

三门湾春季温排水增温效应数值模拟研究

丁跃平, 郭远明, 李铁军, 薛彬, 张玉荣

(浙江省海洋水产研究所, 农业部重点渔场渔业资源科学观测实验站, 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室, 浙江 舟山 316021)

摘要: 采用 ECOMSED 模式和 2012 年 5 月份现场温盐、潮流以及气象观测资料, 对三门湾核电站冷却水排放所致海水增温效应进行了数值模拟研究。结果表明, 在近期工程建成后, 三门湾海水增温范围主要出现在排水口附近, 表层增温幅度最大, 底层增温幅度最小, 在月度时间内, 表底层增温范围有大、小极值变化。在全部工程完成后, 温排水量大幅提高, 三门湾表层海水增温 1℃ 的范围将稳定影响较大面积, 4℃ 增温范围较小。在月度时间内, 表底层增温范围大、小极值变化幅度也将增大。

关键词: 温排水; 增温效应; 数值模拟; 三门湾

中图分类号: X830.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2015)04-0101-07

doi: 10.11759/hyxx20140303001

三门湾位于浙江沿海中部, 是一个西北-东南方向的半封闭海湾, 湾内海岸线曲折, 港汊纵横, 潮滩发育, 主要类型为舌状潮滩。三门湾流域面积为 3 160 km², 湾内河流年径流量为 26.8 × 10⁴ m³, 水域面积约 775 km², 其中高泥滩面积约 295 km², 湾内主要水道为猫头水道、满山水道和石浦水道, 这些水道是湾内与外海水交换的主要通道, 并由湾内水岔道流入高泥滩水域^[1]。

三门核电站地处三门湾内的三门县六敖镇猫头山半岛, 总占地面积 740 万 m², 近期安装 2 台 125 万 kW 核电机组, 全面建成后, 将形成 6 台 125 万 kW 核电机组的发电能力, 装机总容量将达到 750 万 kW, 发电机组冷却水采用海水直接排放循环方式, 冷却水进入三门湾后将增加海水温度, 进而对三门湾内的生态环境产生影响。

唐建华和徐雪峰等对三门湾潮流进行了数值模拟研究, 分析了潮流运输的状况和围垦对动力环境的影响^[2-3]。

数值模拟方法是一个对温排水环境影响有效的研究工具, 许多学者采用数值模式对温排水增温效应进行了研究^[4-8]。为了评价冷却水排放对三门湾水温的影响程度, 作者采用三维海洋动力-热力数值模式, 模拟计算了在春季气候条件下, 冷却水排放对三门湾海水增温的影响范围和程度, 为研究三门湾海洋生态环境的变化提供参考。

1 三维海洋动力-热力模式

1.1 模式简介

美国普林斯顿大学 Blumberg 和 Mellor 于 1977

年共同建立了三维斜压原始方程海洋模式 POM (Princeton Ocean Model), 在 20 世纪 80 年代中期, 发展了 POM 模式适用浅水的版本 ECOM(Estuarine and Coastal Ocean Model), 再加入一般的开边界条件及示踪物、底边界层、沉积物输运等功能后, 发展成一个有多种功能的浅海三维海洋动力-热力-沉积物模式 ECOMSED。该模式在我国及世界浅海海域得到广泛应用。

本文采用 ECOMSED 模式研究三门湾核电机组冷却水排放对海水的增温效应。

ECOMSED 模式包含一个二阶湍流闭合子模型提供垂向混合系数; 垂向采用 Sigma 坐标系统, 能够比较方便地处理浅海变化的海底地形; 采用 Arakawa C 交错网格; 水平方向时间差分采用显式格式, 垂向时间差分采用隐式格式。后者减小了对垂向时间步长的限制, 并允许对海面边界和底边界使用较小的垂直分辨率; 模型有一个自由面和一个分离时间步长。外模态是二维的, 使用较小的时间步长, 内模态是三维的, 使用较长的时间步长; 使用完整的热力学方程组。

1.1.1 连续性方程及动量方程

$$\nabla \cdot \bar{V} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-08-10

