

文章编号:1672-3031(2018)03-0207-06

滨海核电厂冷却水明渠浅水排放三维数值模拟

陈小莉, 张 强, 赵懿珩, 袁 珏

(中国水利水电科学研究院 水力学研究所, 北京 100038)

摘要: 温排水是滨海核电厂面临的重要环境问题, 模型预报是评价排放影响的主要手段。三维数学模型能精细反映温排水扩散, 是预报模型的主要发展方向, 但目前其模拟适用性尚需要进一步深入研究。本文以某浅水明渠排放核电厂为例, 开展了海域潮流及温排水三维数值模拟, 并与二维模拟及物理模型试验进行了对比分析, 比较结果表明, 三维数学模型模拟的近区水温垂向分布与物理模型吻合, 模拟的表层4℃和1℃温升范围与其它模型相比具有合理性。研究结果表明三维数学模型能合理反映浅水明渠排放浮力作用下的水温分层, 较好兼顾近区和远区的模拟精度, 对此种排放型式具有较好的适用性。

关键词: 温排水; 明渠排放; 三维数学模型; 水温分层; 输移扩散; 浅水排放

中图分类号: TV133

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.03.006

1 研究背景

现有核电厂的热能利用效率仅有34%左右, 滨海厂址一般采用海水进行直流冷却, 余热主要以温排水形式排入大海, 对近岸海域环境存在诸多不利影响。因此温排水影响是滨海核电厂环境影响评价重点关注的问题。

数学模型和物理模型是核电厂规划阶段预测温排水影响的主要手段。温排水在排放出流近区与环境水体发生剧烈掺混, 随后随潮扩散到远区, 由于近区和远区的稀释扩散时间和空间尺度差异较大, 同一模型兼顾近区和远区存在困难。国内以往主要采用小范围物理模型试验和大范围二维数学模型相结合模拟海域温排水扩散, 物理模型用于模拟取排水近区水域水力、热力特性, 二维数学模型用于模拟大范围远区水动力输运。物理模型模拟温排水受到试验环境条件、比尺效应等限制使精度受到影响, 二维数学模型由于无法反映近区的三维特性, 近区模拟精度则较差, 三维数学模型理论上可以同时兼顾反映近区的三维特性和远区大范围模拟, 国内也有不少相关研究报道^[1-4], 然而在国内滨海核电厂温排水环境影响评价时, 三维数学模型常作为物理模型和二维数学模型的辅助手段, 其独立作为评价依据的情况还相对少, 一方面是由于目前海域采用的分层三维数学模型仍无法准确模拟近区出流掺混, 另一方面是由于三维数学模型的验证相对困难, 在缺少实测资料情况下其结果可信度不明确。从国外情况看, 在发达国家三维数学模型逐渐成为温排水环境影响预测的主要手段^[5], 大范围温排水物理模型很少再使用, 其原因是在大规模电厂建成, 运行监测资料和长期模型研究积累基础上, 对不同水域条件下温排水模拟建立了较为适用的模拟方法和参数, 对后续工程论证时数学模型验证可以较充分, 不需要再开展大范围物理模型试验。随着我国运行机组的增多和运行期间观测资料的积累, 三维数学模型将可获得更为充分的验证, 模型将不断完善, 在温排水预报模拟中的作用也必将越来越重要。为此, 目前亟需将三维数学模型的应用研究进一步推进和深入。本文介绍了某核电厂温排水三维数学模型与二维数学模型、物理模型的对比研究成果, 探讨了三维数学模型的适用性。

收稿日期: 2017-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209228)

作者简介: 陈小莉(1980-), 女, 湖北天门人, 博士, 高级工程师, 主要从事环境水力学研究。E-mail: chenxl_iwhr@126.com

2 数学模型介绍

滨海环境水动力模拟主要采用分层三维数学模型, 这类模型基于静水压假定, 忽略垂向加速度, 常用的分层三维数学模型有 MIKE3、Delft3D、EFDC、TELMAC、POM、FVCOM 等^[6]。本文采用 Delft3D-Flow 模型进行温排水模拟, 该模型可模拟二维(深度平均)或三维非恒定流及其输移性质, 在海域水环境模拟中应用广泛。Delft3D 模型采用三维曲线坐标系, 垂向可采用 σ 坐标或 Z 坐标系统, 在平面上提供了贴体曲面四边形网格生成系统, 可以较好的拟合复杂岸线, 水平方向变量布置在交错网格上, 在每个垂向层中沿水深积分使之成为二维问题, 数值离散采用 ADI 方法。其控制方程如下:

水深平均的连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \zeta} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (1)$$

