

# 温排水对长江安徽段水温的影响模拟

张鹏<sup>1</sup>, 黎兰毅敏<sup>2</sup>, 范臣臣<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学 环境与市政工程学院, 河南省水环境模拟与治理重点实验室, 河南 郑州 450046;  
2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 为研究温排水对长江安徽段水温的影响, 建立长江干流安庆至芜湖段三维水动力温度输运模型, 根据水文实测数据对模型参数进行率定及验证, 分别在纵、横断面上预测分析了不利条件下两种排放工况(减排前、减排后)对周边水域温度的影响范围及程度。结果表明: 在两种排放工况下, 保护目标水温均未受影响; 水体温升分布有显著垂向差异, 随着水深增加, 影响程度逐渐减小; 减排后排放产生的纵、横断面热污染带范围均小于减排前, 减排前产生的最大热污染带长度为 1.074 km, 温度最大增量为 0.343 °C, 减排后产生的最大热污染带长度为 1.006 km, 温度最大增量为 0.321 °C。预测结果可为区域水生态保护提供依据。

**关键词:** 温排水; 三维水温模型; 水温分层预测; 长江安徽段

中图分类号: TV123; X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2021)01-0051-06

## Simulation of influence of thermal discharge on water temperature in Anhui section of Yangtze River

ZHANG Peng<sup>1</sup>, LI Lan Yimin<sup>2</sup>, FAN Chenchen<sup>1</sup>

(1. Henan Provincial Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, School of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;  
2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of thermal discharge on water temperature of the Yangtze River in Anhui Province, a three-dimensional hydrodynamic temperature transport model for Anqing – Wuhu reach of the Yangtze River main stream was developed. Parameters of the model were calibrated and verified according to the measured hydrological data. The influence scope and extent of two kinds of discharge conditions (before and after the discharge reduction) on the surrounding water temperature under adverse conditions were predicted for transverse section and longitudinal section respectively. The results showed that under the two discharge conditions, the targeted water temperature had not been affected, the distribution of water temperature increment presented an obvious vertical variation, and the impact degree gradually decreased with the increase of the water depth. The thermal pollution zones of transverse section and longitudinal section generated after the discharge reduction were both smaller than those generated before the reduction. The maximum length of thermal pollution zone was 1.074 km, and the maximum temperature increment was 0.343 °C before discharge reduction. Comparatively, the maximum length of thermal pollution zone was 1.006 km and the maximum temperature increment was 0.321 °C after the reduction. The prediction results can provide some guidance for regional water ecological protection.

**Key words:** thermal discharge; three-dimensional water temperature model; stratification prediction of water temperature; Anhui Section of Yangtze River

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-09-19

基金项目: 华北水利水电大学高层次人才科研启动项目; 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2018GGJS077)

作者简介: 张鹏(1988-), 男, 河南商丘人, 博士, 讲师, 研究方向为水体污染物迁移转化机理。

## 1 研究背景

近年来,随着我国工业化水平不断提高,由电力、化工、能源行业排放引起的大量水体热污染问题备受关注<sup>[1]</sup>。一方面水体热污染改变受纳水体中物化生反应速率,加重有毒有害物质的生成<sup>[2]</sup>;另一方面水温增高会减少水中溶解氧含量<sup>[3]</sup>,导致水质恶化,威胁水生生物的生存繁衍<sup>[4]</sup>。长江安徽段水域内有生存水温在4~20℃的江豚、对水温十分敏感的白鳍豚等极危动物,也有中华鳃、达氏鳃、胭脂鱼等其他水生生物栖息生存<sup>[5]</sup>。因此,热污染对长江水体水生态的影响不言而喻。