基金项目: 浙江省重大科技专项计划项目(2012C13005); 浙江省省属科研院所扶持专项(2012F20026); 浙海渔计[2011]123 号

作者简介: 丁跃平(1958-), 男, 高级工程师, 主要从事海洋渔业生态环境方面的研究, E-mail: 107917029@qq.com

雷诺平均动量方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla U + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla V + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) + F_y \quad (3)$$

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

其中, \bar{V} 为水平对流速度, W 为垂向速度。 U 为水平 x 轴向速度, V 为水平 y 轴向速度; ρ_0 为基准密度, ρ 为计算液体的密度; K_M 为垂向湍流掺混系数, 其大小决定速度的垂直分布; F_x 和 F_y 为湍流扩散项, f 为科氏参数, g 为重力加速度, P 是压力。

在深度 z 处的压强为:

$$P(x, y, z, t) = P_{\text{atm}} + g\rho_0\eta + g \int_z^0 \rho(x, y, z', t) dz' \quad (5)$$

其中, P_{atm} 大气压力, η 是水位偏差。

1.1.2 温、盐守恒方程

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \bar{V} \cdot \Delta \theta + W \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + F_\theta \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \bar{V} \cdot \Delta S + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (7)$$

其中, θ 为位温(浅水时可以是现场温度), S 为盐度, K_H 为热盐垂向湍流混合系数, F_θ , F_S 表示位温和盐度的源汇项。

密度是 θ 和 S 的函数, 即:

$$\rho = \rho(\theta, S) \quad (8)$$

小尺度过程引起的运动通过 F_X , F_Y , $F_{\theta,S}$ 引入模型, 其表达式如下:

$$F_X = \frac{\partial}{\partial x} \left[2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (9a)$$

$$F_Y = \frac{\partial}{\partial y} \left[2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (9b)$$

$$F_{\theta,S} = \frac{\partial}{\partial x} \left[2A_H \frac{\partial(\theta, S)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_H \frac{\partial(\theta, S)}{\partial y} \right] \quad (10)$$

其中 A_M , A_H 分别表示水平和垂直分子黏滞系数, $F_{\theta,S}$ 表示位温和盐度方程中的小尺度过程。

1.1.3 海面和海底边界条件

a) 在自由海面 $z = \eta(x, y)$ 处:

$$\rho_0 K_M \left(\frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z} \right) = (\tau_{ox}, \tau_{oy}) \quad (11a)$$

$$\rho_0 K_H \left(\frac{\partial \theta}{\partial z}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) = \left(\dot{H}, \dot{S} \right) \quad (11b)$$

$$W = U \frac{\partial \eta}{\partial x} + V \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (11c)$$

其中 (τ_{ox}, τ_{oy}) 为海面风应力。

b) 在底边界 $z = H(x, y)$ 处:

$$\rho_0 K_M \left(\frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (12a)$$

$$W_b = -U_b \frac{\partial H}{\partial x} - V_b \frac{\partial H}{\partial y} \quad (12b)$$

其中 (τ_{bx}, τ_{by}) 为底摩擦应力。

1.2 模式参数

模式采用四层完整动力-热力方程, 垂直 σ 值分别为 0.0, -0.38, -0.96, -1.0。水平差分网格采用正方形网格, $DX=183$ m, $DY=184$ m, $DT=4$ s。开边界潮位采用 A 站 2012 年 4 月 28 日 0 时~6 月 1 日 0 时逐时潮位资料的调和和分析预报值作为模式开边界潮位驱动。

对 6 个潮流测站(图 1)分别在大潮(2012 年 5 月 20 日 10 时至 21 日 12 时)、小潮(2012 年 5 月 13 日 9 时至 14 日 11 时)期间连续 27 h 观测表层潮流与模式计算表层流比较, 模式水域采用理论深度零线作为模式水域边界, 计算的表层流可以较好地拟合观测潮流, 其中温排水口附近的潮流变化拟合较好, 见图 2、图 3。

温度、盐度模式开边界采用在 23#和 26#站观测的大潮期间温、盐资料做调和和分析, 采用日周期和半日周期调和和常数计算出模式计算期间的逐时温、盐分布。

气温、风速采用三门气象台 2012 年 5 月 1 日 0 时~31 日 23 时逐时观测气温和风速。

太阳短波辐射采用在三门湾附近自 1999 年 9 月至 2005 年 8 月期间 258 个无云晴天观测资料, 得出春季晴天逐时总太阳短波辐射量逐时分布, 云覆盖系数取 0.4。

