics of open-channel water intake, generating aggregation or guiding effects on marine organisms migrating with the flow near intake structures. This consequently affects biological entrainment during water intake. Appropriate breakwater designs can substantially mitigate the impact of water intake operation on marine organisms while reducing cold source blockage risks. The findings provide method ologies for optimizing the engineering design of water intakes in coastal nuclear power plants and quantitatively assessing water intake entrainment effects, thereby offering a basis for ensuring water intake safety and ecological operation.

Keywords: water intake open channel; breakwater; hydrodynamics; entrainment effect; safety of nuclear power plant cold source; coastal nuclear power plant; particle migration model

0 引 言

发展核电是我国能源实现低碳化转型,促进经济和社会持续发展的重大战略举措^[1]。核安全是核电发展的生命线,也是国家安全的重要基石,冷源安全是核安全的重要组成部分。我国现阶段所有核电厂均分布在滨海地区,以厂址附近海水作为机组运行时的冷却水源。若冷源取水系统堵塞,可能导致机组被迫降功率或停堆停机,严重时甚至引发核安全事故,造成无法挽回的损失^[2]。随着海洋环境变化,局部海域生态异常^[3],核电厂取水设计初期未充分考虑上述因素^[4],海洋生物大规模聚集堵塞滨海核电冷源取水系统的事件在世界范围内频繁发生^[5],冷源安全形势已十分严峻。同时,进入取水系统的海洋生物在高压、高温、机械碰撞等作用下的损伤或死亡^[6]对区域海洋生态造成了负面影响^[7-8]。因此,有必要开展取水卷载针对性研究,以协同保障核电冷源安全并减轻其对海洋生态的影响。

学者们围绕冷源安全保障开展了一系列研究。RYU等^[9]发现防波堤位置、结构布置及其与波向的关系会显著影响口门内波高分布和工程防护效果;提出口门朝向与强浪方向不一致时,可有效减少波浪对取水口的影响,指出了在近岸设置防波堤的必要性;王印忠等^[10]针对取水设计中遇到的多向流冲击、生物附着和堵塞等问题,提出了采用圆柱体作为取水头部以适应复杂的海洋情况;张俊等^[11]基于滨海核电厂取排水工程的实践经验,系统梳理了工艺要求,提出了通过优化平面布局实现集约化,采用管涵式结构

设计以及实施深水排放等策略,实现取排水系统的整体优化;DANIEL等^[12]提出了采用氯离子和铜离子的协同防污方案,证实该方案可显著延长冷源取水系统中拦污网的使用寿命;针对取水系统生物破坏,现有研究^[13]已形成拦截、材料涂层处理、物理清除及运行调控等多类防控技术;ROGERS^[14]研究了带式、鼓式筛网回收鱼类资源的特点,并应用于英国两座发电厂,大幅降低了取水的鱼类卷载率;GUO等^[15]基于有限元法模拟了取水明渠内拦污网的受力特性,提出了总拖曳力和主绳张力与流速、水位及网目密度呈二次方关系,与网宽呈线性关系,为拦网受力分析提供了基础;STOILOVA等^[16]研究了气泡幕、物理格栅对鱼类的驱导效果;FEELY等^[17]研究了声波对鱼类行为的干扰效果,但该类型措施运行时受潮流的影响较大。然而,上述研究虽在工程防护和拦污优化等方面提出了诸多建议,却较少涉及生物在取水口近区的随流迁移过程及相应的卷载效应定量研究。目前,对取水卷载海洋生物影响的估算主要依据《建设项目对海洋生物资源影响评价技术规程》(SC/T 9110—2007)^[18]中的计算方法获得,该方法根据电厂附近海洋生物的调查丰度,结合电厂取水量,估算全年的生物损失,未考虑不同取水设计、取水水动力条件变化等对海洋生物卷载区别^[19-20]。徐兆礼等^[21]、黄晓琛等^[22]研究了滨海电厂取水对海洋生物的影响,如电厂取水会影响生物的洄游路线或造成机械损伤等,但未对生物卷载率进行定量评估;曹静等^[23]、李铁军等^[24]、WANG等^[25]在电厂附近海域开展生物调查,定量评估了取水对生物的影响,为取

水卷载效应的定量计算提供了基础数据;聂洪臣等^[26]分析了大型藻类、水母的生物量变化趋势,评估核电冷源风险;左志远^[27]分析了昌江核电厂取水明渠设计存在的缺陷,提出了优化方案,但未对优化方案的取水卷载效应进行定量评估。综上所述,对取水卷载的定量研究主要以渔业调查为基础,卷载效应的估算方法尚未考虑不同取水工程、潮流环境等造成的差异,估算结果保守,且与实际情况可能存在较大偏离。

上述研究为充分认识核电厂取水流场的重要性及取水卷载对海洋生物的影响提供了支持,但涉及生物在取水口近区随流迁移及相应的卷载效应研究较少,国家也提出了取水工程设计应充分重视取水口近区流场对生物的导避影响,如何提出取水设计原则及量化指标是亟待解决的问题。为响应国家核电冷源安全与海洋生态保护的新要求,本研究基于对我国滨海核电厂取水明渠结构特征、防波堤设计参数及海域潮流条件的调研,构建了电厂取水明渠概化物理模型。通过耦合三维水动力模型与卷载生物特征的粒子迁移模型,模拟分析了不同防波堤设计方案下的取水流场分布规律及生物卷载效应。据此提出减缓卷载效应的防波堤优化设计原则与推荐型式,为滨海核电厂取水工程的设计优化、改造效果评估及卷载效应分析提供方法支撑,对保障核电取水安全、制定生态友好型核电工程规范具有重要理论与实践意义。

1 滨海核电厂取水明渠原型概化

我国滨海核电厂取水明渠设计特点及相应厂址附近海域潮流流速特征值如表 1 所列。我国滨海核电厂主要采用明渠取水,按照明渠所处位置与岸线的距离,可分为贴岸与离岸取水两种类型。对于近岸地形较陡、水深较大的海域,一般可采用贴岸取水,即贴岸取水对厂址近岸水深要求较高。我国沿海大陆架平坦、开阔,近岸水深通常相对较浅,离岸明渠是我国核电厂普遍采用的取水方式。研究该

类型明渠防波堤设计对取水卷载的影响,可为我国 60%的核电厂取水设计优化及卷载效应评估提供参考。调研成果表明:(1)取水明渠结构:以直堤连接防波堤的型式为主;(2)明渠取水运行参数:目前已运行的每台 100 万 kW 级机组的冷却水流量约为 50~82.5 m³/s^[28],以多台机组共用一条取水明渠为主,取水水深约为 5~10 m,取水流速小于或等于潮流流速;(3)潮流以沿岸往复流为主,涨落潮平均流速约为 0.3 m/s。

