

文章编号: 1674 - 5566(2013)02 - 0274 - 08

象山港滨海电厂温排水温升特征及影响效应研究

张惠荣^{1,2}, 赵 瀛¹, 杨 红¹, 陈炳睿³, 丁 骏¹, 戴桂香¹, 堵盘军³

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家海洋局东海分局, 上海 200137; 3. 国家海洋局 东海预报中心, 上海 200081)

摘 要: 为了定量地分析不同温升梯度的温排水对浮游植物的影响, 采用 FVCOM 三维水动力模型计算 2011 年夏季大小潮、涨落潮时期不同温升梯度温排水的分布特征、影响面积和体积, 并根据 2011 年夏季在象山港海域进行的海上围隔实验数据, 分析不同梯度温升范围内浮游植物优势种琼氏圆筛藻的损失量。研究表明, 夏季表层温排水扩散范围主要分布于 1.5 °C 温升包络线内, 底层主要分布于 1 °C 温升包络线内。弱温升区和强温升区内温排水影响海水体积分别为 $93.650 \times 10^6 \text{ m}^3$ 及 $1.073 \times 10^6 \text{ m}^3$, 总计 $94.723 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。温排水影响范围内琼氏圆筛藻的总损失量为 3.258×10^{13} cells, 弱温升区占 94.76%, 强温升只占 5.24%。

研究亮点: 结合海水水动力条件, 运用 FVCOM 数值计算方法, 估算夏季不同时期不同温升梯度温排水的温升分布特征及影响体积, 并结合 14 d 海上围隔实验监测数据, 定量地分析温升影响因子对海洋生物的影响效应。为温排水生态补偿提供数据支撑, 为滨海电厂监督和管理提供理论依据。

关键词: 滨海电厂; 温排水; 水动力; 温升特征; 琼氏圆筛藻; 影响效应

中图分类号: X 703

文献标志码: A

近年来, 随着国民经济的持续发展, 人们对电力的需求急剧上升, 沿海电力能源进一步紧张。为了充分满足电厂对冷却水的大量需求, 越来越多的大型滨海热(核)电厂逐渐建成并投产发电, 以充分利用海水资源作为电厂冷却水^[1]。在电厂运行的过程中, 冷却水携带大量的废热排入周围海域, 形成温排水。温排水具有水量大、热量大的特点。温排水从排水口排出后随海水扩散至周围海域, 其热污染的影响范围相对于余氯等其它影响因子更为广泛。有研究表明, 一般情况下温排水比附近海域海水温度高 7 °C ~ 10 °C^[2]。温排水造成滨海电厂周围海域水温异常升高, 夏季可能致使许多海洋生物死亡, 冬季水温环境改变可能导致海洋生物种类和群落结构发生变化^[3]。目前, 滨海电厂温排水排放导致的生态环境影响问题已日益受到关注, 国内外有关该领域的研究主要包括^[4]: 根据现场调查及实测

资料, 分析电厂温排水排放致使周围海域生物资源的损失情况^[5-6]; 采用数值模拟的方法估算不同温升梯度温排水在周围海域引起的温升水域面积和范围^[7]; 在计算温排水温升面积的基础上, 定性分析温排水对海洋环境和生态环境的影响^[8]。但是, 这些定性研究尚不足以支撑对滨海电厂温排水的监视和管理。因此, 定量地分析滨海电厂温排水对海洋生态环境的影响, 为温排水生态补偿提供数据支撑, 为有关部门对滨海电厂监管提供理论依据, 具有十分重要的意义。

象山港位于浙江省北部沿海, 宁波市东南部, 穿山半岛与象山半岛之间^[9]。研究海域位于浙江象山港西部某滨海电厂排水口周边。主要结合水动力条件研究温排水扩散产生的温升效应, 并结合海上围隔实验监测数据, 定量地评估电厂温排水对浮游植物的影响情况。

收稿日期: 2012-05-23 修回日期: 2012-07-05

基金项目: 科技部海洋公益性行业科研专项资金项目(200905010-10)

作者简介: 张惠荣(1952—), 男, 博士生导师, 研究方向为海洋水文、海洋管理。E-mail: zhr@ castsea. gov. cn

通信作者: 杨 红, E-mail: hyang@ shou. edu. cn

1 材料与方方法

1.1 现场调查站位及监测项目

2011 年夏季在象山港电厂近岸海域进行海上围隔实验。按照实验前期调查结果将研究区域划分为实验区和对照区,实验区分为 0.2 °C 温升区和 0.1 °C 温升区,分别布设 M1 和 M2 两个站位。M1 距电厂排水口较近位于 0.2 °C 温升区内,M2 站位次之位于 0.1 °C 温升区内,M3 位于对照区,相对 M1 和 M2 站位距排水口较远(图 1)。

