

文章编号:1000-5641(2017)02-0126-12

# 长江河口电厂温排水输运扩散数值模拟

吴宇帆, 朱建荣

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 本文建立长江河口温排水三维数值模式, 模拟华能石洞口第一电厂二期改进工程和综合考虑整个长江河口电厂夏季温排水输运扩散, 分析温排水对敏感目标的影响。受长江径流和混合作用, 温排水沿南支南岸向下游输运扩散。在仅考虑本工程情况下, 在排水口附近温升出现了超过 2.0 °C 的区域, 但在取水口温排水的影响微小, 温升仅为 0.04 °C 左右。全潮平均表层温升 3.0、2.0、1.0 °C 的面积分别为 0.12、0.6、1.42 km<sup>2</sup>。潮周期和全潮平均温升 1 °C 包络线未进入陈行水库水源地保护区。在综合考虑整个长江河口电厂情况下, 温升超过 1 °C 的影响范围大, 主要分布在太仓发电厂至外高桥发电厂下游沿南支南岸约 50 km 的水域内。华能发电厂附近和下游水域温升显著, 出现了温升超过 4 °C 的较大范围。全潮平均表层温升 3.0、2.0、1.0 °C 的面积分别为 2.34、4.16、13.52 km<sup>2</sup>。沿本工程取水口和排水口断面, 温升沿岸大、离岸小, 在近岸出现垂向分层。温升 1 °C 等温线侵入了陈行水库水源地保护区。在陈行水库水源地二级保护区内大潮、中潮、小潮和全潮平均温升 1 °C 的面积分别为 1.9、1.82、1.75 和 1.83 km<sup>2</sup>。长江河口电厂夏季排放温排水对青草沙水库和东风西沙水库水源地保护区, 以及九段沙湿地自然保护区和崇明东滩鸟类自然保护区均没有影响。

**关键词:** 长江河口; 温排水; 数值模拟; 输运扩散

**中图分类号:** P333 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-5641.2017.02.016

## Numerical simulation of transport and diffusion of thermal discharge water from the power plants in the Changjiang estuary

WU Yu-fan, ZHU Jian-rong

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The three dimensional numerical model of thermal discharge water in the Changjiang estuary was established to simulate the transport and diffusion of thermal discharge water from the Huaneng Shidongkou first power plant under second-phase rebuild project and the whole power plants in the estuary in summertime, and analyze their impacts on the sensitive targets. The thermal discharge water transports and diffusions downstream along the south coast of the South Branch affected by the runoff and mixing. In the case of only considered the project, there

收稿日期:2016-02-22

基金项目:上海市科学技术委员会重点项目(1423100402)

第一作者:吴宇帆,男,硕士研究生,从事河口海岸动力学研究。E-mail:504277150@qq.com.

通信作者:朱建荣,男,教授,博士生导师,从事河口海洋学研究。E-mail:jrzhu@sklec.ecnu.edu.cn.

appeared area of temperature rise of greater than  $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  near the drain outlet, while the impact is weak and the temperature rise is only  $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$  in the water intake. The area of whole tide-averaged surface temperature rise of  $3.0$ ,  $2.0$  and  $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  is  $0.12$ ,  $0.60$  and  $1.42\text{ km}^2$ , respectively. The tidal and week averaged temperature rise envelope of  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  does not enter the water source protection area of Chenhang reservoir. In the case of considered the whole power plants in the estuary, the area of temperature rise of greater than  $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  is wider, mainly distributes along the south coast of the South Branch in  $50\text{ km}$  range from Taicang power plants to the downstream coast of Waigaoqiao power plants. The temperature rise is significant and appears wider area of greater than  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  near the Huaneng power plants and downstream water. The areas of whole tide-averaged temperature rise of  $3.0$ ,  $2.0$ ,  $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  reach  $2.34$ ,  $4.16$ ,  $13.52\text{ km}^2$ , respectively. The temperature rise is higher and stratification near the coast, and decreases off the coast along the sections cross the water intake and drain outlet of the project. The isotherm of temperature rise of  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  invades the water source protection area of Chenhang reservoir. The area of temperature rise of  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  averaged during spring, middle, neap and week reaches  $1.9$ ,  $1.82$ ,  $1.75$  and  $1.83\text{ km}^2$  in the secondary water source reserve of Chenhang reservoir. There is no impact of thermal discharge water from the whole power plants in the Chnagjiang Estuary on the water source protection area of Qingcaosha and Dongfeng xisha reservoir, Jiuduansha wetland nature reserve and Chongming Estern shoal birds nature reserve.