式中: t 为时间, ζ 和 η 为曲线坐标系下水平方向的坐标, $G_{\xi\xi}$ 、 $G_{\eta\eta}$ 为曲线坐标系转换为直角坐标系的转换系数; U 、 V 分别为 ξ 和 η 方向的垂向平均流速。 Q 表示源汇项, 如取排水、降雨和蒸发等。

模型动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} - fv \\ & = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \zeta} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu \\ & = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (4)$$

式中: u 、 v 、 ω 为曲线正交坐标系下的流速分量; f 为 Coriolis 参数; F_ξ 、 F_η 分别为 ξ 和 η 方向的紊动动量通量; P_ξ 、 P_η 分别为 ξ 和 η 方向的水压力梯度; ν_v 为垂向黏滞系数, Delft3D 提供了 Prandtl 混合长模型, k - L 模型和 k - ε 模型等求解紊动强度, 在紊动方程中均考虑浮力对紊动的影响^[7]。 M_ξ 、 M_η 分别为 ξ 和 η 方向上动量的源汇项; P 为压力, g 为重力加速度, H 为水深, ρ 为密度, 为温度和盐度的函数, 采用 UNESCO 状态方程表示, 密度不均匀对动量的影响通过式(4)在压力项中考虑。

水温输运方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (d+\zeta)T}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial [\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uT]}{\partial \zeta} + \frac{\partial [\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vT]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega T}{\partial \sigma} \\ & = \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right] \right\} + \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + \frac{Q_{tot}}{\rho c_p z_s} + S \end{aligned} \quad (5)$$

式中: T 为水温; D_H 为水平扩散系数; D_v 为垂向扩散系数; S 为源项; Q_{tot} 为水体表面热通量; c_p 为水的比热; Δz_s 为表层厚度。垂向扩散系数取值同紊动黏滞系数, 水平扩散系数除考虑紊动扩散和分子扩散外, 还需计入离散影响, 紊动扩散部分取值同垂向扩散, 离散影响以水平扩散系数背景值输入, 其取值需要率定, Delft3D 提供的默认值为 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

Delft3D 提供了不同计算表面热通量各分项的公式及组合模型。本文主要关注温排水引起的超温散热, 故采用超温模型,

$$Q_{tot} = -\lambda(T_s - T_{back}) \quad (6)$$

式中： T_s 为表层水温； T_{back} 为环境水温； λ 为综合散热系数，其求解按《冷却水工程水力、热力模拟技术规程》中的公式^[8]。

3 计算条件和模型验证

核电厂址附近水域地形及设计取排水布置见图1所示，取水和排水均采用明渠，排水出流水深约2.5 m，排水明渠底宽100 m，采用双明渠排放，温排水流量为228 m³/s，取排水温差10 ℃。明渠排放的温排水进入海域将形成浮力表面射流，射流两侧和底部均会不断卷吸周围水体，当容纳水体水深较浅时，射流底部卷吸作用将受到限制，卷吸作用将主要来自两侧。判断浅水与深水可按射流最大穿透深度 h_{max} 与水深 H 比值近似划分，当 $h_{max}/H < 0.75$ 时为深水， $h_{max}/H > 0.75$ 时为浅水，射流垂向最大穿透深度 h_{max} 可以近似由下式确定^[9]： $h_{max} = 0.42 l_0 F'_0$ ，其中 $l_0 = \sqrt{h_0 b_0}$ ， $F'_0 = u_0 l_0 \sqrt{(\rho_a - \rho) g h_0 / \rho_a}$ ， ρ_a 为环境水体密度， ρ 为温排水密度， u_0 、 h_0 和 b_0 分别为排水明渠出流流速、水深和宽度。按照该厂址排放条件计算得到 $h_{max} = 3.65$ m，明渠口门外围水深 $H = 3$ m，由此可以判断为浅水排放，射流垂向掺混作用不显著，近区主要为侧向掺混。此种情况下，分层三维数学模型忽略垂向动量求解的影响不致过大。

温排水数值模拟范围沿岸线长约130 km，离岸约65 km，计算域面积约9 600 km²，在平面上采用曲面四边形网格，最小网格尺度40 m，最大网格尺度1 000 m，总网格数量31 000个，平面网格布置见图2所示，三维数学模型在垂向上分为10层。计算域开边界采用水位边界，初始水温为环境水温，计算域糙率参考本工程海域已有模拟研究取值0.018~0.025，表面综合散热系数按国内通用计算公式取值^[8]， $\lambda = 45.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ ，水平扩散系数参考以往研究进行了试算率定，取值与水深和流速关

