

# 潮汐河口温排水影响的近区和远区数值模拟

卢士强, 林卫青

(上海市环境科学研究院环境模拟中心, 上海, 200233)

**摘要:** 针对潮汐河口的水流和污染物对流扩散特点, 提出了联合运用远区和近区数学模型进行温排水环境影响数值模拟的方法。平面二维数学模型用于模拟温排水对远区水域及敏感目标的水质影响, 并可以为近区数值模拟提供必要的水力设计要素; 近区模型则模拟小尺度范围内温度场的三维变化。应用结果表明, 联合利用远区和近区模型对潮汐河口的温排水进行数值模拟, 模拟结果精度和准确度的可以满足生态环境影响评价对要求。

**关键词:** 温排水, 潮汐水流, 数值模拟, 近区模型, 远区模型

## 1. 前言

潮汐河口的水流特性对水利工程、废热或污水排放工程的规划设计等都非常重要。利用数学模型模拟河流水流特性以及所含物质浓度(包括热量、盐度等)分布特性是一种实用、有效且较为经济的方法。随着水流数值模拟的逐渐成熟, 利用数学模型模拟工业冷却水排放河流引起热污染问题受到越来越多的重视。

大部分天然河道的水流数学模型都求解深度平均的N-S方程<sup>[1][2]</sup>, 温度场的数值模拟研究也时常见诸报端<sup>[3][4][5][6][7][8]</sup>。近年来天然水域非恒定流流场的三维紊流数值模拟已取得一系列的研究成果<sup>[9][10][11][12]</sup>, 并在温度场的模拟中得到应用<sup>[13][14]</sup>。以上文献是对潮汐水域的流场和温度场的数值模拟, 但未涉及浮射流近区模拟。文献[15]讨论了矩形水槽中受横向来流影响的底孔浮力射流的水力、热力特性, 自由面采用刚盖假定未考虑非恒定流动。针对河口潮汐水域温排水而引起的浮力分层流动的水力、热力特性, 本文提出了结合利用远区和近区模型进行类似水体温排放的水力热力特性研究, 具有工程实际意义。

由于世博会和上海市总体规划的需要, 现位于上海浦东周家渡地区的浦钢必须整体搬迁, 新址位于宝山区罗泾地区的世博会备用地块。钢厂运行时, 冷却循环水将排入长江口, 对附近河段产生热影响, 近而可能会影响附近江段的生态环境, 为此, 有必要建立该江段的数学模型, 进行浦钢温水排放的数值模拟研究, 为排放口的确定和附近江段的温升变化对生态环境的影响评价提供依据。

## 2 温排水数学模型

对浦钢公司温水排放的影响范围进行远区模拟(利用 MIKE21 模型)和近区模拟(利用 Plume 模型)。远区方案用来预测设计水文条件下温排水的影响范围及其对附近敏感水域的影响, 远区数值模拟包括以下过程: 热对流、热扩散、热辐射以及水体与大气的热交换过程; 近区方案则用来预测典型潮流时刻, 温排放形成的温水带的稀释扩散和垂向水温变化, 近区模拟所需的水动力参数(流速、水深等)由远区模拟结果提供。

### 2.1 水动力模型

考虑 Boussinesque 近似和浅水假定, 以及风应力的影响, 则平面二维水动力学方程组为: 连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = S$$

动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{I}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega q - fV V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \\ & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & - \frac{I}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] + \Omega p - fV V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned}$$

式中:  $h$ —水深(m);  $\zeta$ —水位(m);  $p, q$ — $x, y$ 向的单宽流量( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ );  $C = \frac{1}{n} H^{1/6}$ , 为谢才系数, 其中 $n$ 为曼宁系数;  $f$ —风阻力系数;  $V, V_x, V_y$ —风速(m/s);  $\Omega$ —Coriolis 参数;  $p_a$ —大气压( $\text{Kg}/\text{m}/\text{s}^2$ );  $\rho_w$ —水的密度( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );  $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ —剪切应力分量。