**Key words:** Changjiang estuary; thermal discharge water; numerical simulation; transport and diffusion

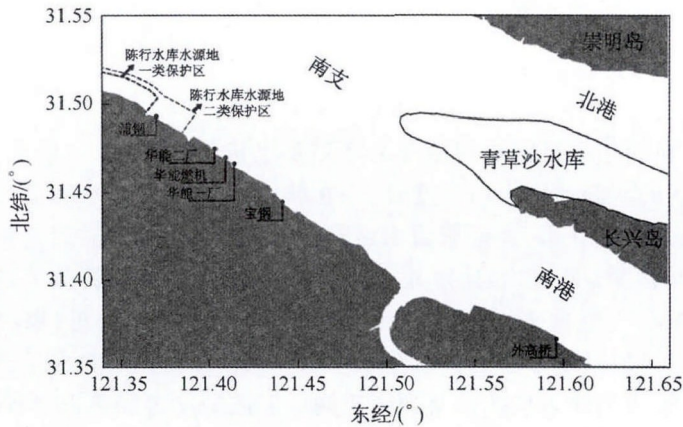
## 0 引 言

火电和核电厂机组的运行需要用冷却水降温发电机组。冷却水一般取自附近河流和海洋,通过发电机组后的水温比取水口温度升高,在排水口进入附近水域后形成温排水。排水口温排水温升一般为  $7\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,会对附近水域产生热污染,尤其是对附近的敏感水域,如水库取水口、湿地保护区等。另外,温排水也会降低发电厂机组自身的效率,冷却水温度每高  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  机组效率下降  $1\%$ <sup>[1]</sup>。通常来说,电厂的取水口与排水口相距较近,取、排水口的位置布设不当,会造成排水口的温排水输运扩散至取水口,导致取水口处的水温升高,降低机组的运行效率。另外,温排水的输运扩散涉及到物质输运扩散的动力和热力过程,与水流、混合和大气热交换等密切相关。因此,研究温排水的输运扩散具有科学意义和应用价值。

温排水输运扩散的研究主要采用现场观测和数值模拟两种方法。前者可通过第一手资料直接获知温排水的输运扩散情况,同时为数值模式的验证提供资料;后者能定量分析和预测电厂温排水输运扩散过程和机制,不仅高效而且经济。国外学者从 20 世纪 40 年代就开始调查研究了电厂温排水的输运扩散。1968 年 Harleman 等人针对 T. V. A. Browns Ferry 核电厂研究了稳定流态及非稳定流态下温排水的输运扩散规律<sup>[2]</sup>。McGuirk 和 Rodi 应用深度平均形式的  $k-\epsilon$  紊流数值模式计算了岸边排放近区温排水的温度分布情况<sup>[3]</sup>。随着计算机和数值方法的发展,一些学者通过数值模式计算了温排水的输运扩散,并深入研究了温排水对环境的影响<sup>[4-7]</sup>。20 世纪 80 年代起,我国学者开始研究温排水,通过现场观测和不同的数值模式对多个电厂的温排水作了数值模拟和分析,其中应用的数值模式大多使用垂向二维平均模式<sup>[8-13]</sup>,也有部分使用三维模式<sup>[14-16]</sup>。由于二维模式无法体现温排水排放时高温水浮

于表层进而抑制垂向热交换、产生垂向温差的特点,因此,使用三维温度输运扩散方程能从物理过程上更真实地模拟和预测温排水的输运扩散.许晟轶等<sup>[1]</sup>数值模拟和分析了华能石洞口第二电厂改建工程温排水的输运扩散,但没有考虑整个长江河口所有电厂的温排水输运扩散及其对敏感目标的影响.

为提高发电效率和减少污染物向大气的排放,华能上海石洞口第一电厂的高效机组通过改建工程将现有发电机组(一期)改建为更高效的超临界燃煤发电机组(二期).规划二期装机容量为 $2 \times 660$  MW,取排水流量为 $2 \times 20.5$  m<sup>3</sup>/s,凝汽器循环水温升为9℃.本文模拟和分析华能上海石洞口第一电厂二期高效机组改建工程(下称本工程)温排水的输运扩散,及其对取水口和附近陈行水库水源地保护区等的影响.事实上,影响敏感目标的是整个长江河口电厂的温排水,因此,本文还综合考虑长江河口各个电厂温排水的输运扩散,及其对敏感目标的影响.长江河口石洞口附近电厂包括华能上海石洞口第一电厂、华能上海石洞口第二电厂、华能石洞口燃机电厂、宝钢电厂和浦钢CCPP电厂,这些电厂和陈行水库水源地保护区位置见图1.除了上述石洞口附近电厂外,整个长江河口电厂还有国华太仓发电有限公司、华润电力常熟公司、太仓港协鑫发电有限公司、常熟发电有限公司、申能崇明燃气电厂、黎明资源再利用中心、外高桥电厂发电有限公司电厂、太仓华能电厂和长兴岛第二电厂,位置见图2.夏季水温高,电厂温排水对附近水域的影响大,因此,重点模拟和分析夏季温排水的输运扩散.长江河口夏季各电厂的装机容量和取排水工程参数见表1.



注:黑点为电厂排水口位置,华能电厂上游为陈行水库水源地保护区

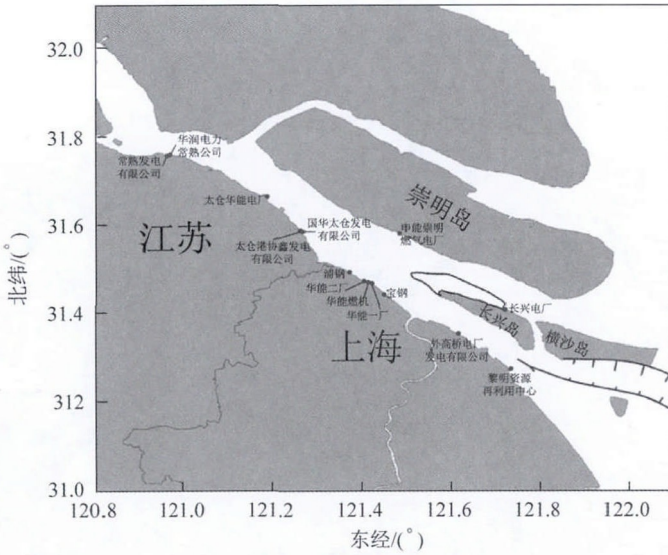
图1 长江河口石洞口附近电厂位置

Fig. 1 Positions of the power plants near Shidongkou in the Changjiang estuary

## 1 数值模式

### 1.1 模式范围、网格和时间步长

本文应用的三维温排水模式是在 ECOM 模式基础上改进和发展的数值模式<sup>[1]</sup>.模式采用水平曲线非正交网格,范围包括整个长江河口、杭州湾及邻近海区,上游边界设在长江枯季潮区界大通站位,外海开边界东至 $124.5^\circ\text{E}$ 附近,北至 $33^\circ\text{N}$ 附近,南至 $28^\circ\text{N}$ 附近,模式网格如图3所示.考虑到整个长江河口的电厂(从徐六泾到长江口口门)分布范围较大,本次研究区域较小,而计算取、排水口和附近桥墩对水动力及温排水输运扩散的影响需要更高分