基于上述调研结果,提出了两种研究概化原型(见图 1):(1)取水明渠结构:直堤连接弧形防波堤,直堤段长 800 m(海域及陆域部分各 400 m),宽 200 m,防波堤弧度分别为 90°[见图 1(a)]和 180°[见图 1(b)];(2)参考多机组共用取水明渠的核电设计现状,取水设计流量为 300 m³/s,运行水深分别为 5 m、10 m,取水设计平均流速对应分别为 0.3 m/s 和 0.15 m/s;(3)潮流为沿岸往复流,平均流速为 0.3 m/s。

2 研究方法

2.1 三维水动力模型

采用三维水动力模型模拟取水流场变化。采用 RNG *k-ε* 湍流模型,对于近壁区域采用增强型壁面函数,该湍流模型能较好地反映流动的强旋转及强应变特征,在研究中应用广泛。其控制方程为

$$\begin{aligned} \nabla \cdot u &= 0 \tag{1} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u &= -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla u) - \frac{2}{3} \nabla \cdot (kI) \tag{2} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k u) = \nabla \cdot (a_k(\mu_{eff} \nabla k) + G_k - \rho \varepsilon) \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon u) &= \nabla \cdot (a_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon) + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \frac{\rho C_{2\varepsilon} \varepsilon^2}{k} \tag{4} \end{aligned}$$

表 1 明渠取水工程统计

Table 1 Statistics of water intake open channel projects

核电厂	潮流流速/m·s ⁻¹	明渠结构	明渠平均水深/ m	明渠平均流速/m·s ⁻¹
A	0.13~0.53	离岸直堤明渠+弧形防波堤	5	0.20~0.30
B	0.37~0.62	离岸直堤明渠+弧形防波堤	6	0.23
C	0.15~0.30	贴岸直堤明渠+弧形防波堤	7	0.20
D	0.16~0.30	贴岸环抱式明渠	8	0.28
E	0.16~0.51	近岸环抱式明渠	7	0.20~0.45

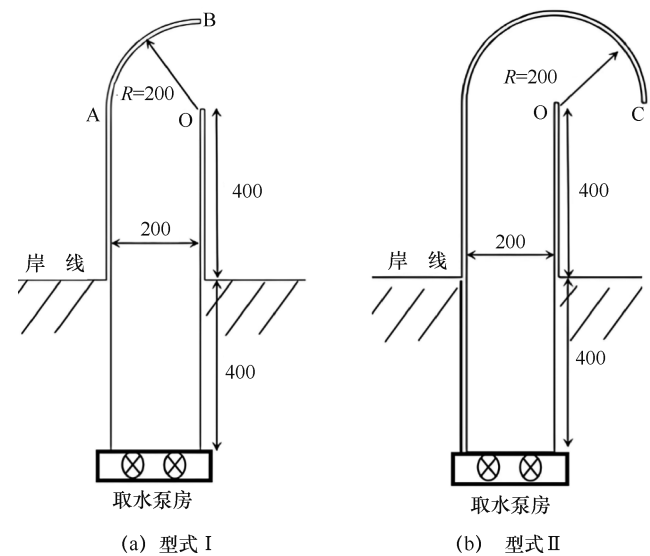


图1 模拟的取水明渠结构示意图(单位: m)

Fig.1 Schematic diagram of simulated water intake open channel structure (Unit: m)

式中, u 为时均速度 (m/s); t 为时间 (s); p 为压力 (Pa); ρ 为密度 (kg/m^3); μ_{eff} 为湍动有效黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); k 为湍动能 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$); I 为二阶单位张量; α_k 为湍动能普朗特数; ε 为湍动耗散率 (m^2/s^3); α_ε 为湍动耗散率普朗特数; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生项。

2.2 粒子迁移模型及卷载率计算

卷载生物通常体型较小、几乎无游动能力, 如浮游植物、鱼卵、仔稚鱼等, 其生物密度与水流近似, 迁移主要受潮流驱使^[18]。本研究中, 将卷载生物概化为球形粒子(以下简称粒子), 密度与水流相似, 暂不考虑其自主游动等, 基于拉格朗日方法建立了粒子迁移模型, 并与三维流场模型耦合, 模拟粒子迁移轨迹, 控制方程为

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (5)$$

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{u - u_p}{\tau_r} + \frac{g(\rho - \rho_p)}{\rho_p} \quad (6)$$

式中, x 为粒子运动位移 (m); u_p 为粒子运动速度 (m/s); τ_r 为海洋生物运动松弛时间 (s), 由公式(7)计算; g 为重力加速度 (m/s^2); ρ_p 为海洋生物密度 (kg/m^3)。

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu C_d R_e} \quad (7)$$

式中, C_d 为海洋生物阻力系数; d_p 为海洋生物特征长度 (m); R_e 为基于海洋生物特征长度的雷诺数。

卷载率指受取水汇流影响进入取水系统的粒子数

占投放总粒子数的百分比, 其计算公式如下

$$P = \frac{N_{\text{in}}}{N_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中, N_{in} 为随流迁移进入取水明渠的粒子数; N_0 为取水上游某一断面(垂直于岸线)投放的粒子数。

2.3 计算域、网格划分及模拟计算情景

模拟区域包括取水明渠及外部海域, 顺岸方向为 6 000 m, 离岸方向为 2 000 m, 计算域及网格划分(见图 2)。

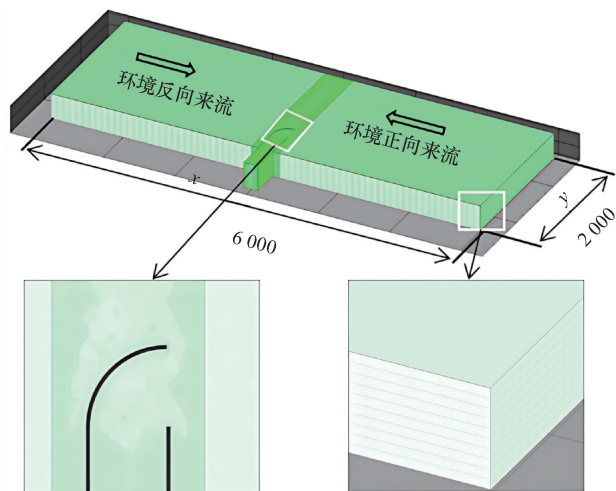


图2 计算域及网格划分(单位: m)