取宁波气象台 1951 年~2004 年共计 54 年平均年降水量 1.380 m。相对湿度 75%, 平均大气压 1010.0 hPa。

根据全球海洋蒸发量客观分析资料集(ftp://ftp.whoi.edu/pub/science/oafux/data_v3/monthly/evaporation/), 取三门湾附近海域 2012 年海面年蒸发量 9.974 m。

在 ECOMSED 模式中取 AANDBFLX 模块计算海气表面热力交换过程。

模式初始场为静止态动力场和恒定温盐场, 在边界强迫潮位、温盐和太阳短波辐射及观测气温、风速作用下起算, 经过 72 h 后, 计入温排水效应计算序列, 共计算 31 d。

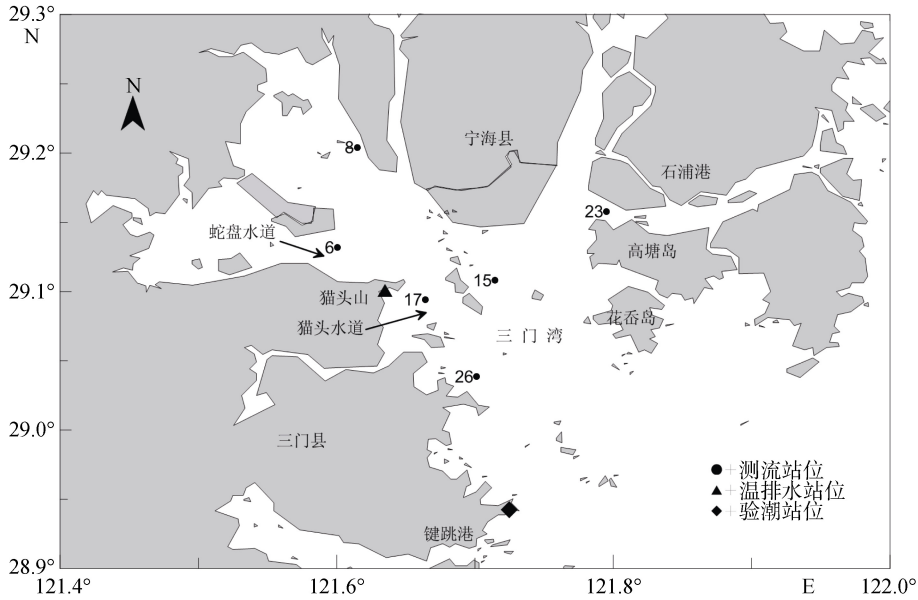


图 1 三门湾温排水站位、海流、潮汐观测站位分布

Fig. 1 The distribution of stations for warm water discharging, monitoring ocean tide and current in Sanmen bay