注:黑点为排水口位置

图 2 长江河口电厂位置

Fig. 2 Positions of the power plants in the whole Changjiang estuary

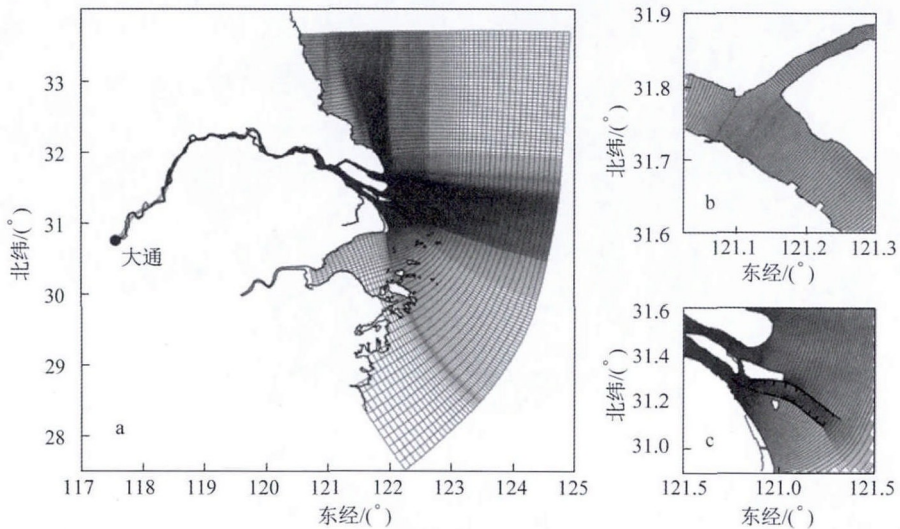
表 1 长江河口电厂夏季装机容量及取排水工程参数

Tab. 1 Parameters of installed capacities, water intake and drainage of the power plants in the Changjiang estuary in summer

名称	装机容量/MW	取排水流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	凝汽器循环水温升/℃
国华太仓发电有限公司	2×600	44	9
太仓港协鑫发电有限公司一期	2×125	11	9
太仓港协鑫发电有限公司二期	2×300	22	9
太仓港协鑫发电有限公司三期	2×300	24	9
太仓华能电厂一期	2×300	22.64	9
太仓华能电厂二期	2×600	40.8	9
常熟发电有限公司一期	4×300	50	9
华润电力常熟公司(常熟二期)	3×600	63	9
常熟发电有限公司三期	2×1000	64	9
华能上海石洞口第一电厂	2×660	41	9
华能上海石洞口第二电厂(一期及二期)	2×600+2×600	42+41.32	9
华能石洞口燃机电厂	3×390	21.57	7
浦钢 CCPP 电厂	160	12	8
宝钢电厂	2×600+350	35+12	8
上海外高桥发电有限公司第一发电厂	2×600	42	9.0
上海外高桥发电有限公司第二发电厂	2×900	48	9.0
上海外高桥发电有限公司第三发电厂	2×1000	50	9.0
长江口黎明资源再利用中心	2×20	2.3	10.0
申能崇明燃气电厂	2×400	14.1	8.0
长兴岛第二发电厂	2×12	1.5	9

辨率的网格,因此,在本工程附近区域做充分的加密(见图 4). 通过对本工程处及上下游电厂处的局部加密,最高分辨率可达到 10 m,网格的正交性、平滑性和岸线拟合均得到了很好

的体现. 根据栈桥和码头桥墩的实际位置, 设置该处网格为固壁, 即法向速度和物理通量为零.



注: b 和 c 分别为崇头和口门区域局部放大图

图 3 模式计算区域和网格

Fig. 3 Model domain and grids (a), enlarged grids in the area of Chongtou (b) and in the area of the river mouth (c)

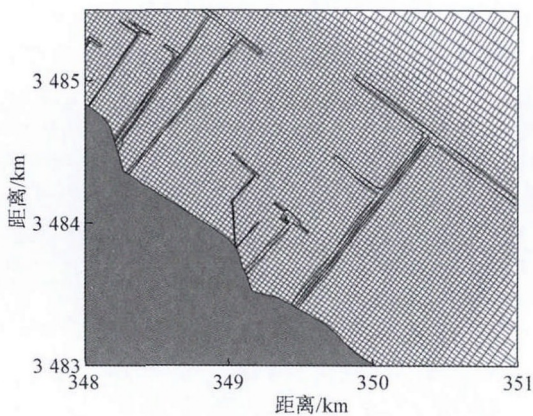


图 4 石洞口区域加密网格及码头、栈桥分布

Fig. 4 Refined grids and positions of dock and trestle bridge near Shidongkou area

模式垂向方向均匀分为 10 个  $\sigma$  层, 保证垂向上也具有较高分辨率. 长江河口水深取为 2012 年实测水深资料. 模式的水位方程求解均采用隐式格式, 计算时间步长取为 5s. 模式计算的时段为夏季 8 月, 潮位、气象和水温等资料均取自 8 月的实测资料.