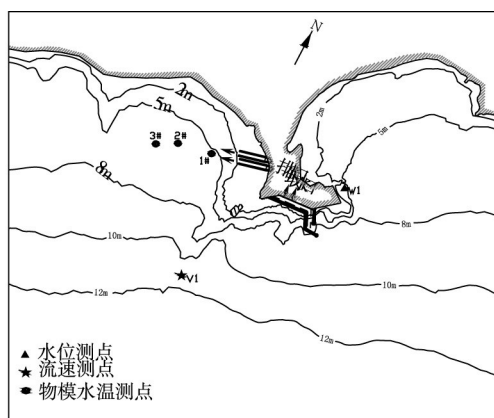


图1 取排水布置

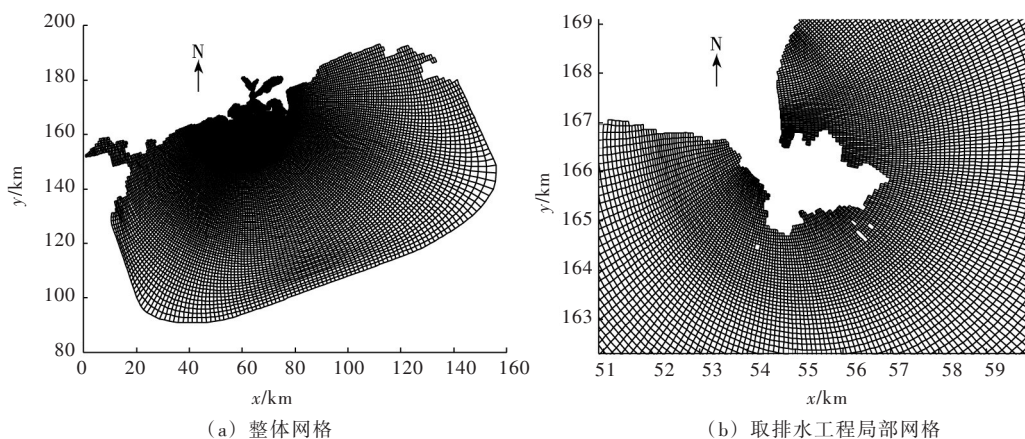


图2 模型计算平面网格

联,排水口附近取值约为 $20 \text{ m}^2/\text{s}$,垂向扩散稀释采用 $k-\varepsilon$ 模型计算。

采用海域实测水文资料对三维数学模型进行流场验证,图3所示计算的水位与实测吻合较好,图4所示为V1点计算流速与实测流速对比,可以看出计算的流速值和流向值与实测结果基本吻合,上述对比结果表明数学模型能正确反映工程水域潮流运动规律。