Fig.2 Computational domain and mesh division (Unit: m)

模型中粒子投放方法: 初始时刻, 将生物粒子均匀投放于释放断面, 该断面处环境流场应以不受取水工程影响为宜。投放控制条件: 释放断面宽度确保投放的生物粒子能够覆盖取水工程卷载影响范围为宜; 释放水深以能够反映不同水层粒子迁移规律为宜。

基于对滨海核电厂典型明渠取水工程所处水域水文、地形条件及取水运行情况等分析确定模拟计算情景(见表 2), 基于卷载生物多为小型浮游生物, 包括毛虾、鱼卵和仔稚鱼等^[25], 其在水体中主要栖息于中上层或在不同水深均有一定分布, 生物粒子投放时, 设置初始投放水深为水体中上层(即 20% 水深位置)或均匀分布于整个水深断面(即全断面投放)。

2.4 Pearson 分析

在 Pearson 相关性分析中, P 值作为统计推断的核心指标, 用于量化在原假设成立的前提下获得当前样本结果(或更极端结果)的概率, 其取值范围为 $[0, 1]$ 。本研究采用统计学通用标准, 设定显著性水平 α 为 0.05、0.01 和 0.001 三级阈值, 具体判断准则如下:

当 $P<0.05$ 时,表明在5%显著性水平下拒绝原假设的证据充分(标记为*),即有95%的置信度认为相关性存在;当 $P<0.01$ 时,表明在1%显著性水平下拒绝原假设的证据强烈(标记为**),置信度提升至99%;当 $P<0.001$ 时,表明在0.1%显著性水平下拒绝原假设的证据极强(标记为***),置信度达到99.9%。 P 值与统计显著性呈反向关系, P 值越小或标记星号(*)越多,表明拒绝原假设的统计证据越强,变量间存在显著相关的置信度越高。

表 2 模拟计算情景设置

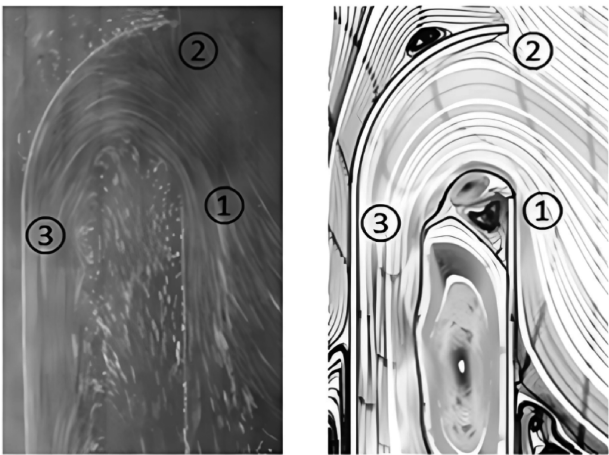
Table 2 Simulation scenario settings

情景	明渠形式	弧形防波堤角度/°	水深/m	取水明渠流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	环境流方向
1	I	90	5	0.30	正向
2					反向
3			10	0.15	正向
4					反向
5	II	180	5	0.30	正向
6					反向
7			10	0.15	正向
8					反向

2.5 模型验证

研究基于取水明渠及海域特征,建立了1:50的正态物理模型,模拟了不同防波堤设计及取水运行情景下的流场变化,并选取表2中情景1验证水动力模型。比较了数值模拟计算及物理模型试验观测的流态(见图3)及特征断面流速(见图4),以90°弧形防波堤取水明渠(型式I)验证过程为例,验证结果表明:环境来流在防波堤堤头分流(见图3中②处),部分水流进入明渠,经过凸岸挑流(见图3中①处)作用,主流逐渐过渡到凹岸(见图3中③处),弯道下游存在不同尺度回流。特征断面流场验证(见图4)(横坐标中 U 为实测流速/模拟流速; U_{av} 为设计平均流速;纵坐标中 W 为测点到O点的距离; h 为设计水深; H 为测点到明渠底部的距离)。验证结果表明:水动力模型与物理试验流场观测吻合较好,流场数值模拟结果能够较好地反映明渠取水流场变化情况。

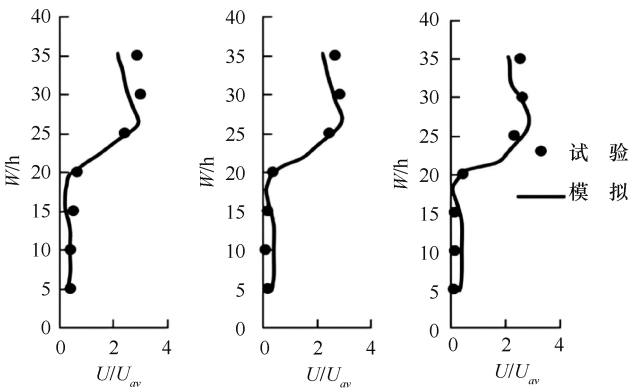
为验证粒子迁移模型,本研究采用自制聚乙烯-钢配重球体(直径为1 cm,密度约为 $1\times10^3\text{ kg/m}^3$,可悬浮于水体中随流运动)作为示踪粒子,在上述物理模型中开展了粒子释放试验,记录了粒子运动轨迹及对应卷载率。由于直接验证粒子迁移轨迹的难度较大,研究对比了不同明渠型式及取水运行情景下,试验与中上层模拟卷载率的变化趋势(见图5)。卷载率



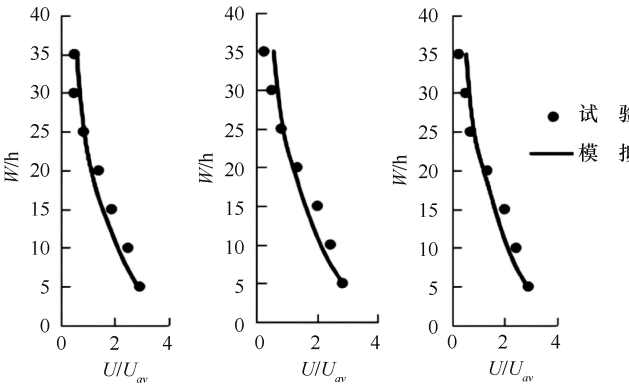
(a) 物理模型 (b) 数模计算

图 3 物理模型试验观测与数值模拟计算流态比较

Fig. 3 Comparison of flow patterns between physical model observations and numerical simulations