目前,关于温排水的环境影响分析多采用现场实测、遥感测量、物理模型及数值模拟的方法<sup>[6]</sup>。由于数值模拟具有节省人力物力财力及时效性的特点,常用于河流、近岸海域等水温的模拟预测<sup>[7]</sup>。以往温排水模拟大多采用二维平面数学模型,但其控制方程中忽略了温度的垂向变化,而热源排放扩散的过程本身存在三维特性,仅考虑垂向平均温度具有一定的局限性<sup>[9-11]</sup>。三维水温模型由于其考虑温度和密度的垂向差异,能较好地反映热源在受纳水体中扩散和水温异重分层等效果,对于温排水的模拟具有重要意义<sup>[12]</sup>。Lee等<sup>[13]</sup>利用MIKE 3模型的 $\sigma$ 坐标变换模拟预测了科威特滨海电厂附近的流场及水温变化情况,结果表明表层水温吻合较好,而底层水温预测值较实测值偏低;吴宇帆等<sup>[14]</sup>运用三维数值模式研究了长江河口电厂温排水的输运扩散规律,分析了温排水对周边敏感目标的影响;许晟秩等<sup>[15]</sup>考虑江表面的热通量,采用改进的三维数值模式ECOM模拟了夏季石洞口电厂温排水输运扩散规律;颜钰等<sup>[16]</sup>利用RMA-10三维有限元模型模拟了鲢鱼圈热电厂周边水体的温升场分布情况。笔者根据长江安徽段水文及河道结构等特点,构建 $\delta$ 分层的三维水动力温度输运模型,在设计条件下,通过设置减排前、减排后两种排放工况,模拟了热污染源在周边水域的扩散情况,计算出热污染带影响范围,预测分析热源排放对上、下游水温的影响,为长江安徽段环境风险评价及流域规划管理提供依据。

## 2 资料来源与研究方法

### 2.1 研究区域概况

长江安徽段地处长江下游流域,全长416 km。沿江地带地貌概括地描绘为“两山夹一谷”,长江自谷中流过<sup>[17]</sup>。“两山”位于河谷两侧外围,西北部为大别山侵蚀基岩山区,东部为皖南侵蚀基岩山区。

来水主要为长江上游湖北、江西等省份,干流向东经安庆、池州、铜陵、芜湖等城市,至皖、苏交界止<sup>[18-19]</sup>。拟减排项目位于安庆市迎江区临江北岸,排水经处理后排入长江左岸枞阳无为保留区。为充分利用长江急促的水流对热源的扩散降温作用,将排水口设置于水下1 m排放。研究区域平均气温14.5~16.8℃之间。研究水域平均水温19.6℃,冬季水温在9.3~13.7℃之间。区域内大通水位站历年最高水位18.94 m,最低水位3.56 m。

根据安徽省水功能区规划,研究区域涉及的水功能区划有长江安庆工业用水区和长江左岸枞阳无为保留区,涉及的保护目标有上游规划四水厂取水口、下游前江口国控断面。

### 2.2 模型基本方程

模型基本控制方程如下<sup>[20]</sup>:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + u_s S \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} + \frac{\partial (wT)}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S \quad (4)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial (us)}{\partial x} + \frac{\partial (vs)}{\partial y} + \frac{\partial (ws)}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (5)$$

式中: $x, y, z$ 是笛卡尔坐标系下的空间位置; $S$ 为点源排放产生的源项; $u, v$ 和 $w$ 为3个方向上的流速分量, m/s; $f$ 为Coriolis因子,  $f = 2\Omega \sin \varphi$ ,  $\Omega$ 为地球自转的角速度,  $\varphi$ 为地理纬度; $t$ 为时长, s; $g$ 为重力加速度, m/s<sup>2</sup>; $\eta$ 为水位, m; $u_s$ 为源项排放到水体的速率, m/s; $F_u, F_v$ 为水平涡黏项; $T$ 为水温, °C; $s$ 为盐度; $D_v$ 为垂向扩散系数; $D_h$ 为水平扩散系数; $\hat{H}$ 为与大气热交换产生的源项; $p_a$ 为大气压, kPa; $\rho_0$ 为水的相对密度; $T_s, s_s$ 为温度及盐度产生的源项; $F_T, F_s$ 为水平扩散项; $\nu_t$ 为垂向紊动黏性系数。

### 2.3 模型计算条件设置

根据长江安徽段实际地形图及相关实测资料,将模型划分为17 128个三角形网格,网格边长为

300 m,对于热源排放周边水域进行网格加密至边长为 30 m,研究区域概况及模型网格划分见图 1。温度场边界参考大通水文站温度实测资料,模型计算时间步长为  $t = 30\text{ s}$ ,初始流速值设为 0,垂向上采用  $\delta$  分层方式,将模型按水深从水平面至河谷底部依次为 1~10 层。