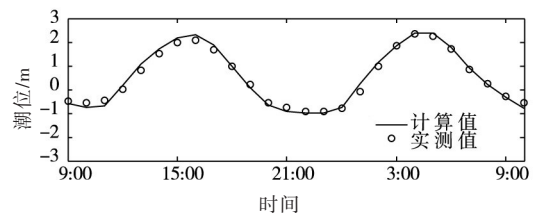


图3 W1点水位验证结果

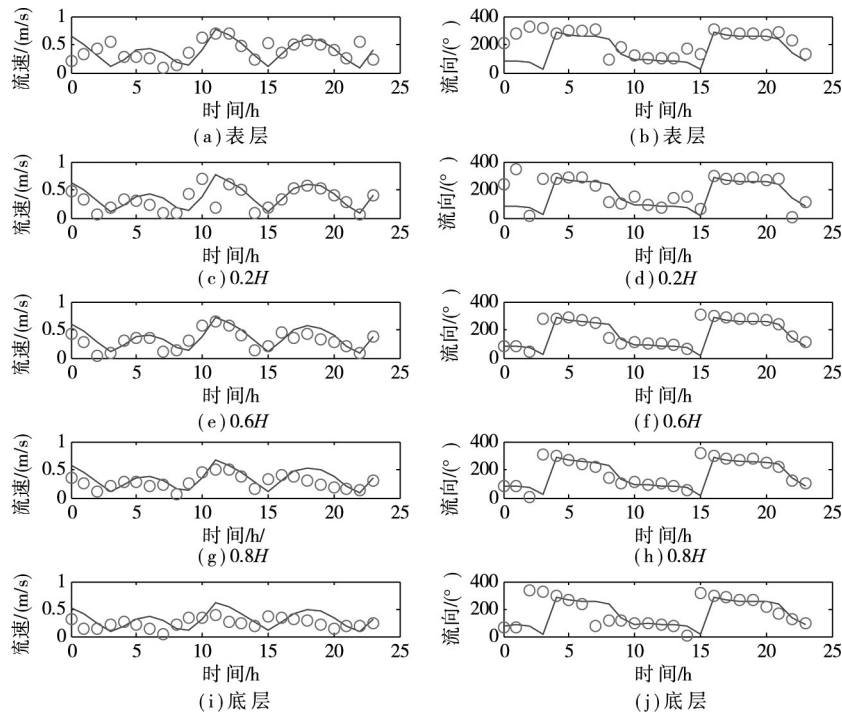


图4 V1点流速验证结果

4 温度计算结果分析

三维数学模型计算结果与同一套网格的二维数学模型以及物理模型试验结果进行了对比。图5中为排水明渠外围涨潮时刻,1[#]、2[#]、3[#]测点水温垂向分布,可以看出三维数学模型计算的表层温升值及温跃层位置与物理模型试验基本吻合,计算和试验得到的表层热水层厚度均在 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$ 之间,上述对比结果表明数学模型得到的排放明渠出流近区水温的垂向分布是合理的。图6(a)所示为三种模拟手段得到的表层温升范围比较,从 4°C 温升范围看,三维数学模型计算的温升线形态与物理模型更为接近,而二维数学模型计算的温升线范围则偏于近岸窄带型,离岸宽度相比另两种模拟手段偏小,这主要是由于无法反映浮力效应所致。从 1°C 温升范围看,三维和二维数学模型计算的温升形态较接近,计算的温升线离岸距离与物理模型结果相当,在东侧取水口附近则物模温升线向偏东方向扩展更多,在温排水实际扩散过程中,由于紊动剧烈,热水可能呈现为不连续热团向外扩散,这在物理模型中能捕捉到,但数学模型无法模拟,可能是造成这种差异的原因。图6(b)所示为二维和三维数模计算的垂向平均温升范围,可以看出三维数模计算的垂向平均 4°C 温升范围小于二维数模, 1°C 温升范围则略与二维数模接近,由于在 1°C 温升区域表底分层已不明显,因此三维与二维结果差别不大是合理的,二维垂向平均 1°C 温升结果相比三维垂向平均仍有略偏右趋势,原因可能是对排水所在湾内的回流求解采用二维和三维略有差异所致。表1中给出了不同模拟方法得到的全潮温升范围比较,可以看出三维数学模型计算的表层 4°C 温升面积及离岸宽度均与物模接近,三维数模计算的 1°C 温升面积介于物理模型试验和二维数学模型之间。在环境影响评价中, 1°C 温升面积一般采用物