可应用 ADI 法求解上述方程组, 采用的差分格式如图所示。

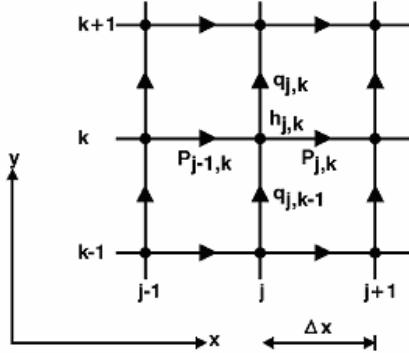


图1  $x, y$  方向的差分网格

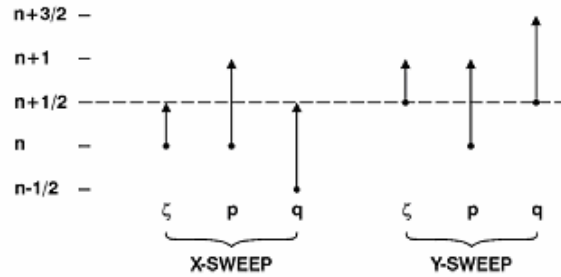


图2 时间中心差分格式

## 2.2 温度场对流扩散模型

水体温度场的基本方程仍为二维对流扩散模型:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{Q}{H \rho_w C_w}$$

式中,  $T$ —水体温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $H$ —水深(m);  $C_w$ —海水的比热容( $\text{J}/\text{Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ );  $Q$ —水体输入(或输出)的热量(卡);  $u, v$ — $x, y$ 方向的流速分量(m/s);  $K_x, K_y$ — $x, y$ 方向的紊动扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

模型中考虑的热交换过程包括: 入流(或出流)输入(输出)热量, 降水带来的热量, 水分蒸发引起的热量损失, 水体与空气之间的热对流, 长波辐射和短波辐射, 地下水体和地表水体的热交换, 河床和水体的热交换等。研究重点考虑的热交换过程及其方程表达式如下:

### (1) 水体与大气的热对流

$$q_c = \begin{cases} \rho_{air} C_{air} C_c W_{10m} (T_{water} - T_{air}), & T_{air} > T_{water} \\ \rho_{air} C_{water} C_c W_{10m} (T_{water} - T_{air}), & T_{air} \leq T_{water} \end{cases}$$

式中,  $\rho_{air}$ —空气密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C_{air}$ —空气比热容,  $1007 \text{ J}/\text{Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $C_w$ —水体比热容,  $4186 \text{ J}/\text{Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $W_{10m}$ —风速(m/s);  $T_w$ —水体温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{air}$ —空气温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $C_c$ —

热传输系数,  $1.41 \times 10^{-3}$ 。

## (2) 蒸发散热

$$q_v = LC_e(a_1 + b_1W_{2m})(Q_{water} - Q_{air})$$

式中,  $L$ —蒸发潜热,  $2.5 \times 10^6 \text{ J/Kg}$ ;  $C_e$ —湿度系数,  $1.32 \times 10^3$ ;  $W_{2m}$ —水面以上 2m 处的风速 (m/s);  $Q_{water}$ —水面附近水蒸汽密度, ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{S})$ );  $Q_{air}$ —大气中的水蒸汽密度, ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{S})$ );  $a_1, b_1$ —经验系数。

## 2.3 模型范围

研究共建立大、中两个模型, 范围见图 3, 各模型之间的关系及用途见表 1。

表 1 各模型的范围、网格划分及用途

模型	范围	网格尺度	网格数	用途
大模型	包含整个长江口、杭州湾在内	500m*500m	510*596	1.进行水动力、水质模型参数的率定; 2.为中模型提供水动力、水质边界和初始条件。
中模型	崇头以下、长兴岛南北港以上的长江段	150m*150m	421*151	1. 进行浦钢冷却水外排的数值模拟; 2. 为近区模拟提供水动力设计参数。