### 2.4 模型率定及验证

利用枯水期 2018 年 1 月 20 日至 22 日大通水文站逐时水位及流量进行率定,参考有关文献 [21],得到模拟区域主槽糙率高度的取值范围为  $50 \sim 65\text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ,河道曼宁系数为  $30 \sim 65\text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ,模型计算结果的水位平均绝对误差为 3.7 cm,最大绝对误差为 7.8 cm,流量平均相对误差为 2.13%。利用平水期 2018 年 2 月 27 日-3 月 1 日大通水文站逐时水位及流量值进行验证,计算结果中水位的平均绝对误差为 11.6 cm,最大绝对误差为 19.9 cm,流

量平均相对误差为 2.25%。大通水文站水位、流量率定及验证结果对比见图 2。由验证结果可知,模拟计算结果与实测结果吻合较好,所建立的模型适用于该河段的水动力模拟。

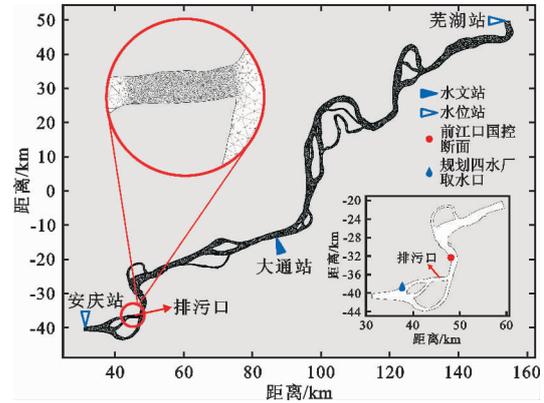


图 1 研究区长江安庆-芜湖段模拟区域概况及模型网格划分

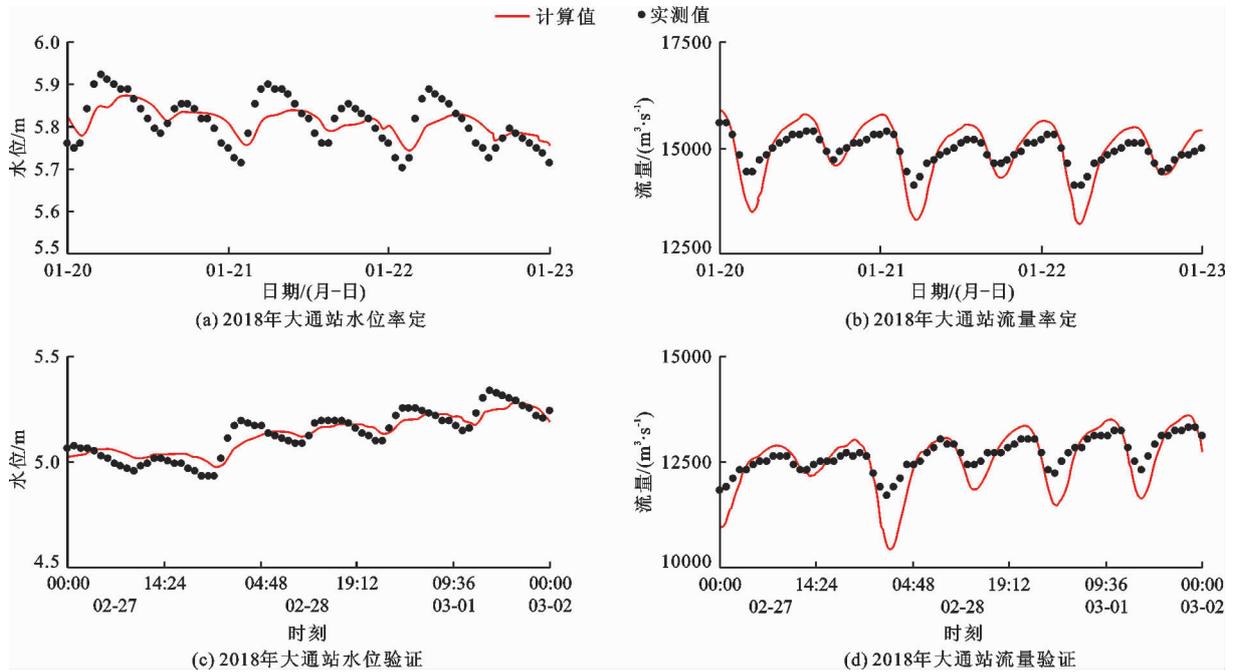


图 2 大通水文站水位、流量率定及验证结果对比

## 3 结果与分析

### 3.1 模拟工况

为降低对周边水域的环境影响,项目通过技术改进减少了排水量,减排前排水量为 28 990 t/d,减排后排水量为 27 080 t/d。两种工况的排江水温均为  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据实际情况,将排水口放置在模型水深的第 2 层。综合考虑大通水文站 90% 水文保证率典型枯水年流量、三峡工程及各种调水工程的影响,以流量  $8\ 533\text{ m}^3/\text{s}$  作为上游边界条件,以同时期