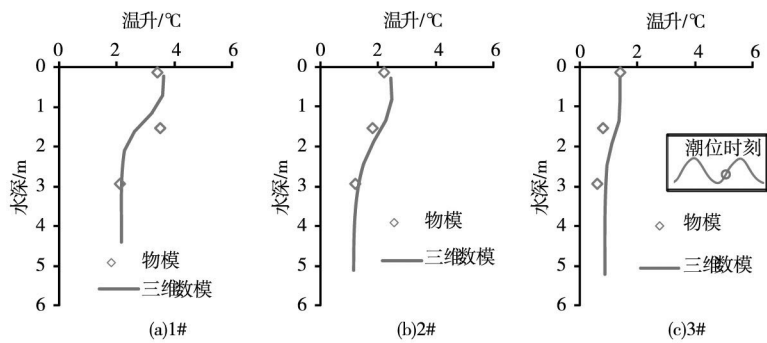


图5 三维数模与物理模型水温垂向分布对比

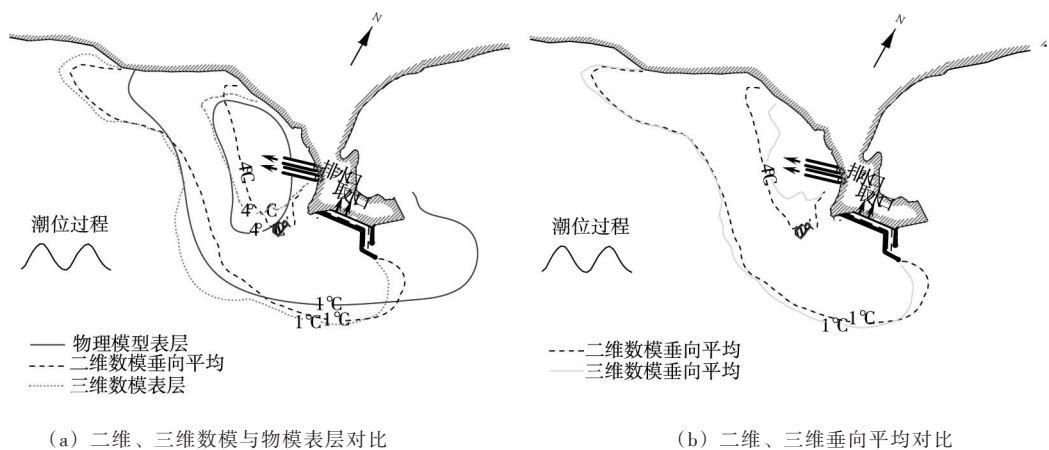


图6 不同模型温升影响范围

表1 不同模拟方法温升范围结果比较

模型类别	4℃温升面积/km ²	1℃温升面积/km ²	4℃温升线离岸宽度/km
物模表层	5.7	31.5	2.23
三维数模表层	5.6	26.7	2.14
二维数模垂向平均	4.6	22.3	1.86
三维数模垂向平均	2.8	23.4	1.63

理模型和二维数学模型中的大者，4℃温升面积则一般采用物理模型试验结果。从本案例厂址的结果看，采用三维数学模型结果可以较好地兼顾近区和远区的模拟效果，后续若有实测运行资料进行模型参数校准，则三维数学模型的优势将十分明显，可在该厂址温排水环境影响评价中发挥更重要的作用。

5 结论

海域三维数学模型可以反映浮力作用，提高温排水扩散模拟精度，是目前温排水预测模型的发展趋势。本文采用Delft3D模型对某滨海核电厂温排水扩散进行了三维数值模拟，并将模拟结果与二维数模及物理模型试验进行了比较，4℃表层温升范围三维数学模型相比二维数学模型，与物理模型更为接近；1℃温升区域表底分层已不明显，三维数学模型与二维数学模型温升计算结果基本一致。对比分析表明针对案例厂址明渠浅水排放类型，物理模型可较好反映近区三维水力热力特性，主要适用于近区模拟，数学模型适用于分层影响不明显的远区温排水转移扩散模拟，采用分层三维数学模型可以较好反映浮力作用下的水温分层，能兼顾近、远区模拟要求，获得较好的水温模拟精度。

参 考 文 献:

- [1] 郝瑞霞, 韩新生. 潮汐水域电厂温排水的水流和热传输准三维数值模拟[J]. 水利学报, 2004(8): 66-70.
- [2] 崔丹, 金峰. 近岸海域温排水的三维数值模拟[J]. 长江科学院学报, 2010, 27(10): 55-59.
- [3] 丁跃平, 郭远明, 李铁军, 等. 三门湾春季温排水增温效应数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(4): 101-107.
- [4] 朱子晨, 胡泽建, 张永强, 等. 湄洲湾温排水海区水温垂向不均匀特征的数值模拟与观测研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 32(2): 230-238.
- [5] MIKE Elliott, ROGER Bamber, STEVE Colclough, et al. Thermal standards for cooling water from new build nuclear power plants [R]. British Energy Estuarine & Marine Studies, Scientific Advisory Report Series 2001 No.008. EDF Energy, 2011.
- [6] 陈小莉, 郭有, 纪平, 等. 电厂温排水模型研究进展[C]//水力学与水信息学进展 2015. 武汉: 武汉理工大学出版社.
- [7] WL Delft Hydraulics. Delft-Flow Simulation of Multi-dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, Including Sediments- User Manual[M]. Version 3.14. The Netherlands: Deltares, 2009.
- [8] SL160-2012, 冷却水工程水力、热力模拟技术规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [9] 郭振仁. 污水排放工程水力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

3D numerical simulation of waste thermal discharge by channel into shallow coastal area from nuclear power plants

CHEN Xiaoli, ZHANG Qiang, ZHAO Yijun, YUAN Jue

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Waste thermal discharge is an important environmental problem the coastal nuclear power plants (NPP) face. Model forecast is a main approach for the discharge impact evaluation. In this paper, a NPP site with shallow channel discharge is chosen as an example. The coastal hydrodynamics and thermal dispersion are simulated by a 3D numerical model. And the result is compared with results of a 2D numerical model and a physical model. The comparison shows that the vertical temperature distribution simulated by the 3D numerical model agrees to the physical model result. The surfacial 4℃ and 1℃ temperature rise range of the 3D numerical model is appropriate compared with the two other models. The comparison study result shows the 3D model has good performance on the vertical thermal stratification under the buoyant force for channel discharge into shallow water, and the model can achieve proper accuracy for both the near and far field. The research shows the 3D model is flexible enough for this kind of discharge type and can be used as the basis of environmental impact evaluation.

Keywords: waste thermal water discharge; 3D numerical model; thermal stratification; advection and dispersion; shallow water discharge

(责任编辑: 李福田)