## 1.2 模式边界和初始条件

模式上游大通河流开边界由水通量给出, 取 8 月份气候态的平均径流量  $43\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ . 模式外海开边界由 16 个分潮 ( $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, U_2, V_2, T_2, L_2, 2N_2, J_1, M_1, OO_1$ ) 调和常数合成给出, 资料源自 NaoTide 数据库. 在侧向岸边界, 在电厂排水口采用表 1



的流量和温排水温升,取水口水温为模式计算的水温,在其他地方方向速度为零、无热通量。在江表面,考虑由太阳辐射、有效回辐射、感热和潜热组成的净热通量,它们由参数化表达式计算。江表面考虑风应力的作用。气温、气压、比湿、风速、风向等气象参数,取自崇明东滩气象站多年8月平均观测数据。对初始条件,因水动力过程反应的时间短,初始水位和流速取为零。初始温度场由长江河口南支8月实测水温给出,月平均值为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.3 模式的验证

本文应用的数值模式在之前的研究中已经进行了大量的验证,计算结果与实测数据吻合较好,模式验证可参考文献[1,17]。本文利用2014年11月23至12月2日水位、流速、流向和水温的实测资料,对建立的三维温排水数值模式进行了验证,结果表明模式能较好模拟观测期间水位、流速、流向、和水温随时间变化,计算结果与实测数据吻合良好。限于篇幅,本文不再给出模式的详细验证结果。

## 2 模拟结果和分析

### 2.1 华能石洞口第一电厂二期工程夏季温排水输运扩散

本节仅考虑华能石洞口第一电厂二期工程夏季温排水输运扩散,本工程以夏季 $41.0\text{ m}^3/\text{s}$ 流量和温升 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温排水排放。

#### 2.1.1 温升平面分布

模式输出了大中小潮涨急、落急、涨憩、落憩,潮周期平均及全潮平均(大中小潮平均)的表层、中层和底层温升分布。限于篇幅,本文仅给出石洞口附近水域全潮平均表层温升,如图5所示。受长江径流平流、科氏力和水体混合作用,温排水沿南支南岸向下游输运扩散。随着输运距离的增加,温排水温升值逐渐减小。在吴淞口附近,温升略大于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在宝钢电厂沿岸温升超过了 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温升超过 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等值线未进入陈行水库水源地二类保护区。在本工程排水口附近,温升出现了超过 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域,但在本工程取水口因离岸达 $620\text{ m}$ ,受温排水的影响微小,温升仅为 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,电厂码头前沿已不受温排水的影响。

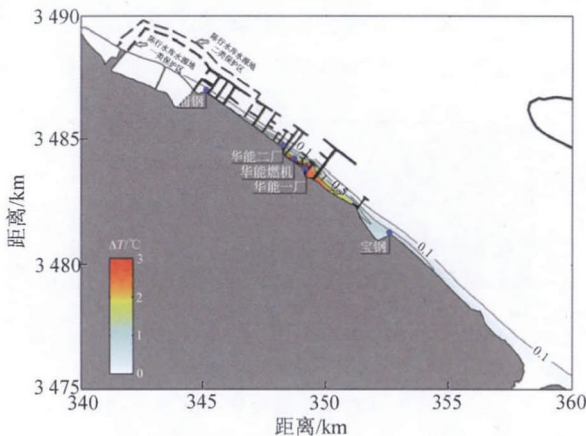


图5 仅考虑本工程南支部分水域全潮平均表层温升

Fig. 5 Distribution of whole tide-averaged surface temperature rise in part of the South Branch only considered the project

对模式计算结果进行统计,得到了全潮平均温升 $3.0$ 、 $2.0$ 、 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的面积,表层分别为

0.12、0.6、1.42 km<sup>2</sup>, 中层分别为 0.12、0.58、1.40 km<sup>2</sup>, 底层分别为 0.11、0.57、1.38 km<sup>2</sup>. 3.0、2.0、1.0 °C 的温升扩展最远距离(排水口上、下游最远扩展距离之和)表层分别为 1.143、2.96、5.99 km, 中层分别为 1.143、2.96、5.99 km, 底层分别为 1.143、2.94、5.99 km. 陈行水库一、二级保护区内温升 3 °C、2 °C 及 1 °C 包络线的最大面积、平均面积及持续时间, 大潮、中潮、小潮和全潮平均均为 0. 由于本工程温排水的排放量较小, 而洪季8月径流量巨大, 故在潮周期平均情况下温排水难于逆水而上影响上游陈行水库水源地保护区.

2.1.2 温升垂向剖面

为分析温排水的垂向分布, 在本工程的排水口和取水口设置了 2 条从岸边至码头内侧的横向断面, 如图 6 所示. 本工程原取水口位于离岸距离约 620 m 处(见图 7), 取水头离河底约 4.5 m, 离江面约 5.5 m, 大致处于水体中层. 在取水口断面(见图 7), 全潮平均温升垂向剖面分布表现为近岸温升高, 在岸线与水深 3 m 水域之间温升出现垂向变化, 随着离岸距离增加温升显著减小. 本工程温排水岸边排放, 涨潮流和落潮流沿岸流动, 携带温排水沿岸作往复运动, 全潮平均后体现为沿岸温排水温升高, 离岸迅速降低. 在本工程取水口, 中层水温升小于 0.2 °C, 表明本工程温排水对取水口影响不大. 整体上, 全潮平均温升沿岸大、离岸小, 表层温升比底层大, 且在近岸存在垂向差异, 且最大温升出现在岸边.