芜湖水位站水位值作为下游边界条件,选取研究水域水温本底值为  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,作为模拟的最不利条件。

### 3.2 纵断面温度增量及热污染带范围

利用构建的水动力水温数学模型,模拟得到的减排前(工况 1)和减排后(工况 2)热源排放对长江水体纵断面温度增量及热污染带范围见表 1 和图 3。由表 1 和图 3 可知,两种工况条件下表层热污染带范围最大,随着水深层次的增加,热污染带范围逐渐减小;排污口所在的第 2 层温度增量最大,随着水深层次的增加,温度增量也逐渐减小;工况 2 条件下

表1 不同工况条件下不同水深层次纵断面水温增量及热污染带范围

水深层次	温度增量范围/ ℃	热污染带长度/km		热污染带纵断面面积/km <sup>2</sup>		温度最大增量/℃	
		工况1	工况2	工况1	工况2	工况1	工况2
1	>0	1.074	1.006	0.0675	0.0607	0.184	0.172
	>0.1	0.133	0.114	0.0021	0.0016		
	>0.2	1.042	0.994	0.0648	0.0575		
2	>0.1	0.141	0.125	0.0028	0.0024	0.343	0.321
	>0.2	0.046	0.035	0.0004	0.0002		
3	>0	0.994	0.917	0.0589	0.0519	0.121	0.113
	>0.1	0.047	0.017	0.0002	0.0001		
5	>0	0.709	0.670	0.0356	0.0313	0.035	0.033
7	>0	0.397	0.376	0.0117	0.0098	0.017	0.016
10	>0	0.056	0.000	0.0003	0.0000	0.011	0.000