(a) OA断面 $H=1.5$ m处 (b) OA断面 $H=2.5$ m处 (c) OA断面 $H=3.5$ m处

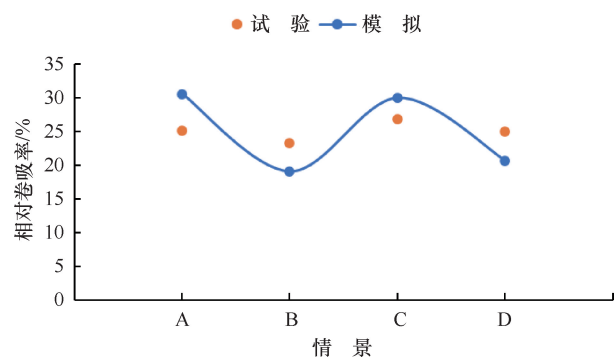


(d) OB断面 $H=1.5$ m处 (e) OB断面 $H=2.5$ m处 (f) OB断面 $H=3.5$ m处

图 4 特征断面流速验证

Fig. 4 Verification of flow velocity at characteristic cross-sections

模拟结果的绝对值与试验结果存在一定差异,但各情景下,相对卷载率的变化趋势对应性较好,粒子迁移模型可以在一定程度上反映不同防波堤设计下取水卷载率的趋势性变化。



情景 A: 明渠型式 I 型、水深 5 m、取水设计平均流速 0.3 m/s;
情景 B: 明渠型式 I 型、水深 10 m、取水设计平均流速 0.15 m/s;
情景 C: 明渠型式 II 型、水深 5 m、取水设计平均流速 0.3 m/s;
情景 D: 明渠型式 II 型、水深 10 m、取水设计平均流速 0.15 m/s

图 5 相对卷载率对比

Fig. 5 Comparison of relative entrainment rates

3 结果与讨论

3.1 取水明渠流场模拟结果

取水流场模拟结果如图 6、图 7 所示。

(1) 型式 I: 环境均匀来流, 来流方向与取水口进流方向平行, 受取水明渠结构阻挡作用, 明渠的迎流面及背流面均出现回流; 受防波堤分流作用, 环境来流在防波堤处出现分流, 部分水流进入取水明渠; 明渠内部主流分布于明渠右侧 (以主流流动方向计, 下同), 左侧分布若干回流区。当取水流量不变, 取水水深减小 (10 m 减小到 5 m), 取水设计平均流速增大 (0.15 m/s 增加至 0.3 m/s) 时, 明渠内主流区分布略展宽, 回流区相应减少; 明渠外迎流面及背流面回流区均减小, 分布形态存在一定差异。

(2) 型式 II: 环境均匀来流, 来流方向与取水口进流方向垂直, 明渠迎流面及背流面回流区分布与型式 I 类似; 明渠内由于弧形防波堤堤头阻挡作用, 堤内侧出现小范围回流, 直堤段流场分布与型式 I 类似。当取水流量不变, 水深减小, 取水设计平均流速增大时, 明渠内部直堤段主

流区渐宽, 回流区减小; 明渠外背流面回流区略有减小。

(3) 不同型式防波堤设计对取水流场分布影响明显, 主要体现在: 相同取水工况下 (即情景 1 和 5、2 和 6、3 和 7、4 和 8), 型式 I 背流面的回流区范围均大于型式 II; 环境正向来流时, 型式 II 分流点提前, 型式 I 水流分流位置处于明渠顶部, 渠顶水流受挑流影响流速加快, 防波堤内侧水流流速较弱, 且存在防波堤内侧小部分水流向外流动的现象; 型式 I 明渠内部直堤段回流区更为复杂, 漩涡较多; 型式 II 明渠防波堤内侧存在一定的回流区域, 对门口有效进流的宽度产生了影响。

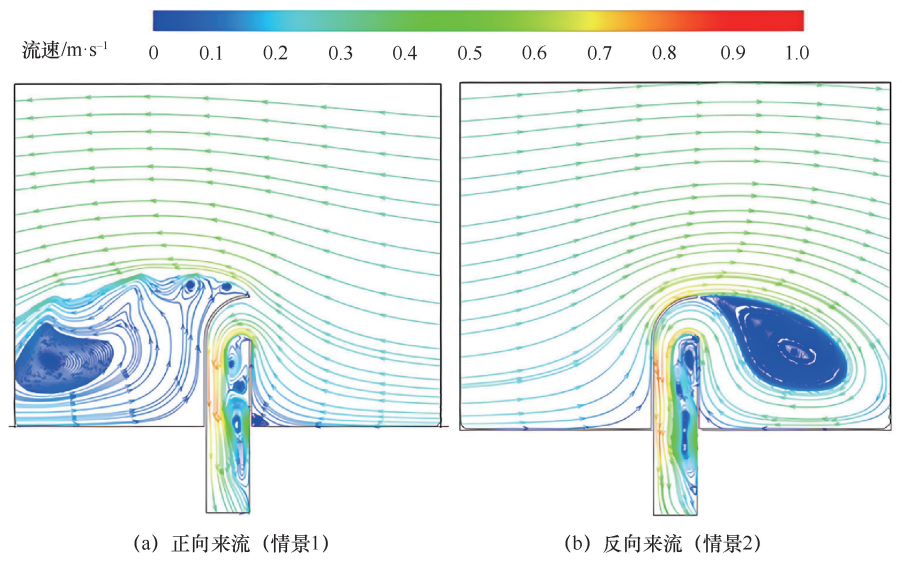


图 6 型式 I 流场计算结果

Fig. 6 Flow field calculation results for type I

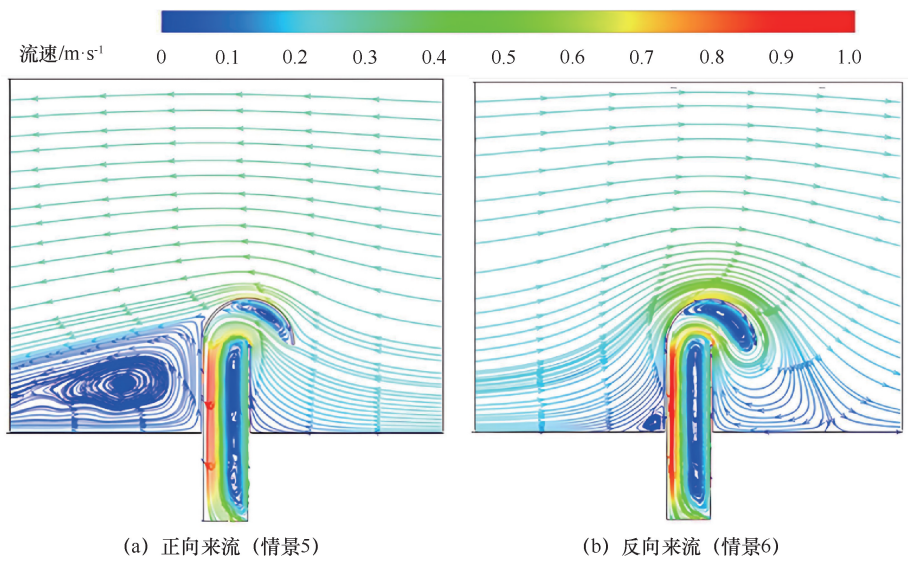


图 7 型式 II 流场计算结果

Fig. 7 Flow field calculation results for type II

3.2 取水明渠进流断面流速特征值分析

明渠进流分布影响了卷载粒子进入取水系统的趋势^[29],其进流断面(位置已在图1中进行标识)水力特征值如表3所列。计算结果表明:

(1)型式Ⅰ:环境流正向来流的进流非均匀度大于反向来流,且非均匀度差异随取水设计平均流速减小而增大;进流量为正向来流大于反向来流,且随取水设计水深增大而增大;即型式Ⅰ正向来流取水口进流分布不均匀现象较反向情况略明显。

(2)型式Ⅱ:明渠进流断面流速分布不均匀,正向来流,取水设计平均流速较大时,进流非均匀度较大;反向来流,取水设计平均流速较小时,进流非均匀度较大;进流量规律与型式Ⅰ相同;即型式Ⅱ正向来流取水口进流分布不均匀现象较反向来流情况显著。

(3)型式Ⅰ与型式Ⅱ相比:相同工况下,明渠口进流流速方向最值差异较小,但在环境正向来流时,水深10 m,取水流速0.15 m/s工况下,型式Ⅰ与型式Ⅱ流速进流非均匀度差异明显;相同工况下,进流量均表现为正向来流大于反向来流情况,且进流量随着取水设计水深增大而增加。

3.3 取水卷载效应模拟结果与分析

取水卷载率计算结果(见表4),部分取水情景粒子迁移轨迹(见图8)。

(1)粒子迁移轨迹:环境正向来流时,受明渠阻挡,粒子运动方向向外海偏转,在弧形防波堤堤头出现聚集。由于型式Ⅰ、型式Ⅱ防波堤设计差异,粒子聚集位置不同,受取水汇流影响,部分粒子进入明渠内部,剩余粒子绕防波堤迁移至明渠后向近岸方向偏转,其中少量粒子进入明渠背流面的回流区;环境反

表3 明渠进流断面水力特征值

Table 3 Hydraulic characteristic values of open channel inlet cross-section

断面位置	工况(取水设计平均流速、水深)	特征值	正 向	反 向
型式Ⅰ OB断面	0.3 m/s 5 m (情景1、2)	方向最值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.76	0.87
			-0.25	-0.09
		进流非均匀度进流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	3.36	3.18
			339.11	335.12
	0.15 m/s 10 m (情景3、4)	方向最值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.49	0.48
			-0.40	-0.11
		进流非均匀度进流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	5.96	3.93
			457.99	390.52
型式Ⅱ OC断面	0.3 m/s 5 m (情景5、6)	方向最值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.78	0.85
			-0.20	-0.04
		进流非均匀度进流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	3.27	2.94
			405.33	311.99
	0.15 m/s 10 m (情景7、8)	方向最值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.37	0.46
			-0.09	-0.12
		进流非均匀度进流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	3.07	3.83
			413.26	324.14

注:方向最值代表与主流进流方向相同或相反的流速最大值,当流速方向与取水主流进流方向相反时,以负数表示;进流非均匀度代表进口断面方向最值之差/取水设计平均流速;进流量代表与取水进流方向相同的总进流量。

表4 明渠卷载率统计

Table 4 Statistics of open channel entrainment rates

型 式	情 景	投放方式	卷载率/%	型 式	情 景	投放方式	卷载率/%
Ⅰ	1	中上层	35.3	Ⅱ	5	中上层	34.3
		全断面	34.7			全断面	34.1
	2	中上层	26.3		6	中上层	24.6
		全断面	29.0			全断面	28.6
	综合卷载率		31.9		综合卷载率		31.4
	3	中上层	21.8		7	中上层	20.0
		全断面	18.8			全断面	18.1
	4	中上层	15.6		8	中上层	20.6
		全断面	12.7			全断面	13.8
综合卷载率		15.8	综合卷载率		16.0		

注:综合卷载率表示环境正向及反向来流情况下平均卷载率。

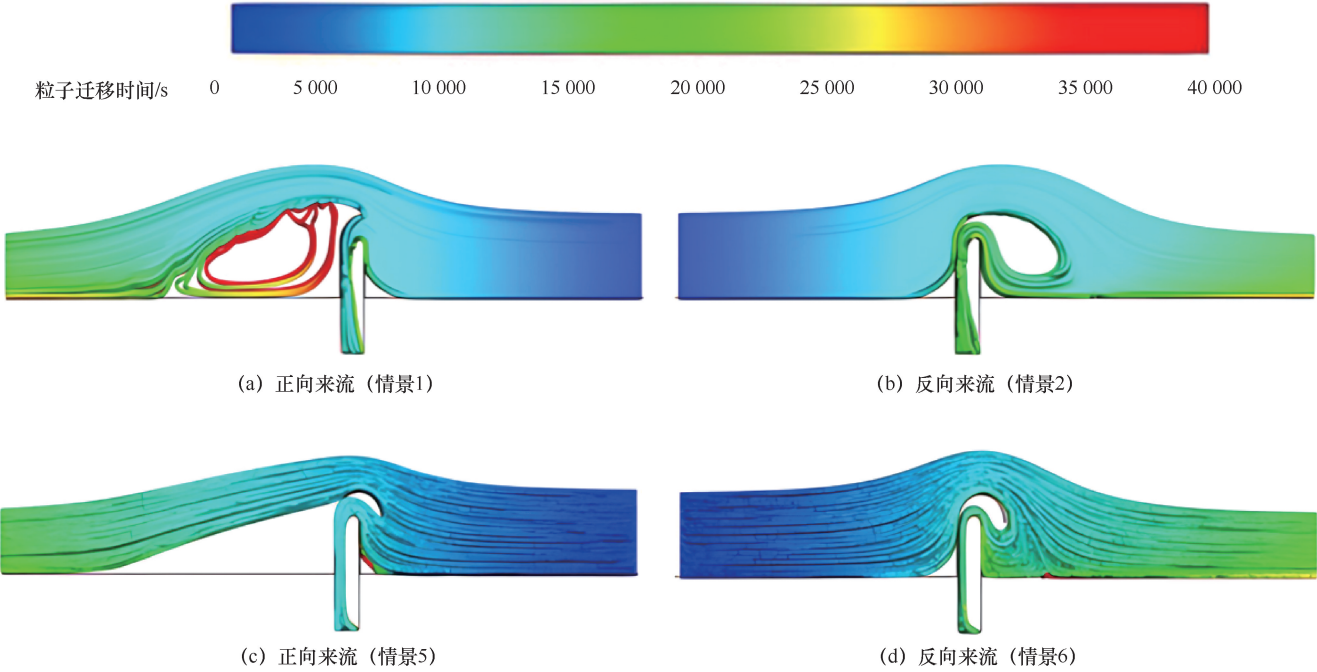


图 8 中上层卷载粒子迁移轨迹

Fig. 8 Migration trajectories of entrainment particles in middle and upper layers