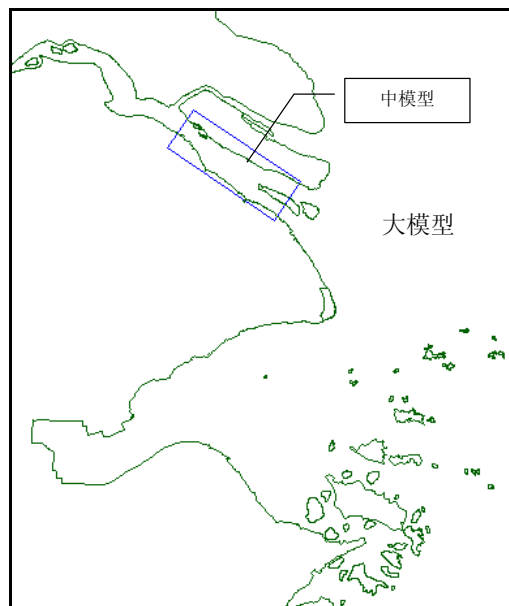


图 3 长江口、杭州湾模型区域图

## 2.4 模型边界条件

水域开边界: 取潮位给定值, 用 11 个分潮的振幅和相位推算。

河流边界: 研究范围内河流包括长江、钱塘江、黄浦江、曹娥江、甬江等, 其中长江采用实测流量, 其它河流取枯季、洪季多年平均流量。

## 2.5 水动力模型率定与验证

分别利用 2002 年 3 月和 9 月, 长江口代表性测点的潮位、流量、流速、流向等实测资料进行水动力模型的率定和验证。水动力验证结果见图 4~图 5。

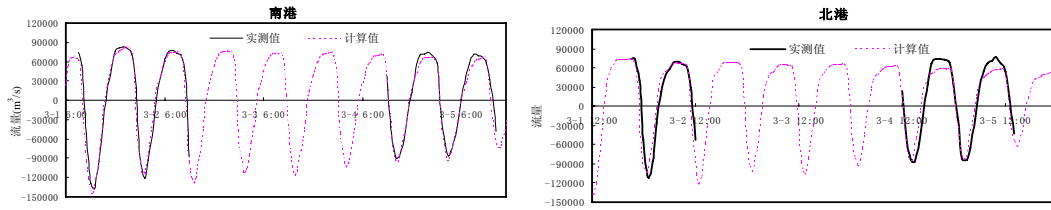


图 4 南港、北港流量验证结果

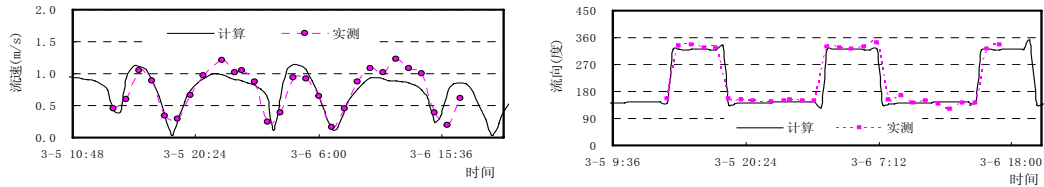


图 5 七丫口流速、流向验证结果

数值计算结果与实测值吻合较好，较好地反映了长江口水域的流场特征，可为该水域浦钢温排放的数值模拟和近区温度场模拟提供准确的水动力条件。

### 3 长江口温排水的影响预测

温排放水量为  $100 \times 10^4 \text{ t/d}$ ，采用放流管直接排水，排引水温差为  $7^\circ\text{C}$ ，近区模拟方案如表 6 所示。