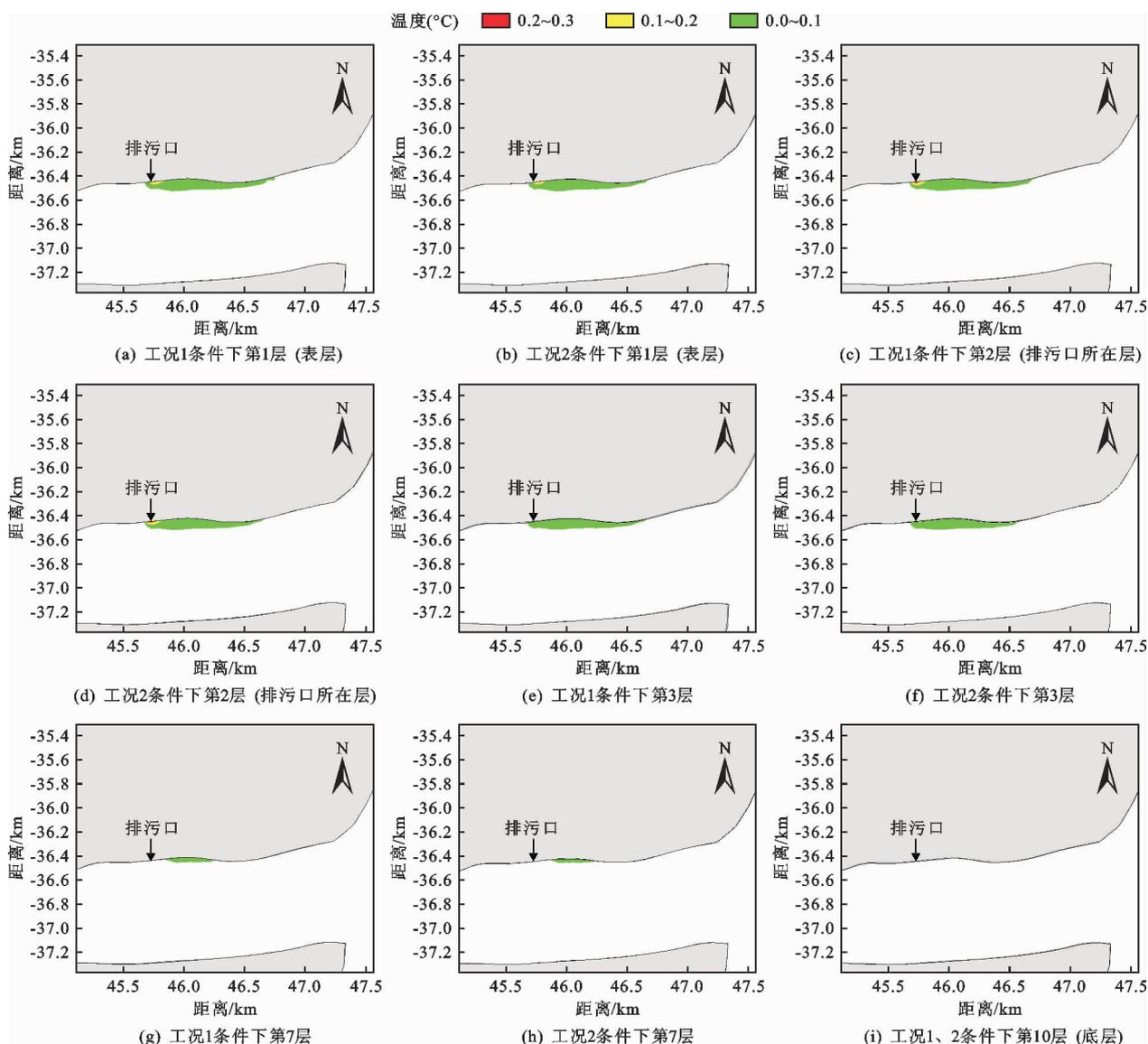


图3 不同工况条件下不同水深层次纵断面水温增量范围

排放产生的不同纵断面热污染带范围以及温度最大增量均小于工况 1。所设保护目标即规划四水厂取水口位于排污口上游 8.206 km 处,前江口国控断面位于排污口下游 5.574 km 处,减排前和减排后温排放产生的最大热污染带长度分别为 1.074 km 和 1.006 km,两种工况条件下保护目标均在热污染带最大范围之外,水温增量为 0,敏感目标未受影响。

### 3.3 横断面温度增量及热污染带范围

利用构建的水动力水温数学模型,模拟得到的减排前(工况 1)和减排后(工况 2)热源排放对长江水体横断面温度增量及热污染带范围见表 2 和图 4。由表 2 和图 4 可知:工况 2 条件下排放产生的不同横断面热污染带范围均小于工况 1;排污口处温度增量最大,工况 1 增量大于 0.2 °C 的热污染带宽度为 6 m,面积为 73 m<sup>2</sup>,工况 2 增量大于 0.2 °C 的

热污染带宽度为 2 m,面积为 17 m<sup>2</sup>;排污口下游 120 m 处温升范围最大,工况 1 热污染带宽度为 36 m,横断面面积为 6 026 m<sup>2</sup>,工况 2 热污染带宽度为 35 m,横断面面积为 5 801 m<sup>2</sup>。