向来流时, 粒子随流迁移至明渠附近, 受结构阻挡影响, 粒子主要沿防波堤切向运动, 由于防波堤设计差异, 粒子持续迁移方向受到影响, 迁移轨迹不同; 在两种形状的防波堤中, 流场在防波堤附近位置流速较小, 部分粒子存在滞留现象, 故存在部分区域未出现粒子迁移轨迹。

(2)中上层取水卷载率变化规律: 取水设计平均流速与环境流速相近时, 型式 I 与型式 II 的中上层取水卷载率均为正向来流显著大于反向来流; 取水设计平均流速小于环境流速时, 型式 I 的中上层取水卷载率为正向来流显著大于反向来流, 型式 II 为反向来流略大于正向来流。结合表 3 中取水流速分布特征可知, 中上层取水卷载率与明渠口流速进流非均匀度变化规律具有较好的一致性, 即中上层粒子迁移与取水口进流非均匀度密切相关。

(3)全断面取水卷载率变化规律: 相同取水工况下, 型式 I 与型式 II 的卷载规律相似, 即正向来流的卷载率大于反向来流; 结合表 3 中进流量分布特征可知, 全断面取水卷载率与明渠口进流量变化规律具有较好的一致性, 即全断面取水卷载率受进流速度、进流面积影响密切。

(4)防波堤设计对粒子迁移影响: 与全断面取水卷载率相比, 环境正向来流时, 型式 I、型式 II 取水卷载率均大于取水量占比; 反向来流时, 取水卷载率均小于取水量占比, 即增设防波堤在正向来流时, 对

粒子迁移具有一定聚集效应, 反向来流时, 具有一定疏导效果, 即明渠进流口门方向的合理确定可以有效减小取水卷载影响。

3.4 取水卷载的影响因素识别与分析

为识别影响取水卷载率的关键因素, 本研究采用 Pearson 相关性分析法, 计算了取水设计平均流速、方向流速最值、进流非均匀度、进流量、口门朝向等与卷载率的相关性系数。结果表明: 卷载率与取水设计平均流速呈显著正相关($P<0.001$), 与口门处的进流非均匀度呈正相关($P<0.01$), 当取水设计流速不变时, 卷载率与口门朝向相关性显著($P<0.01$)。基于以上分析, 影响取水卷载的关键因素为取水设计平均流速、进流非均匀度及口门朝向。

相同防波堤设计型式下, 随着取水设计平均流速的增大, 明渠内外回流区范围减小, 明渠内主流区渐宽, 卷载率增大。综合前述分析可知, 取水设计平均流速及防波堤型式可确定进流速度、进流非均匀度及口门朝向; 当取水流速与环境流速相近时, 型式 II 防波堤弧度较大, 取水流程相对较长, 对取水汇流作用有一定的削弱, 其综合卷载率较小; 当取水流速小于环境流速时, 卷载粒子随流惯性力相对增强, 型式 I 环境反向来流时, 卷载粒子迁移轨迹较长, 反向卷载率及综合卷载率相对于型式 II 均有所减小。

综上所述, 从减小取水卷载影响的角度考虑, 明渠取水设计流速应尽量小于环境流速, 进流尽量均

匀,防波堤设计以型式 I 为优;当海域冷源威胁生物来源相对明确时,防波堤口门朝向应尽量背对生物来源。

3.5 某电厂取水明渠防波堤改造对取水卷载效应的影响分析

采用本研究建立的粒子迁移模型,模拟了循环潮周下某核电厂取水明渠的卷载效应,并基于以上原则对明渠防波堤进行改进,将原防波堤向外延长约 300 m(见图 9),使得取水口流速显著小于环境流速,进流非均匀度降低。分析了改进前后取水卷载率的变化,结果表明:(1)防波堤改进前,电厂取水卷载率随潮流变化(见图 10),当第 15 个潮周结束时,电厂卷载率为 19.5%;(2)在原防波堤基础上,将其向西南侧水域延伸,扩大取水口门以降低取水口平均流速,且使得防波堤口门朝向背对外海生物来源,改进后的电厂卷载率明显降低,第 15 个潮周结束时,卷载率为 9.3%;(3)随着计算潮周的增加,改进方案与原方案的卷载率比值趋于稳定,即改进方案有效降低了取水卷载率,降幅约为 50.5%。模拟结果进一步验证了取水卷载效应对取水关键因素变化的响应,表明卷载率受明渠防波堤设计、取水口流速、进流非均匀度等因素的影响。



图 9 某滨海核电厂取水防波堤现状及改进方案

Fig. 9 Current status and improvement schemes for breakwater of water intake system in a coastal nuclear power plant

3.6 结果讨论

我国滨海核电厂取水工程中 95% 以上采用明渠取水方式^[30-32],设计重点考虑:取水防浪、防沙以及温排水对取水温升的影响,对取水安全及生物卷载关注较少。近年来,我国滨海核电厂发生了多起冷源安全事件,威胁了核电安全^[33-34]。国家要求全国核

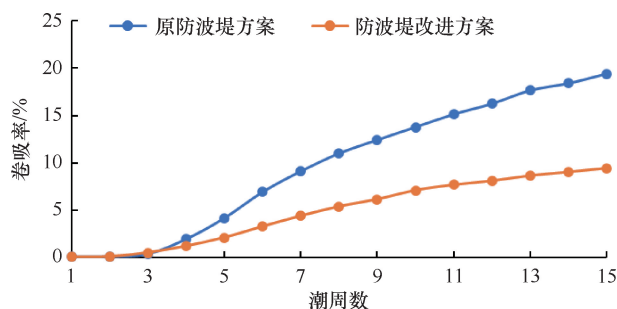


图 10 不同取水方案下取水卷载率随潮周变化

Fig. 10 Variation of entrainment rate with tidal cycle under different water intake schemes