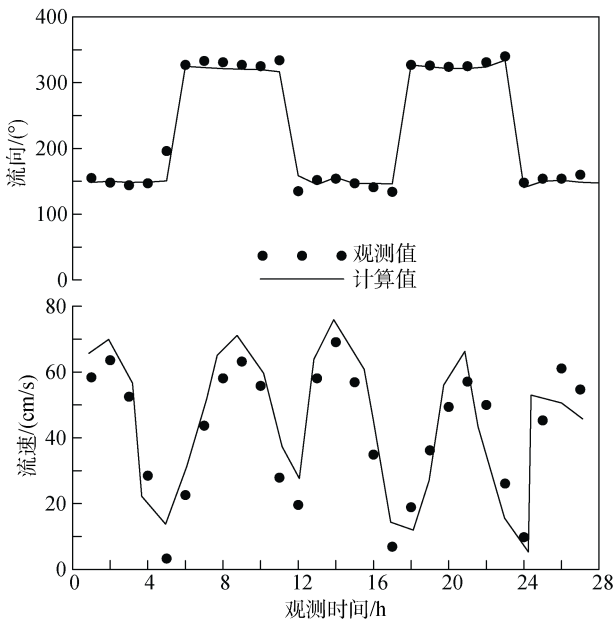


图 2 17#站观测-计算潮流比较

Fig. 2 Comparison between tide monitoring and calculation at station #17

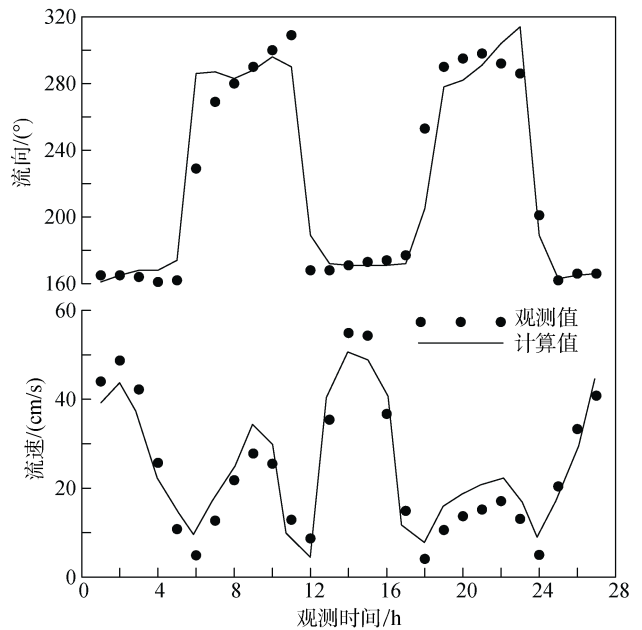


图 3 6#站观测-计算潮流比较

Fig. 3 Comparison between tide monitoring and calculation at station #6

2 近期冷却水排放影响

根据工程计划, 近期将建设 2 座 125 万 kW 机组, 冷却水采用直排方式, 排放流量为 $155.32 \text{ m}^3/\text{s}$, 温升 7°C (冷却水温度高于排放海域海水温度的度数), 温排水位置在工程南部近岸海域。采用该参数, 在三门湾温排水模式中计算冷却水排放引起的增温效应。在相同的动力-热力强迫条件下, 无温排水与有

温排水模式计算的温度场之差为增温场。

2.1 温排水增温极值影响范围

温排水进入三门湾后, 在潮流热输送、潮混合以及太阳辐射和海气热交换的作用下扩散, 根据 1 个月模式时间计算的各增温等级逐时增温场面积分布分析, 增温面积的大小主要受到潮流热运输效应大小的影响。在大潮期间, 潮流较大, 对温排水的热扩

散十分有利,这时期的增温面积较小。在小潮期间,潮流流速缓慢,对温排水的热扩散不利,各增温等级的增温水面积较大。底层温度增温面积的月变化比表层小,是因为底层水主要靠垂直混合和外海热输送的作用,其热惯性比表层大。表层增温等级为1、2℃的分级逐时面积见图4~图5,最大面积分布见图6~图7。

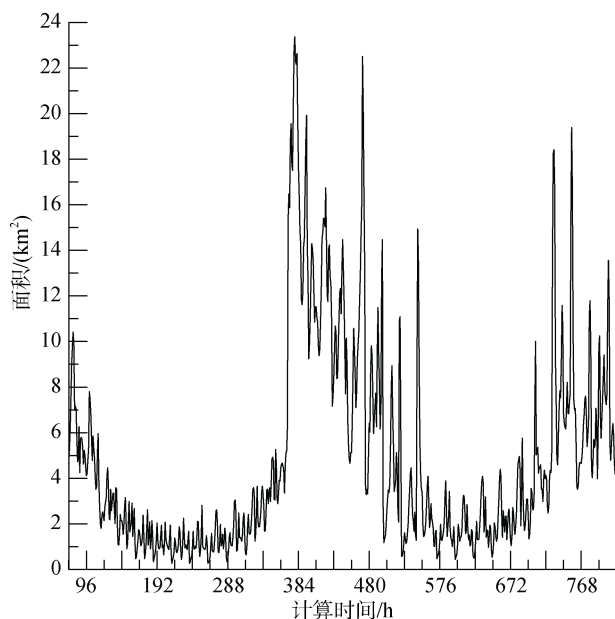


图4 表层升温1 面积分布

Fig.4 Distribution of area with surface temperature increasing 1°C at different time points