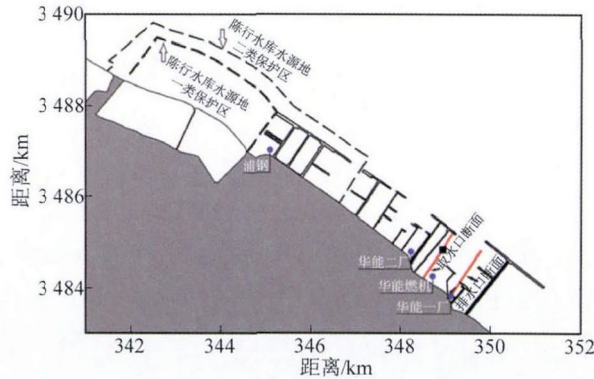
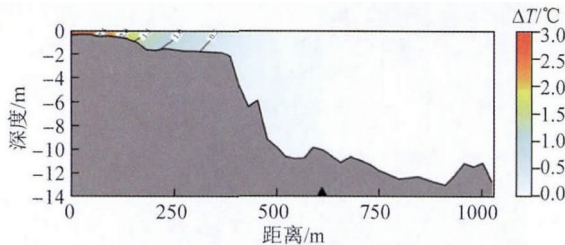


图 6 本工程取排水口断面位置

Fig. 6 Section locations cross the water intake and drain outlet of the project



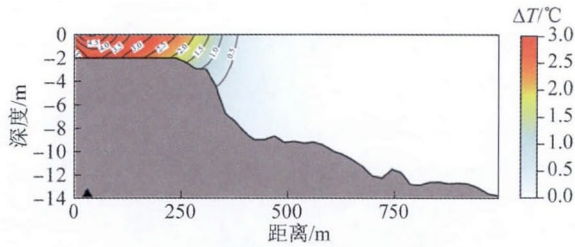
注: 三角形处为取水口位置

图 7 沿本工程取水口断面全潮平均温升垂向剖面分布

Fig. 7 Vertical profile distribution of whole tide-averaged temperature rise along the intake section of the project

在排水口断面(见图 8), 因本工程温排水沿岸表层排放, 全潮平均温升垂向剖面表现为近岸温升高, 排水口附近表层温升超过 4.5 °C, 随着离岸距离增加温升显著减小, 在岸线与

水深 3 m 水域之间温升出现明显垂向变化. 整体上,温升分布特征与取水口断面一致.



注:三角形处为排水口位置

图 8 沿本工程排水口断面全潮平均温升垂向剖面分布

Fig. 8 Vertical profile distribution of whole tide-averaged temperature rise along the drainage section of the project

## 2.2 综合考虑整个长江河口电厂夏季温排水输运扩散

华能上海石洞口第一电厂高效机组改建工程二期在夏季以  $41.0 \text{ m}^3/\text{s}$  流量和温升  $9^\circ\text{C}$  的温排水排放,两者相乘量值为  $369.0 \text{ }^\circ\text{Cm}^3/\text{s}$ ,而整个长江河口电厂的流量和温升两者相乘总量值为  $5864.13 \text{ }^\circ\text{Cm}^3/\text{s}$ ,热能排放为本工程的 15.89 倍.本节分析综合考虑本工程和整个长江河口电厂在夏季温排水输运扩散,其中各电厂的取排水量和温升见表 1,其他计算边界和初始条件与 2.1 节相同.

### 2.2.1 温升平面分布

长江河口南支全潮平均表层温升如图 9 所示,为了清楚表示长江河口温排水对敏感目标的影响,温升平面分布图中标注了陈行水库、青草沙水库和东风西沙水库水源地保护区(绿色虚线)、九段沙湿地自然保护区和崇明东滩鸟类自然保护区(绿色虚线).在综合考虑长江河口电厂温排水排放情况下,温升超过  $1^\circ\text{C}$  的影响范围大,主要分布在太仓协鑫发电厂至外高桥发电厂下游沿南支南岸约 50 km 的水域内.另外,在常熟发电厂附近水域也出现较明显的温排水分布.在陈行水库水源地保护区,上游有太仓和常熟电厂,下游有石洞口附近众多电厂,尤其是浦钢电厂就位于水源地保护区内,受上下游电厂温排水的共同作用,温升  $1^\circ\text{C}$  等值线贯穿整个陈行水库水源地保护区.由于青草沙水库和东风西沙水库水源地保护区、九段沙湿地自然保护区和崇明东滩鸟类自然保护区远离南支南岸,温排水不能穿越主河槽输运,故温排水对这些敏感目标均没有影响.