表 2 不同工况条件下不同横断面热污染带范围

横断面	温度增量范围/ °C	热污染带宽度/m		热污染带横断面面积/m <sup>2</sup>	
		工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
排污口处	>0	19	17	1142	1011
	>0.1	11	9	319	277
	>0.2	6	2	73	17
排污口下游 120 m 处	>0	36	35	6026	5801
	>0.1	5	2	49	11
排污口下游 930 m 处	>0	7	0	795	0

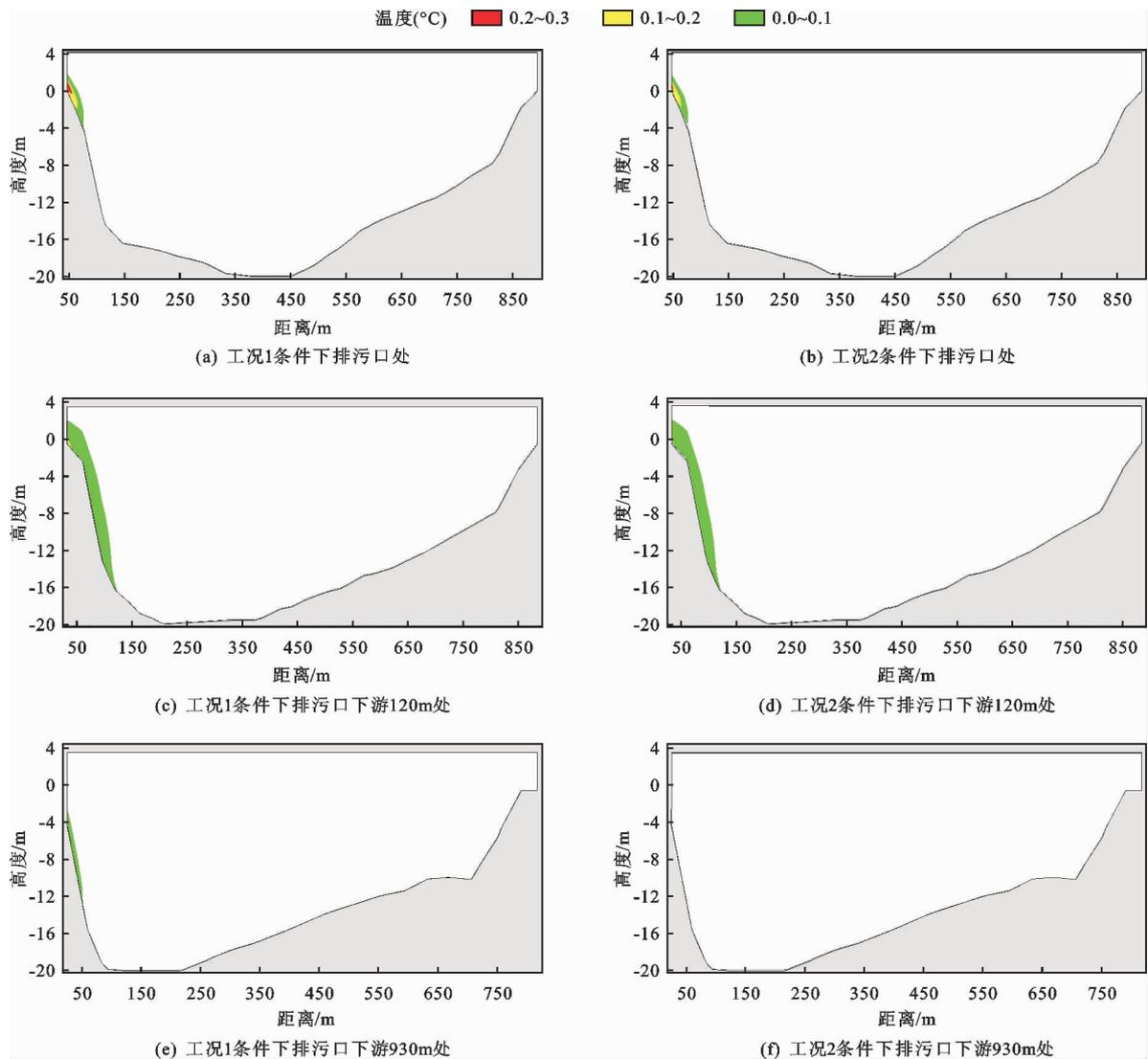


图 4 不同工况条件下不同横断面水温增量范围

## 4 结 论

(1) 本文构建了长江干流安庆至芜湖段 8 分层的三维水动力水温模型,对排温口周边水域进行网格加密至边长为 30 m,率定和验证的计算水位与实测水位绝对误差均在 0.2 m 之内,流量平均相对误差为 2.25%,模拟结果能够较好地反演长江安庆至芜湖段水动力情况。