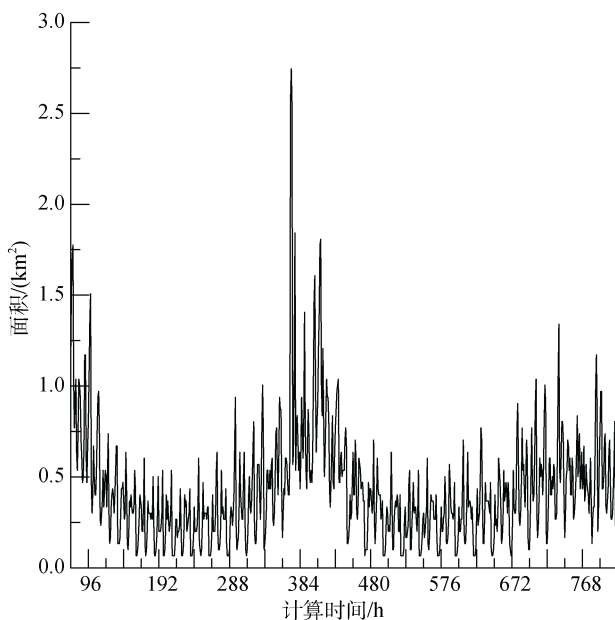


图5 表层升温2℃面积分布

Fig.5 Distribution of area with surface temperature increasing 2°C at different time points

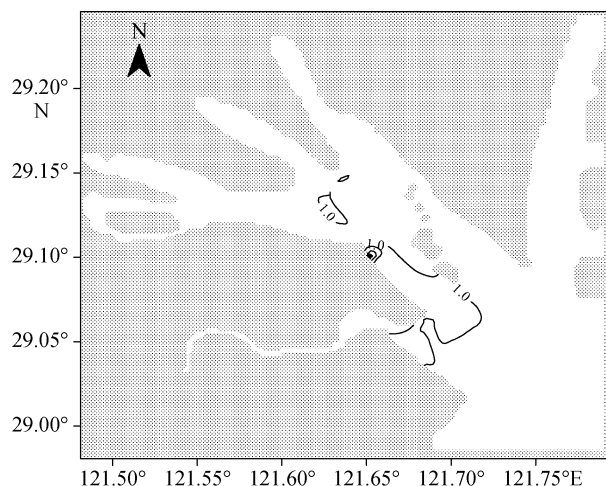


图6 表层升温1℃最大面积分布

Fig.6 Distribution of maximum area with surface temperature increasing 1°C

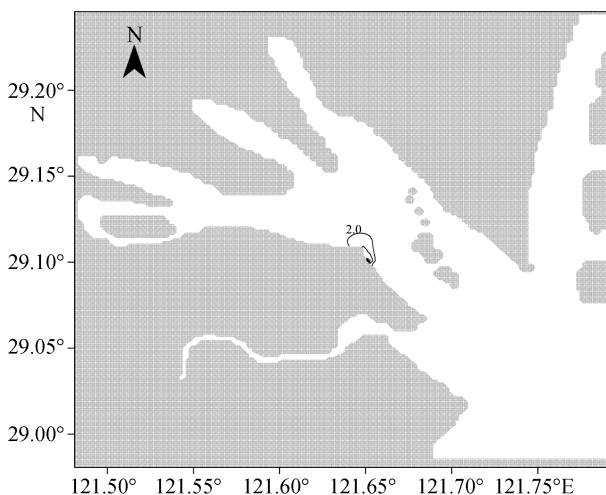


图7 表层升温2℃最大面积分布

Fig.7 Distribution of maximum area with surface temperature increasing 2°C

模式计算表、底层温度增温分布分析表明,增温幅度为1、2℃时,最大增温面积多出现在无风或风小的中午和午后低潮期间,最小增温面积多出现在凌晨和夜间涨潮期或高潮期。对于增温在3、4℃,最大增温面积多出现在夜间高潮期,最小增温面积多出现在凌晨的涨潮中间时刻。

表1是各增温等级的极值面积,表、底层增温1℃时面积最大,表层增温1℃的面积最大、最小值相差87倍,底层增温1℃的面积最大、最小值相差464倍;表层增温2℃的面积最大、最小值相差41倍,底层增温2℃的面积最大、最小值相差32倍;表层增温3℃的面积最大、最小值相差19倍,底层增温3℃的面