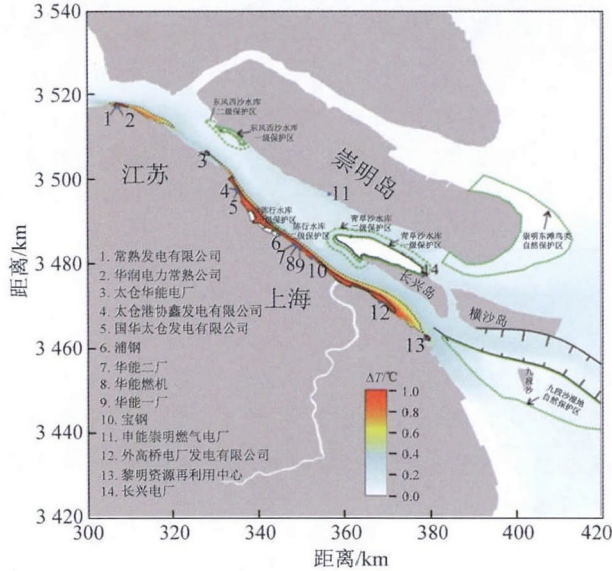
在石洞口附近水域全潮平均表层温升如图 10 所示,受上下游电厂温排水共同影响和华能第一、第二和燃机发电厂较大的温排水流量,华能发电厂附近和下游水域温升显著,出现了温升超过  $4^\circ\text{C}$  的较大范围.浦钢发电厂就在陈行水库二级保护区内,加上上游和下游沿岸的温排水输运,导致陈行水库水源地一类和二类保护区内温升超过  $1.0^\circ\text{C}$ .

对模式计算结果进行统计,得到了温排水大潮、中潮、小潮和全潮平均温升  $3.0$ 、 $2.0$ 、 $1.0$ 、 $0.5^\circ\text{C}$  的表层、中层和底层的面积(见表 2),其中全潮平均温升不同温度表层的面积分别为  $2.34$ 、 $4.16$ 、 $13.52$ 、 $37.60 \text{ km}^2$ ,中层的面积分别为  $2.19$ 、 $4.12$ 、 $12.43$ 、 $39.09 \text{ km}^2$ ,底层的面积分别为  $2.04$ 、 $3.93$ 、 $11.67$ 、 $39.28 \text{ km}^2$ .

表 3 为陈行水库一、二级保护区内温升  $3.0$ 、 $2.0$ 、 $1.0^\circ\text{C}$  包围线的最大和大潮、中潮、小潮、全潮平均温升面积及温升持续时间,由于二级保护区包含了一级保护区,故二级保护区



的最大和平均温升面积都比一级保护区大. 对于各个潮型而言, 温升面积的差别并不明显. 值得注意的是在综合考虑长江河口各个电厂温排水排放情况下, 陈行水库二级保护区始终受到温排水的影响, 大潮、中潮、小潮和全潮平均温升  $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的面积分别达到了  $0.01, 0.01, 0.01, 0.01\text{ km}^2$ , 持续时间分别为  $12, >12, >12, >12\text{ h}$ ; 温升  $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的面积分别达到了  $0.18, 0.18, 0.16, 0.18\text{ km}^2$ , 持续时间分别为  $12, >12, >12, >12\text{ h}$ ; 温升  $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的面积分



注:绿色虚线内为陈行水库、青草沙水库和东风西沙水库水源保护区,九段沙湿地自然保护区和崇明东滩鸟类自然保护区

图 9 综合考虑整个长江河口电厂的长江河口全潮平均表层温升

Fig. 9 Distributions of whole tide-averaged surface temperature rise considered the whole power plants in the Changjiang estuary

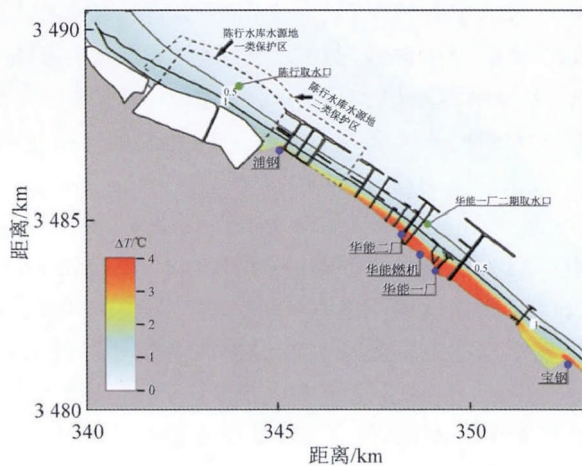


图 10 综合考虑整个长江河口电厂石洞口附近水域全潮平均表层温升

Fig. 10 Distributions of whole tide-averaged surface temperature rise near Shidongkou area considered the whole power plants in the Changjiang Estuary

别达到了 1.90、1.82、1.75、1.83 km<sup>2</sup>,占二类水源地保护区面积的百分比分别为 31.7%、30.3%、29.2%和 30.5%,持续时间均大于 12 h.

表 2 综合考虑长江河口各个电厂温排水情况下平均温升面积  
Tab.2 Area of averaged temperature rise considered the whole

		power plants in the Changjiang estuary				km <sup>2</sup>
		温升 3 °C 的面积	温升 2 °C 的面积	温升 1 °C 的面积	温升 0.5 °C 的面积	
大潮	表层	2.43	4.28	12.90	38.39	
	中层	2.19	4.18	12.61	39.21	
	底层	2.04	3.95	11.66	38.50	
中潮	表层	2.36	4.19	12.22	37.90	
	中层	2.18	4.13	12.07	38.87	
	底层	2.02	3.89	11.36	38.22	
小潮	表层	2.31	4.00	15.23	36.18	
	中层	2.21	4.11	14.33	38.72	
	底层	2.09	3.98	13.38	41.05	
全潮平均	表层	2.34	4.16	13.52	37.60	
	中层	2.19	4.12	12.43	39.09	
	底层	2.04	3.93	11.67	39.28	

表 3 综合考虑整个长江河口电厂情况下陈行水库一、二级保护区内各温升包络线的最大和平均温升面积及温升持续时间

Tab.3 Area of the maximum and averaged temperature rise in the temperature rise envelope, duration of temperature rise in first and secondary water resource reserve of Chenhang reservoir considered the whole power plants in the Changjiang estuary