表 2 温排放远区模拟方案

方案编号	水文条件	风向	风速	排污口位置	排放量 ( $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )	排放水温 ( $^\circ\text{C}$ )	环境水温 ( $^\circ\text{C}$ )	大气温度 ( $^\circ\text{C}$ )
方案 1	夏季	南风	4m/s	离岸 500m 排放	100	32	25	28
方案 2	夏季	南风	4m/s	近岸 100m 排放	100	32	25	28
方案 3	冬季	北风	4m/s	离岸 500m 排放	100	15	8	5
方案 4	冬季	北风	4m/s	近岸 100m 排放	100	15	8	5

限于篇幅，文中仅给出最大温升等值线的模拟结果，如图 6 所示，图中单位： $(^\circ\text{C})$ 。

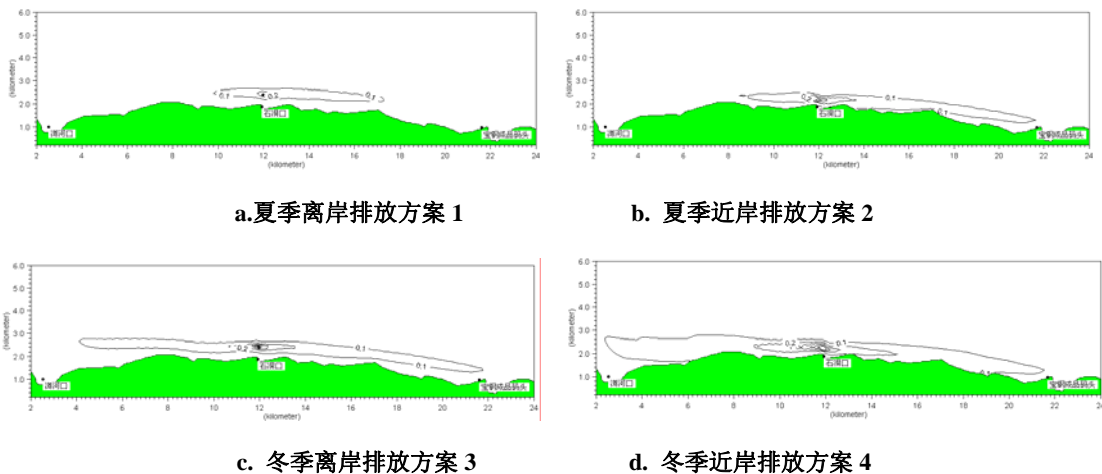


图 6 各模拟方案最大温升等值线图

从上图可看出，温排放对长江水域水温的影响仅限于排口附近的沿岸水域。夏季排放方案不同温升的温水带的长度、宽度和面积的统计结果如表 3。

岸边排放对附近水域水温的影响要大于近岸和离岸排放；冬季方案的温升和温水带面积要稍高于夏季。排口附近平均温升 $\geq 1.0^{\circ}\text{C}$ 的水域面积均小于 $1600\text{m}^2$ 。

表 3 温排水平均温升数值模拟结果统计

模拟方案	夏季离岸模拟方案			夏季近岸模拟方案		
	长度(m)	最大宽度(m)	面积(km <sup>2</sup> )	长度(m)	最大宽度(m)	面积(km <sup>2</sup> )
平均温升 $\geq 0.05^{\circ}\text{C}$	760	80	0.024	1720	120	0.141
平均温升 $\geq 0.1^{\circ}\text{C}$	80	80	0.006	320	80	0.02
平均温升 $\geq 0.2^{\circ}\text{C}$	/	/	/	40	40	0.0016
平均温升 $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$	/	/	/	/	/	/
平均温升 $\geq 1.0^{\circ}\text{C}$	/	/	/	/	/	/

注：表中“/”表示统计长度小于模型网格尺寸 40m或统计面积小于 $1600\text{m}^2$ ，以下同。

#### 4 近区模拟

温排放的近区模拟采用 PLUME 模型。该模型包括 RSB 和 UM 两个计算模型，具有近区和远区稀释度计算功能。UM 模型是一种拉格朗日二维羽流模型，有两个显著的特点：拉格朗日模式和投影面卷吸假定（PAE），拉格朗日模式使得问题简化并易于处理 PAE，同时，模型也采用了传统的 Taylor 卷吸假设。