积最大、最小值相差 2 倍；表层增温 4℃ 的面积最大、最小值相差 8 倍，底层增温 4℃ 的面积最大、最小值相差 11 倍。

在月度时间内，三门湾温排水增温影响范围有较

表 1 表、底层各增温等级极值面积

Tab. 1 The maximum and minimum areas of surface and bottom layers in different temperature increasing grades

增温等级 (°C)	表层面积(km ²)		底层面积(km ²)	
	最大值	最小值	最大值	最小值
1	23.375	0.268	15.338	0.033
2	2.746	0.067	1.072	0.033
3	0.636	0.033	0.670	0.033
4	0.268	0.033	0.368	0.033

表 2 表、底层各增温等级频率下的面积分布(km²)

Tab.2 Area distribution of frequency in surface and bottom layers in different temperature increasing grades (unit: square kilometer)

频率(%)	表层				底层			
	1°C	2°C	3°C	4°C	1°C	2°C	3°C	4°C
10	11.888	0.837	0.335	0.134	6.530	0.435	0.167	0.067
50	1.206	0.234	0.134	0.067	0.636	0.100	0.033	0.033
80	0.268	0.100	0.067	0.033	0.201	0.033	0.033	0.033

3 远期冷却水排放影响

根据工程计划，远期建成 6 座 125 万 kW 机组，冷却水采用直排方式，排放流量 465.96 m³/s，温升 7℃。采用该参数，在三门湾温排水模式中计算冷却水排放引起的增温效应。

3.1 温排水增温极值影响范围

远期温排水量增大后，对三门湾海水温度环境增加了较大压力，表现在水温增温 1、2℃ 面积大幅增加，对三门湾海洋环境产生一定影响，见图 8~图 9。但是 3、4℃ 增温的水体面积较小，高增温水体的影响范围依然较小。表层增温水平分布见图 10~图 11。

三门湾潮汐涨落的热输送作用依然是温排水热扩散的主要动力机制，但是在温排水量大幅增加的情况下，潮汐热输送作用没有变化，所以，温排水增温对三门湾内的环境影响范围有大幅增加。

增温水体的面积在低潮期出现最大值，在高潮期出现最小值，底层海水增温范围较小，增温范围主要出现在表层。

表 3 是各增温等级极值面积，最大的增温水体面积出现在表层 1、2℃ 等级，底层增温水体面积比较小。

大的极值变化，最大影响范围与最小影响范围的差值在表层大于底层，以 1℃ 影响范围大小极值变化最大。

2.2 温排水增温频率影响范围

由于受潮汐和太阳辐射等因素的影响，三门湾内海水温度有多周期变化，其中日周期、半日周期和半月周期变化的幅度较大，另外受到风速和气温的变化影响也较大。为了确定温排水在 4 个增温等级中面积大小的出现频率，作者对增温水体出现频率和位置进行了分析。

表 2 是各等级表、底层增温频率面积分布。增温水体主要出现在排水口南北两侧沿岸海域，其中以增温 1℃ 时，表、底层 10% 频率出现的面积最大，80% 频率出现的增温面积最小。

3.2 温排水增温频率影响范围

远期增加温排水量后，增温面积增大主要出现在表层，表、底层海水增温 1℃ 的 10% 频率面积几乎

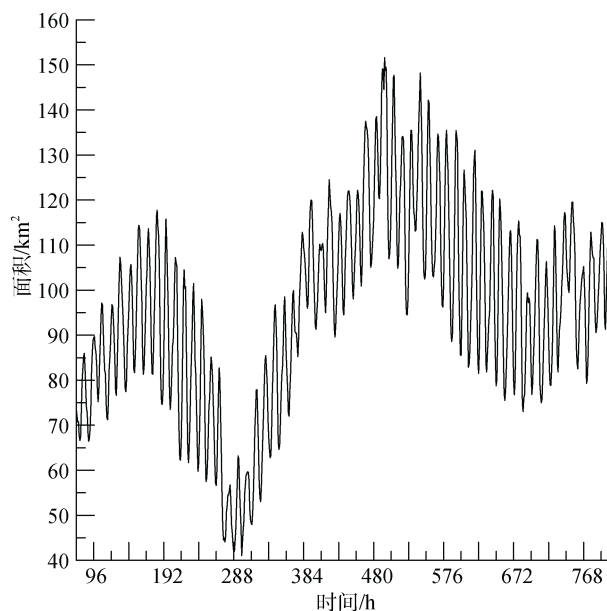


图 8 表层升温 1℃ 面积分布

Fig.8 Distribution of area with surface temperature increasing 1°C at different time points