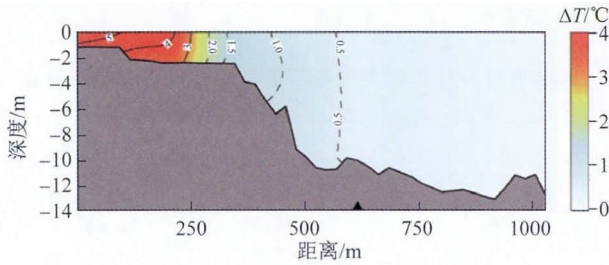
保护区	潮位	最大温升面积/km <sup>2</sup>			平均温升面积/km <sup>2</sup>			持续时间/h		
		温升 3 °C	温升 2 °C	温升 1 °C	温升 3 °C	温升 2 °C	温升 1 °C	温升 3 °C	温升 2 °C	温升 1 °C
一级保护区	大潮	0.26	0.74	1.29	0	0	1.01	3	5.5	>12
	中潮	0.25	0.73	1.22	0	0	0.98	3	6	>12
	小潮	0	0.21	1.36	0	0	0.97	0	3	10.5
	全潮	0.17	0.56	1.29	0	0	1.00	2	4.83	11.83
二级保护区	大潮	0.48	1.32	2.20	0.01	0.18	1.90	12	12	>12
	中潮	0.48	1.29	2.14	0.01	0.18	1.82	>12	>12	>12
	小潮	0.26	0.56	1.90	0.01	0.16	1.75	>12	>12	>12
	全潮	0.41	1.06	2.08	0.01	0.18	1.83	>12	>12	>12

2.2.2 温升垂向剖面分布

沿本工程取水口垂向剖面(见图 11),全潮平均温升分布特征与二期本工程温排水分布相似,只是因为综合考虑长江河口各电厂温排水的排放,沿岸温升和离岸扩散范围增加,在近岸表层温升超过了 5.0 °C,在离岸 200 m 范围内温升超过 4.0 °C.水温高,密度低,易于垂向静力稳定,故在近岸高温升区出现显著的垂向温度分层.在本工程取水口处温升略小于 0.5 °C,说明在综合考虑整个长江河口电厂温排水情况下,本工程取水口已受到上下游电厂温排水的影响.

沿本工程排水口垂向剖面(见图 12),全潮平均温升分布特征同样与二期温排水分布相似,最大温升出现在岸边,沿岸温升和离岸扩散范围增加,近岸表层最大温升约为 7.5 °C,在离岸 260 m 范围内温升超过了 1.5 °C,在离岸 510 m 范围内温升超过了 0.5 °C.在排水口附

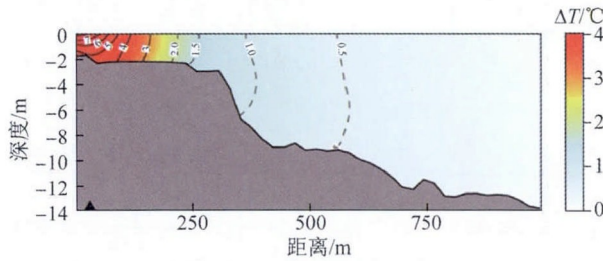
近温升十分显著,垂向分层明显.



注:黑色三角形处为本工程取水口位置

图 11 沿本工程取水口断面全潮平均温升垂向剖面分布

Fig. 11 Vertical profile distribution of whole tide-averaged temperature rise along the intake section of the project



注:黑色三角形处为本工程排水口位置

图 12 沿本工程排水口断面全潮平均温升垂向剖面分布

Fig. 12 Vertical profile distribution of whole tide-averaged temperature rise along the drainage section of the project

### 3 结 论

本文考虑径流量、潮汐、风应力、地形、混合等动力因子以及江面与大气的热量交换,建立了长江河口温排水输运扩散的三维数值模式.模拟和分析华能石洞口第一电厂二期改进工程和综合考虑整个长江河口电厂夏季温排水输运扩散,得到了大中小潮涨急、落急、涨憩、落憩时刻,潮周期平均及全潮平均的表层、中层和底层温升分布.统计了大潮、中潮、小潮和全潮平均温升 3.0、2.0、1.0、0.5 °C 的表层、中层和底层面积.给出了本工程取水口和排水口断面温升的剖面分布.分析了温排水对敏感目标的影响.得出以下主要结论.

#### (1) 华能石洞口第一电厂二期工程夏季温排水输运扩散

受长江径流平流、科氏力和侧向混合作用,本工程温排水沿南支南岸向下游输运扩散.在本工程排水口附近,温升出现了超过 2.0 °C 的区域,但在本工程取水口因离岸较远受温排水的影响微小,温升仅为 0.04 °C 左右,电厂码头前沿已不受温排水影响.全潮平均温升 3.0、2.0、1.0 °C 的面积表层分别为 0.12、0.60、1.42 km<sup>2</sup>,扩展最远距离分别为 1.143、2.96、5.99 km.本工程沿岸表层排放,在取水口和排水口断面全潮平均温升沿岸大、离岸小,表层温升比底层大,且在近岸出现垂向分层,最大温升出现在岸边,在排水口附近表层温升超过 4.5 °C.