电厂做好取水安全相关的设计、改造工作,保障核电厂运行安全:要求取水工程在设计上充分考虑取水安全问题,贯彻取水流场对生物的主动导避理念;同时,国家对海洋生态环境保护日趋重视,对核电取水提出了更高的要求,颁布了《环境影响评价技术导则核电厂环境影响报告书的格式和内容》(HJ 808—2016)^[35],首次提出了分析核电厂取水系统对水生生物的截留、撞击和夹带以及取排水工程对浮游生物、游泳动物、底栖生物的影响,并评价所造成的影响程度;生态环境部颁布了《核动力厂取排水环境影响评价指南(试行)》(HJ 1037—2019)^[36],进一步规范核电厂取水生物影响评价工作,要求提出适宜的取水生物损失预测模型。

针对早期采用明渠取水的核电厂,如何改进现有设施以兼顾冷源安全与生物保护是普遍面临的挑战。SONG^[19]、邢晓峰^[37]等通过分析全球核电厂冷源安全事件,指出取水工程优化、风险监测预警及多层防护体系建设是提升冷源安全的重要途径。本研究通过对典型核电厂取水工程生物卷载效应的分析,提出明渠改进的核心原则:取水设计流速应尽量低于环境流速,进流非均匀度宜接近 3,防波堤弧度以 90°为优,且口门朝向需尽量背对生物来源。这些原则需结合具体核电海域的生物特性、水文气象、地形与潮流条件进行适应性调整。当前海洋生物对水动力响应的研究尚不充分,建议采用本研究所构建的评估模型,该模型能同时考量取水工程设计、环境水流变化等对取水卷载效应的影响,也可预测不同环境流条件下的生物卷载量,为评估取水生物损伤提供基础。但本研究对海洋生物进行了一定的简化,忽略了生物的形状、密度及行为差异等,且未充分考虑生物行为与水流相互作用的复杂性,可能导致预测结果与实际存在差异。未来需要深化生物特征及其对水流变化的行为响应等方面的研究,进一步优化模型。

4 结 论

采用耦合三维水动力模型的粒子迁移模型系统,研究了不同取水防波堤设计下明渠取水流场特性,提出了不同防波堤设计对取水卷载的影响规律,为核电厂取水工程设计及优化提供参考依据。主要结论如下。

(1)防波堤设计对取水水力特征影响明显:型式Ⅰ正向来流取水口进流不均匀现象较反向情况略明显,型式Ⅱ正向来流取水口进流分布不均匀现象较反向情况显著;正向来流、取水设计平均流速小于环境流速时,型式Ⅰ与型式Ⅱ进流非均匀度差异明显,进流量均表现为正向来流大于反向来流。

(2)粒子迁移受随流惯性力、取水汇流作用等综合影响,不同防波堤型式下,粒子迁移轨迹存在明显差异;全断面取水卷载率与进流非均匀度变化规律一致;全断面取水卷载率与进流量变化规律一致;当取水设计平均流速与环境流速相近时,型式Ⅱ综合卷载率较小;当取水设计平均流速小于环境流速时,型式Ⅰ综合卷载率较小。

(3)取水卷载率与取水设计平均流速呈显著正相关,与进流非均匀度正相关,与口门朝向的相关性显著;为减小取水卷载影响,明渠取水设计平均流速可尽量小于环境流速,进流尽量均匀,防波堤弧度设计以型式Ⅰ较优,即防波堤设计弧度为90°,取水设计流速小于潮流平均流速,取水口进流非均匀度约为3时,水流对生物的疏导效应较好,生物卷载率较低,与其他设计情况相比可减少约50.5%。

参考文献 (References):

[1] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.

LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.

[2] TANG Z H, CHENG F, JIN X X, et al. An automatic marine-organism monitoring system for the intake water of the nuclear power plant[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 109: 208-211.

[3] 孙松. 我国海洋资源的合理开发与保护[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 264-268.

SUN S. Exploring marine resources and sustainable development[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(2): 264-268.

[4] GWYNN J P, HATJE V, CASACUBERTA N, et al. The effect of climate change on sources of radionuclides to the marine environment [J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5: 135.

[5] LIN H S, ZHANG S Y, CAO R R, et al. A review on the risk, prevention and control of cooling water intake blockage in coastal nuclear power plants [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(2): 389-401.

[6] JEBAKUMAR J P P, NANDHAGOPAL G, BABU B R, et al. Impact of coastal power plant cooling system on planktonic diversity of a polluted creek system [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018: 133378-133391.

[7] AZILA A, CHONG V C. Multispecies impingement in a tropical power plant, Straits of Malacca[J]. Marine Environmental Research, 2010, 70(1): 13-25.

[8] ERSATH M M, NAMAZI M A, SAEED M O. Effect of cooling water chlorination on entrained selected copepods species [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019, 17: 129-134.

[9] RYU K H, JEONG W M, OH J E, et al. Wave height reduction inside Pohang New Port, Korea, due to the construction of a detached breakwater[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(10): 1537.

[10] 王印忠, 李雪, 李明, 等. 海水取水头部设计要点[J]. 中国给水排水, 2015, 31(4): 34-36.

WANG Y Z, LI X, LI M, et al. Design essentials of seawater intake head[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(4): 34-36.

[11] 张俊, 夏悟民, 袁立伟, 等. 国内滨海核电厂取排水工程设计发展趋势[J]. 水运工程, 2019(9): 211-217.

ZHANG J, XIA W M, YUAN L W, et al. Development trend of water intake and drainage engineering design for coastal nuclear power plant in China[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(9): 211-217.

[12] RUBIO D, CASANUEVA J F, NEBOT E. Assessment of the antifouling effect of five different treatment strategies on a seawater cooling system[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 85: 124-134.

[13] CHANG Y S, MUNRO C J, FORTUNATO L, et al. Macrofouling remediation strategies for water intakes of desalination and other industrial plants: A review[J]. Desalination, 2024, 590: 117987.

[14] ROGERS N R. A review of technologies employed on some recent UK power plant projects to mitigate the impact of the cooling water intake on aquatic life [M]//International Fish Screening Techniques. Southampton: WIT Press, 2013: 191-206.

[15] GUO S J, LIU H R, ZHOU C, et al. Evaluation of hydrodynamic loads on the planar trash-blocking nets at coastal nuclear power plant intake under flow action based on finite element analysis[J]. Nuclear Engineering and Design, 2025, 439: 114096.