UM 模型可以模拟污染物任意角度的垂直排放，正浮力的顺流排放，负浮力的逆流排放，温排放，废水中的悬浮粒子以及背景污染的处理。

排放口处的水动力设计条件如图 7 所示。

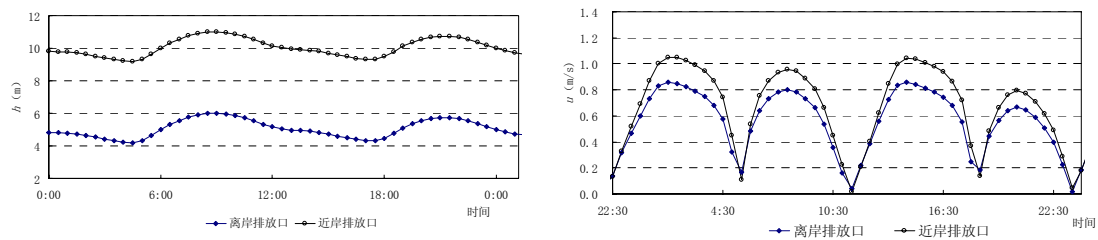


图 7 拟定排放口处的水深和流速过程线（枯季小潮）

近区模拟方案如表 4 所示。

表 4 温排放近区模拟方案

方案编号	水文条件	排污口位置	排放量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /s)	排放水温 (°C)	环境水温 (°C)	模拟典型时刻
方案 1	夏季、小潮	离岸排放	100	32	25	涨憩、落憩、涨急、落急
方案 2	夏季、小潮	近岸排放	100	32	25	涨憩、落憩、涨急、落急
方案 3	冬季、小潮	离岸排放	100	15	8	涨憩、落憩、涨急、落急
方案 4	冬季、小潮	近岸排放	100	15	8	涨憩、落憩、涨急、落急

温水排放后在近区形成羽状温水带，温水带在与周围水体的混合、稀释中不断上升，水温则急剧下降，涨急和落急时刻水温的下降速度要远远高于涨憩和落憩时刻。数值模拟结果表明，涨急和落急时刻温水带到达水面时的温升（与环境水温的差别）约 $1^{\circ}\text{C}$ ，涨憩和落憩时刻温水带到达水面时的温升约为 $1.5\sim 1.8^{\circ}\text{C}$ 。

温排放对近区水域温度的影响程度大小依次是：落憩、涨憩、落急、涨急。统计最不利时刻（落憩）的近区模拟结果进行比较，如表 5 所示。

表 5 温排放近区模拟结果比较

方案编号	水文条件	排污口位置	模拟时刻	温水带到达水面时的温度升高(°C)	到达水面时温水带直径 (m)
方案 1	夏季小潮	离岸 500m 排放	落憩	1.04	14.0
方案 2	冬季小潮	离岸 500m 排放	落憩	1.06	15.1
方案 3	夏季小潮	近岸 100m 排放	落憩	1.67	10.1
方案 4	冬季小潮	近岸 100m 排放	落憩	1.72	10.2

从落憩时刻温水带的温升和面积来看,近岸温排放的影响大于离岸排放,冬季排放的影响要稍大于夏季。这同远区模拟的结论是一致的。

落憩时,离岸排放的温水带上升至水表面时的温升约为 1°C,面积约 600m<sup>2</sup>~700m<sup>2</sup>;近岸排放的温水带上升至水表面时的温升约为 1.7°C,面积约 320m<sup>2</sup>。

研究推荐离岸排放方案。

## 5 结论

(1) 远区数值模拟结果表明,岸边温排放影响要大于近岸和离岸排放;冬季的温升要稍高于夏季。近区数值模拟结果表明,温水排放后在近区形成羽状温水带,温水带在与周围水体的混合、稀释中不断上升直至水表面,水温则快速下降。研究推荐离岸排放方案。