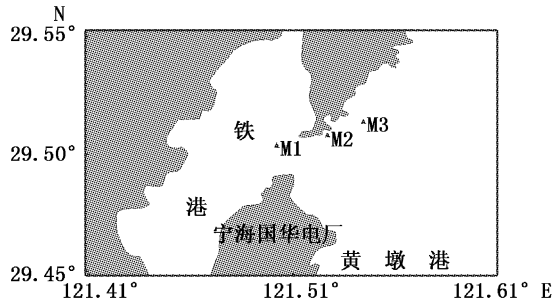


图 1 象山港电厂附近海域围隔站位分布示意图

Fig. 1 Enclosure experiment stations nearby power plant in Xiangshan Bay

实验对海水透明度、海水水温、浮游植物优势种生物量等项目进行监测。表层海水水温使用表面温度计测定,生物样采用沉降浓缩计数法测定水采样品,生物量鉴定采用 Nikon 80I 高级荧光相差显微镜进行镜检。所有监测和实验均按照《海洋调查规范(GB/T 12763.4—2007)》^[10]和《海洋监测规范(GB 17378.7—2007)》^[11]执行。

1.2 水动力模型数值计算方法

采用 FVCOM 数值模拟方法计算 2011 年夏季大小潮时期、涨落潮时刻电厂附近海域温排水温升包络线范围。

FVCOM 是基于有限体积法的无结构三维网格数值模式,采用该模型网格可方便地在电厂附近局部加密,可较好地拟合象山港海区的复杂岸线和岛屿^[12],并可以实现细致地刻画温升的扩散范围。

FVCOM 模式基于 σ 坐标系下的海洋控制方程组^[13]。其中 σ 坐标定义如下:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H + \zeta} = \frac{z - \zeta}{D},$$

连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0,$$

运动方程:

$$\frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} -$$

$$\frac{gD}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' \right) + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial x} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + DF_x,$$

$$\frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} -$$

$$\frac{gD}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' \right) + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial y} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + DF_y,$$

热量方程:

$$\frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta u D}{\partial x} + \frac{\partial \theta v D}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_h \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right) + D$$

$$\hat{H} + DF_{\theta},$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SuD}{\partial x} + \frac{\partial SvD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) +$$

$$DF_s, \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial q^2 u D}{\partial x} + \frac{\partial q^2 v D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 \omega}{\partial \sigma} = 2D(P_s + P_b +$$

$$\varepsilon) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) + DF_q,$$

$$\frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial q^2 l u D}{\partial x} + \frac{\partial q^2 l v D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 l \omega}{\partial \sigma} = l E_l D$$

$$\left(P_s + P_b - \frac{\tilde{W}}{E_l} \varepsilon \right) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_q \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right) + DF_l,$$

$$\rho = \rho(\theta, s),$$

边界条件:海表 $\sigma = 0$ 处:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{D}{\rho_0 K_m} (\tau_{sx}, \tau_{sy}), \omega = 0, \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} = \frac{D}{\rho c_p K_h}$$

$$[Q_n(x, y, t) - SW(x, y, 0, t)],$$

$$\frac{\partial s}{\partial \sigma} = \frac{s(P - E)D}{K_h}, q^2 l = 0, q^2 = B_l^2 u_{rs}^2,$$

海底 $\sigma = -1$ 处:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{D}{\rho_0 K_m} (\tau_{sx}, \tau_{sy}), \omega = 0, \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} = \frac{\partial s}{\partial \sigma} =$$

$$0, q^2 l = 0, q^2 = B_l^2 u_{rb}^2.$$

式中:在直角坐标系中 x, y, z 分别表示东,北和竖直坐标轴; u, v, w 是 x, y, z 方向的速度分量; T 为温度; S 为盐度; ρ 为密度; P 为压强; f 为科氏参量; g 为重力加速度; K_m 为垂直粘性系数; K_h 为热量垂直扩散系数; F_u, F_v, F_T 和 F_s 代表水平动量,热量和盐度的扩散项; $Q_n(x, y, t)$ 为表面净热量通量; $SW(x, y, 0, t)$ 为海表面的短波通量; c_p 为海水比热; A_H 为水平热量扩散系数; A_m 和 A_n 分别为水平旋转和热扩散系数^[13]。

初始条件:根据该电厂工况,计算中设置温排水量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据象山港夏季特征风设置南风为 4 m/s 。根据多年历史调查资料以及围隔实验本底调查结果,模式中盐度初始场取 25 均匀场。