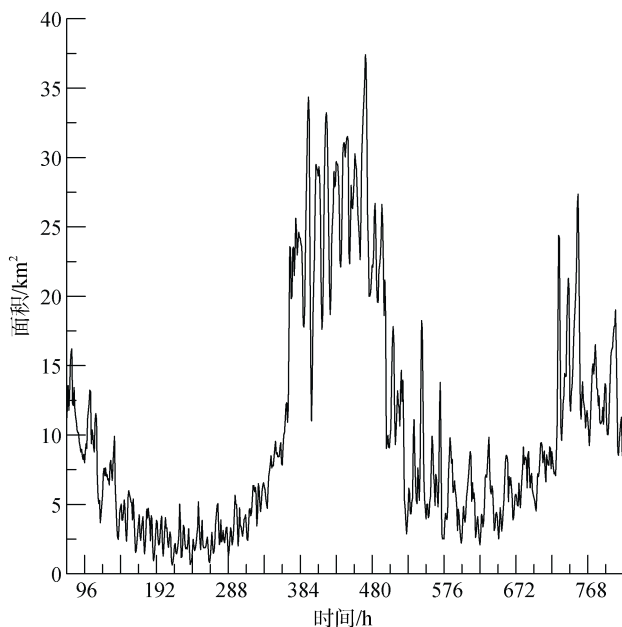


图9 表层升温 2°C 面积分布

Fig. 9 Distribution of area with surface temperature increasing 2°C at different time points

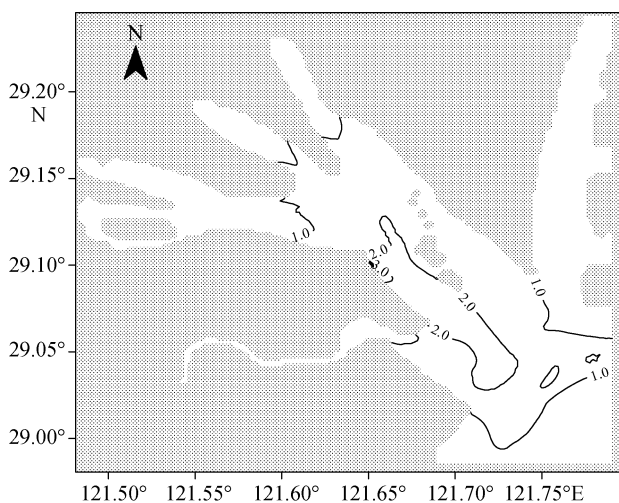


图10 表层升温 1°C 最大面积分布

Fig. 10 Distribution of maximum area with surface temperature increasing 1°C

表3 表、底层各增温等级极值面积

Tab. 3 The maximum and minimum areas of surface and bottom layers in different temperature increasing grades

增温等级(°C)	表层面积(km ²)		底层面积(km ²)	
	最大值	最小值	最大值	最小值
1	151.633	41.056	141.250	35.598
2	37.406	0.636	34.559	0.402
3	6.497	0.067	3.315	0.033
4	1.373	0.033	0.670	0.033