(2) 研究结果表明,将近区和远区模型结合,利用潮汐河口的远区模拟结果为温排水温度场做近区精细模拟提供水动力设计条件,为类似水域温排水的数值模拟提供了一种较为高效、实用的解决途径。

## 参考文献:

- [1]沈永明,胡振红,刘才广。温度和盐度分层流的二维应力—通量代数湍流模型。环境科学学报[J],2004,24(3):389~393。
- [2]徐世凯,童中山,黄骅电厂冷却水取水河段潮流的数值模拟方法,水利水运科学研究[J],1997,2:148~153。
- [3]华祖林,贴体边界下潮汐河口热(核)电厂温排放数值计算,电力环境保护[J],1997,(13):1~5。
- [4]韩康,张存智,张砚峰,宋成庆。三亚电厂温排水数值模拟,海洋环境科学[J],1998,(5):55~57。
- [5]程杭平,韩曾萃,热污染的一、二维耦合模型及其应用,水动力学研究与进展[J],2002,17(6):647~650。
- [6]朱军政,玉环电厂循环冷却水温排放数值模拟。中国环境水力学 2004[P]。北京:中国水利水电出版社。2004:42~49。
- [7]倪培桐,江涓;潮州三百门电厂冷却水排放的数值模拟研究,中国农村水利水电[J],2004年(5):25~27。
- [8]郝瑞霞,齐伟,李海香,林树彪;潮汐水域流速场和温度场的数值模拟研究,太原理工大学学报[J],2005(36):235~245。
- [9] Meselhe E A, Sotiropoulos E, Patel V C. Three Dimensional Numerical Model for Open Channels. Proc., Int. conf. on Hydropower, 1995, ASCE, 2100~2120。
- [10]Sinha S K, Sotiropoulos E, Odgaard A J. Three Dimensional Numerical Model for Flow Through Natural Rivers. J. of Hy. Eng. ASCE[J],1998, 124(1), 13~24。
- [11]郝瑞霞,周力行,陈惠泉。天然河道湍浮力流动的数值模拟 I:用隔离法实现三维复杂边界的处理。水利学报[J],1999,(5):5~12。
- [12]曾平,李玉成,赵文谦。带自由表面三维非恒定紊流场的全场数值模拟。水动力学研究与进展[J]。A 辑,1995(5):501~509。
- [13]郝瑞霞,陈惠泉,周力行。天然河道湍浮力流动的数值模拟 II:数学模型及其在冷却水工程中的应用实例,水利学报[J],1999,(6):31~39。
- [14]郝瑞霞,韩新生。潮汐水域电厂温排水的水流和热传输三维数值模拟,水利学报[J],2004(8):1~5。
- [15] Huai Wenxin. Three dimensional numerical simulation of multiple jets in shallow flowing receiving waters. Journal of Hydrodynamics[J], 2000, 12(3): 19~28。

# **Near Field and Far Field Numerical Simulation for Cooling Water**

## **Discharge into Tidal Estuary**

Lu shiqiang, Lin WeiQing

(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Environmental Modeling Centre, Shanghai,  
200233)

**Abstract:** A numerical simulation method was present to simulate the effect of cooling water discharging into estuary, based on its characteristic of flow and pollutant convection and dispersion. 2-D model was used to simulate the effect of cooling water on the sensitive environmental objective in the far filed, and also can provide necessary hydraulic parameters for the near field modeling. Then the 3-D temperature variation in the small field near the outlet is simulated using near filed model (Plume). The application result showed that combination of far field and near field models is an available and efficient method to simulate the cooling water effect in the estuary area, and the precision of its simulation results can satisfy the requirement for environmental impact assessment.

Key Word: Cooling water, Tidal flow, Numerical simulation, Near field model, Far field model