[16] STOILOVA V, BERGMAN E, ALDVÉN D, et al. Downstream

- guidance performance of a bubble curtain and a net barrier for the European eel, *Anguilla anguilla*, in an experimental flume [J]. Ecological Engineering, 2025, 215: 107599.
- [17] FEELY J R, SORENSEN P W. Effects of an ensonified bubble curtain and a cyclic sound on blocking 10 species of fishes including 4 invasive carps in a laboratory flume[J]. Biological Invasions, 2023, 25(6): 1973-1989.
- [18] 中华人民共和国农业部. 建设项目对海洋生物资源影响评价技术规程: SC/T 9110—2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical Regulations for Impact Assessment of Construction Projects on Marine Living Resources: SC/T 9110—2007 [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [19] SONG Y P, XING X F, LIN C K, et al. Advances in the investigation and risk assessment of cold source blockages in nuclear power plants in China[J]. Nuclear Engineering and Design, 2024, 420: 112998.
- [20] HUO J L, LI C, LIU S T, et al. Biomass prediction method of nuclear power cold source disaster based on deep learning [J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1100396.
- [21] 徐兆礼, 李鸣, 张光玉, 等. 涉海电站取排水口工程设计环保措施[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(2): 234-238. XU Z L, LI M, ZHANG G Y, et al. Principle of environmental protection in engineering design for intake and waterspout of power station[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(2): 234-238.
- [22] 黄晓琛, 陈雪初, 彭欣, 等. 滨海电厂温排水对海洋环境的影响研究进展[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 972-976. HUANG X C, CHEN X C, PENG X, et al. The research progress of the impact of thermal discharge from coastal power plants on marine environment [J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(6): 972-976.
- [23] 曹静, 王志富, 丰卫华, 等. 液化天然气接收站取排水对渔业资源的影响研究: 以温州 LNG 接收站工程为例[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(11): 45-49. CAO J, WANG Z F, FENG W H, et al. Impact of water intake and discharge from liquefied nitrogen gas receiving stations on fishery resources: A case study of the Wenzhou liquefied nitrogen gas receiving station [J]. Ocean Development and Management, 2020, 37(11): 45-49.
- [24] 李铁军, 郭远明, 鲍静娇, 等. 舟山电厂二期工程余氯和机械卷载对渔业资源损失量评估[J]. 现代渔业信息, 2011, 26(8): 16-19. LI T J, GUO Y M, BAO J J, et al. Assessment on fishery resource loss owing of the second engineering on Zhoushan power plant to mechanical entanglement and residual chlorine[J]. Modern Fisheries Information, 2011, 26(8): 16-19.
- [25] WANG Z, TANG Y, FU Y Y, et al. Monitoring of biomass at Cooling Water System of Hongyanhe nuclear power plant by using acoustic methods[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 19401007.
- [26] 聂洪臣, 田新华, 杨璐, 等. 2021 年辽东湾东部核电站冷源取水区风险生物监测[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(3): 430-436. NIE H C, TIAN X H, YANG L, et al. Risk biological monitoring of cold source water intake area in eastern Liaodong Bay nuclear power plant of 2021 [J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(3): 430-436.
- [27] 左志远. 昌江核电厂取水明渠设计缺陷及优化方案[J]. 中国核电, 2019, 12(2): 220-222. ZUO Z Y. Design defect and optimization plan for water intake open channel of Changjiang NPP [J]. China Nuclear Power, 2019, 12(2): 220-222.
- [28] 张爱玲, 汪萍, 陈莹莹. 滨海核电厂温排水物理影响模拟中几个关注问题及审评见解[J]. 辐射防护通讯, 2011, 31(1): 21-24. ZHANG A L, WANG P, CHEN Y Y. Some problems and review opinions on physical impact simulation of thermal discharge from coastal nuclear power plant [J]. Radiation Protection Bulletin, 2011, 31(1): 21-24.
- [29] FU X, DU F, HUANG X, et al. Cooling water intake system safety analysis based on impingement probability [J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1133187.
- [30] 蔡立哲, 饶义勇, 赵小雨, 等. 两种评价大型底栖动物堵塞滨海核电站冷源系统的风险指数[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(4): 655-662. CAI L Z, RAO Y Y, ZHAO X Y, et al. Two risk indices for benthic macrofauna entrapment evaluation on the water intake systems in coastal nuclear power plants [J]. Journal of Applied Oceanography, 2022, 41(4): 655-662.
- [31] LI X H, YANG L, REN H T, LIU Z W, JIA Z Y. Analysis of the invasion of Acetes into the water intake of the Daya Bay Nuclear Power Base [J]. Water, 2022, 14(22): 3741.
- [32] PURCELL J, UYE S, LO W. Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: A review [J]. Marine Ecology Progress Series, 2007: 350153-350174.
- [33] 张文斌, 孙伟, 许歆, 等. 某核电厂附近海域生态环境特征及潜在致灾生物研究[J]. 海洋科学, 2022, 46(7): 32-43. ZHANG W B, SUN W, XU X, et al. Ecological environment and the potential hazard-causing organisms in the sea area near the nuclear power plant [J]. Marine Sciences, 2022, 46(7): 32-43.
- [34] 吴彦农, 王娅琦, 侯秦脉, 等. 海洋异物堵塞核电厂取水系统事件的经验反馈[J]. 核安全, 2017, 16(1): 26-32. WU Y N, WANG Y Q, HOU Q M, et al. Experience feedbacks on events of nuclear power plants cold source systems blocked by oceanic foreign matter [J]. Nuclear Safety, 2017, 16(1): 26-32.
- [35] 中华人民共和国环境保护部. 环境影响评价技术导则 核电厂环境影响报告书的格式和内容: HJ 808—2016[S]. 北京: 中国环

境科学出版社, 2016.

Ministry of Environmental Protection of the People' s Republic of China. Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment Format and Content of Environmental Impact Reports for Nuclear Power Plants: HJ 808—2016 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.

[36] 中华人民共和国生态环境部. 核动力厂取排水环境影响评价指南: HJ 1037—2019 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.

Guidelines for Environmental Impact Assessment of Cooling Water

Intake and Thermal Discharge for Nuclear Power Plants: HJ 1037—2019 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.

[37] 邢晓峰, 张正楼, 汤建明, 等. 核电厂冷源取水海洋生物堵塞问题探析 [J]. 核安全, 2021, 20 (6): 103-109.

XING X F, ZHANG Z L, TANG J M, et al. Study on the issue about water intake blockage by marine organism in nuclear power plant [J]. Nuclear Safety, 2021, 20 (6): 103-109.

(责任编辑 王 璐)