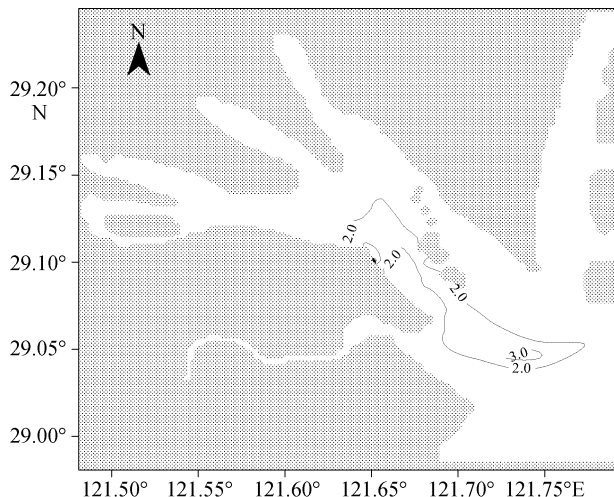


图11 表层升温 2°C 最大面积分布

Fig. 11 Distribution of maximum area with surface temperature increasing 2°C

占据整个三门湾(表4)。表、底层海水增温 2°C 的 10% 频率面积也较大, 3、4°C 的增温 10% 频率面积都较小。表、底层水体增温 1°C 的较大面积将产生持久稳定影响, 表、底层水体 2°C 增温也产生较大范围的影响, 其他增温水体的影响范围都较小。

表4 表、底层各增温等级频率的面积分布(km²)

Table 4 Area distribution of frequency in surface and bottom layers in different temperature increasing grades (square kilometer)

频率 (%)	表层面积				底层面积			
	1°C	2°C	3°C	4°C	1°C	2°C	3°C	4°C
10	165.030	28.866	2.980	0.636	154.480	20.294	1.641	0.402
50	92.660	2.947	0.603	0.167	87.503	1.909	0.402	0.167
80	51.170	0.502	0.201	0.067	50.467	0.435	0.167	0.067

4 结论

(1) 近期工程建设后, 在 5 月份气候状况下, 温排水进入三门湾海域将对工程附近海域温度产生增温影响, 最大增温影响在表层, 底层增温影响较小。增温 1°C 的影响范围最大, 增温 4°C 的影响范围最小。增温水体范围有较大的日变化, 1°C 增温范围的最大日变化可达 20 km²。增温水体短期侵占(频率 10%)的海域面积较大, 长期侵占(频率 80%)的海域面积较小。

(2) 远期工程建成后, 温排水量大幅增高, 在 5 月份气候状况下, 温排水对三门湾海水温度影响范围大幅增加, 其中以 1°C 增温范围增加最大, 4°C 增温

范围增加较小。增温水体面积的日变化将增大。温排水增温 1℃的水体将对三门湾内海域产生持续稳定的大范围影响。

参考文献:

- [1] 李孟国, 曹祖德. 海岸河口潮流数值模拟的研究与进展[J]. 海洋学报, 1999, 21(1): 111-125.
- [2] 唐建华, 赵升伟, 刘玮粹. 基于FVCOM的强潮海湾三维潮流数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2010, 4: 81-88.
- [3] 徐雪峰, 杨天柱. 三门湾多个围垦工程的整体影响数学模型研究[J]. 海洋学研究, 2006, 24(增刊): 49-59.
- [4] 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): 58-60.
- [5] 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.
- [6] 崔丹, 金峰. 近岸海域温排水的三维数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10): 55-59.
- [7] 苗庆生, 周良明, 邓兆青. 象山港电厂温排水的实测和数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2010, 29(4): 1-11.
- [8] 周巧菊. 大亚湾海域温排水三维数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2007, (4): 37-46.

The numerical simulation studies of the effect of increasing temperature on warmly discharged water in Sanmen bay

DING Yue-ping, GUO Yuan-ming, LI Tie-jun, XUE Bin, ZHANG Yu-rong

(Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang Province, Key Research Station for Fisheries Resources of Main Fishing Ground Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resource of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China)

Received: Mar., 3, 2014

Key words: warmly discharged water; the effect of increasing temperature; numerical simulation; Sanmen bay

Abstract: In this paper, the seawater temperature increasing effect in the Sanmen bay induced by freezing water discharged from nuclei power station was studied using ECOMSED model and the monitoring dataset of temperature, salinity and tides in May, 2012. After the accomplishment of the recent project, the range of the increasing temperature in the Sanmen bay mainly appeared near the outlet of discharged water, and the temperature increase was the largest in the surface and the least in the bottom. The temperature increasing range had the maximum and minimum changes during the monthly time. After the accomplishment of the whole project, the amount discharged water was significantly increased. The area of the surface seawater with temperature increasing 1℃ in the Sanmen bay was relatively larger, and the area with temperature increasing 4℃ was relatively smaller. During the monthly time, the changing range of the maximum and minimum temperature increasing in surface and bottom layers would also increase.

(本文编辑: 张培新)