#### (2) 综合考虑整个长江河口电厂夏季温排水输运扩散

受长江河口上下游电厂温排水共同作用,温升超过 1 °C 的影响范围大,分布在太仓发电厂至外高桥发电厂下游沿南支南岸约 50 km 的水域内.由于华能第一、第二和燃机发电厂

较大的温排水流量,华能发电厂附近和下游水域温升显著,出现了温升超过 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的较大范围。全潮平均表层温升 $3.0$ 、 $2.0$ 、 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的面积分别为 $2.34$ 、 $4.16$ 、 $13.52\text{ km}^2$ 。沿本工程取水口和排水口断面,全潮平均温升分布特征与二期本工程温排水分布特征相似,因为综合考虑长江河口各电厂热能的排放,沿岸温升和离岸扩散范围增加。在取水口断面,近岸表层温升超过了 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在离岸 $200\text{ m}$ 范围内温升超过 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且垂向温度分层明显,在取水口处温升略小于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,取水口已受到上下游电厂温排水较明显的影响。在排水口断面,近岸表层最大温升约为 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在离岸 $260\text{ m}$ 范围内温升超过了 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在离岸 $510\text{ m}$ 范围内温升超过了 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### (3)对长江河口敏感目标的影响

在仅考虑本工程温排水情况下,由于洪季巨量长江径流和陈行水库水源地保护区位于本工程上游,大潮、中潮、小潮潮周期和全潮周期平均温升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 包络线未进入陈行水库水源地保护区。在综合考虑整个长江河口电厂夏季温排水情况下,由于热能排放比本工程多了 $14.89$ 倍,并且常熟、太仓电厂位于水源地保护区上游,导致温升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线侵入了陈行水库水源地保护区。在陈行水库水源地二级保护区内大潮、中潮、小潮和全潮平均温升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的面积分别为 $1.9$ 、 $1.82$ 、 $1.75$ 和 $1.83\text{ km}^2$ 。因长江河口电厂夏季排放温排水沿南支南岸输运扩散,整个长江河口电厂温排水对青草沙水库和东风西沙水库水源地保护区,以及九段沙湿地自然保护区、崇明东滩鸟类自然保护区均没有影响。

### [参 考 文 献]

- [1] 许晟轶,朱建荣,陈炳睿.长江河口石洞口电厂扩建工程温排水三维数值模拟[J].华东师范大学学报(自然科学版),2010(6):26-34.
- [2] HARLEMAN D R F, HALL L C. Thermal diffusion of condenser water in a river during steady and unsteady flows with application to the T. V. A. Browns Ferry nuclear power plant [J]. Hydrodynamics Laboratory Report, 1968 (3): 98-115.
- [3] MCGUIRK J J, RODI W. A depth averaged mathematical model for near field of side Discharges into open channel flow [J]. Fluid Mech, 1978(86): 761-781.
- [4] WEBB B W, NOBILIS F. Water temperature behavior in the River Danube during the twentieth century [J]. Hydrobiologia, 1994, 291:105-113.
- [5] HAMRICK J M, MILLS W B. Analysis of water temperatures in Conowingo Pond as influenced by the Peach Bottom atomic power plant thermal discharge[J]. Environmental Science & Policy, 2000(3):197-209.
- [6] POORNIMA E H, RAJADURAI M, RAO T S, et al. Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton [J]. Journal of Thermal Biology, 2005, 30(4):307-316.
- [7] MOATAR F, GAILHARD J. Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881 [J]. Comptes Rendus Geosciences, 2006, 338(5):319-328.
- [8] 王银爽. 电厂温排水数值模拟 [D]. 南京:河海大学, 2007.
- [9] 崔丹,姜治兵. 近岸海域电厂温排水数值模拟 [J]. 长江科学院院报, 2008, 25(2):13-15.
- [10] 张继民. 电厂温排水对水生生物的热影响及水质影响研究 [D]. 南京:河海大学, 2006.
- [11] 吴海杰,王志刚,陈淑丰. 滨海电站温排水数值模拟 [J]. 电力科技与环保, 2005, 21(4):48-51.
- [12] 朱羿. 电厂温排放的水环境数学模拟及热环境容量计算[D]. 南京:河海大学, 2005.
- [13] 杨芳丽,谢作涛,张小峰,等. 非正交曲线坐标系平面二维电厂温排水模拟 [J]. 水利水运工程学报, 2005(2): 36-40.

- [13] 李涛, 吴少华, 侯京明, 等. 资料同化在渤海风浪风暴潮重现期计算中的应用研究 [J]. 海洋通报, 2015, 34(6): 631-641.
- [14] 葛黎丽, 屈衍, 张志旭, 等. 南海深水区风、浪、流多年一遇重现期极值的推算 [J]. 中国海上油气, 2009, 21(3): 207-210.
- [15] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报(2000—2014)[R/OL]. [2016-02-01]. <http://www.coi.gov.cn/gongbao/zaihai/>.
- [16] SAHA S, MOORTHI S, PAN H, et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(8): 1015-1057.
- [17] NOAA. ETOPO1 Global Relief Model[EB/OL]. [2016-02-01]. [www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html).

(责任编辑: 李万会)

(上接第 137 页)

- [14] 周莉华. 基于 POM 模型的天生港电厂温排水三维数值模拟研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [15] 朱军政. 强潮海湾温排水三维数值模拟 [J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 56-60.
- [16] 何国建, 赵慧明, 方红卫. 潮汐影响下电厂温排水运动的三维数值模拟 [J]. 水力发电学报, 2008, 27(3):125-131.
- [17] QIU C, ZHU J R. Influence of seasonal runoff regulation by the Three Gorges Reservoir on saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary [J]. Continental Shelf Research, 2013, 71: 16-26.

(责任编辑: 李万会)