(2) 选取大通水文站 90% 枯水期和研究水域水温为 8 ℃ 作为模拟的最不利条件,模拟得到减排前和减排后温排放产生的最大热污染带长度分别为 1.074 km 和 1.006 km,最大热污染带纵断面面积分别为 0.067 5 km<sup>2</sup> 和 0.060 7 km<sup>2</sup>,水温最大增量分别为 0.343 ℃ 和 0.321 ℃。

(3) 减排前和减排后热排放产生的水体温升垂向差异显著,随着水流向下流动,温度影响程度逐渐变小,最低层水温几乎无变化。温排放会造成周边局部水体温度有所升高,排污口所在的长江左岸枞阳无为保留区会受到一定影响,但排污口上下游规划四水厂取水口及前江口国控断面保护目标均未受影响。

### 参考文献:

- [1] 刘永叶,杨阳,乔亚华,等. 关于国内温排水生态影响研究的建议[J]. 环境与可持续发展, 2017,42(3):47-49.
- [2] 金岚. 水域热影响概论[M]. 北京:高等教育出版社, 1993.
- [3] 张鹏,逢勇,石成春,等. 基于 EFDC 的闽江干流下游 DO 变化研究[J]. 水资源保护, 2016,32(5):91-96+102.
- [4] 尹哲慧. 浅析水生植物腐烂分解对水质的影响[J]. 生物技术世界, 2015(5): 20.
- [5] 高端勤睿. 基于江豚保护的长江安徽段生态环境保护研究[J]. 造纸装备及材料, 2020,49(1):62-63.
- [6] 段亚飞,赵懿珺,纪平,等. 温排水水槽试验与平面二维、准三维及三维数值模拟的比较[J]. 水力发电学报, 2017, 36(9): 100-110.
- [7] 张斌,丁江华,杜玉吉. 江水源热泵系统温(冷)排水三维数值模拟研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(1): 171-175+179.
- [8] 覃春丽,张琨,张爱玲,等. 内陆水域排放口近区温排水数值模拟研究概述[J]. 环境影响评价, 2016, 38(4): 40-42+56.
- [9] 余格格. 电厂温排水热扩散三维数值模拟研究[J]. 水利技术监督, 2019(3): 182-184.
- [10] 陈小莉,张强,赵懿珺,等. 滨海核电厂冷却水明渠浅水排放三维数值模拟[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(3): 207-212.
- [11] 段国胜,张耀哲,薛承文. 冲积河流温排水数值模拟研究现状及需要解决的关键问题[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(2): 75-78+82.
- [12] 孙美云,卓志宇,岳晗. 江水源热泵冷排水温度场三维数值模拟研究[J]. 湖南水利水电, 2018(2): 27-30.
- [13] LEE M E, KIM G. Numerical simulation of the water temperature in the Al-Zour area of Kuwait[J]. Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, 2019, 25(3): 334-343.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 颜钰,邵冬冬,顾卫,等. 鲢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.
- [17] 杨娟,王心源,杨则东. RS 与 GIS 在长江安徽段河道及湿地演变中的应用[J]. 地理空间信息, 2011, 9(5): 102-104+108+166-167.
- [18] 杨月明,吕平. 安徽长江水文情势变化及影响分析[J]. 江淮水利科技, 2018(5): 3-4+10.
- [19] 李雪峰. 安徽省长江水沙及河势变化分析[J]. 吉林水利, 2020(5):41-44.
- [20] 王连接. 滨海电厂温排水三维数值模拟研究[J]. 广东水利水电, 2016(6):1-5.
- [21] 舒鑫. 长江近岸电厂温排水对水域影响数值模拟研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.