模式的外模时间步长 0.1 s ,内模时间步长 1 s 。外海开边界给出了 16 个分潮(M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1、MU2、NU2、T2、L2、2N2、J1、M1、OO1)的调和常数以计算开边界水位。

热通量计算方法采用叶乐安和李凤岐的《物

理海洋学》中介绍的方法,太阳辐射的计算过程中体现了昼夜和季节变化。根据象山港海域历史实测资料设定部分系数的取值,模式热通量系数中夏季相对湿度 f 取 0.85 ,气温设为 $27.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

模式采用的网格范围包括了象山港及其外部海域,水位开边界位置避开了海岛以防止边界效应(图 2)。在象山港海域作了局部加密,国华电厂附近的网格密度尤其高(图 2),最小网格的边长约 15 m 。

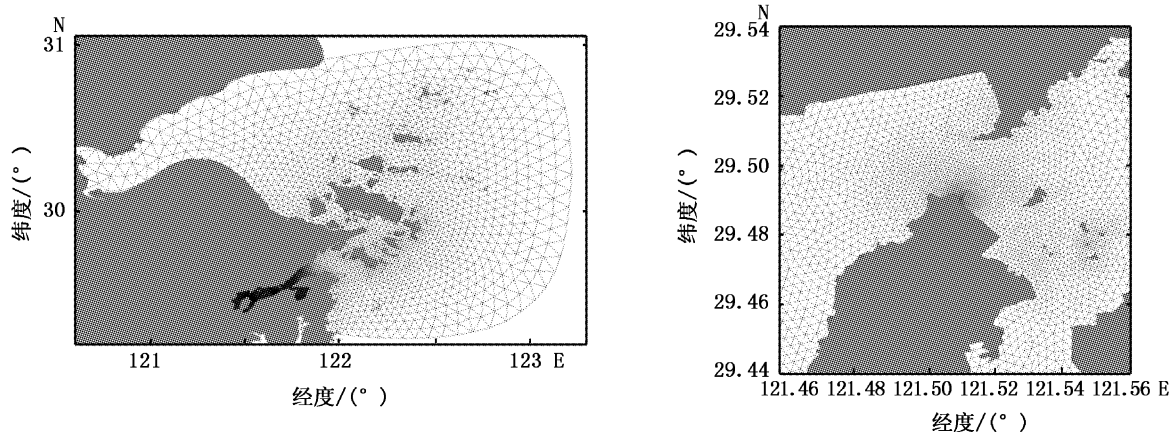


图 2 模式的网格及电厂附近的网格

Fig. 2 The grid of the module and the grid around the power plant

1.3 海水真光层深度及温排水影响体积估算方法

浮游植物(phytoplankton)是指在水中浮游生活的微小植物悬浮在水层中常随水流移动。浮游植物的平面分布主要与温度、盐度、海流、海域风力、湍流和营养盐等有关,由于进行光合作用,其垂直方向仅存在于海洋有光照的真光层。本研究采取经验算法^[14],通过透明度估算真光层的深度,计算公式如下:

$$Z = 3.05S_d$$

式中: Z 为真光层的深度, S_d 为透明度。

根据 2011 年夏季围隔实验 M1 ~ M3 3 个站位连续 7 d 测得的海水透明度数据,估算研究区域真光层的平均深度。从而根据数值计算所得的温排水影响面积和真光层深度估算受滨海电厂温排水影响的海水体积。

2 结果与分析

2.1 模型验证结果

2.1.1 流速流向验证

采用 2011 年夏季在象山港电厂附近海域进

行的围隔实验中的 M1 站位(图 1)连续 26 h 的观测数据对流速流向进行验证(图 3)。计算得到的连续 48 h 内的表层流速大于底层,表层和底层流速每天均随涨、落潮呈现出两增两减的趋势,只是底层的最大最小流速之差较表层较小。而计算得到同一时间的表、底层流向基本相同,且流向均随涨落潮的变化而变化。

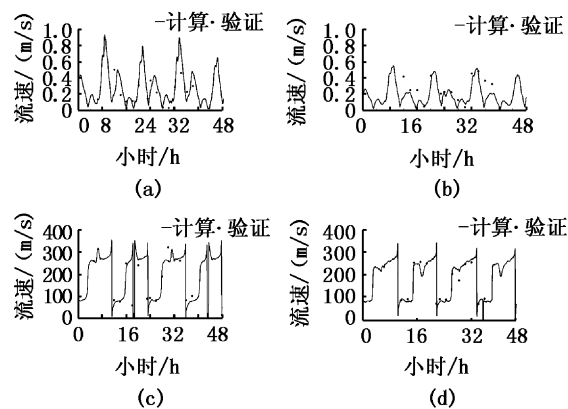


图 3 M1 观测站大潮时期流速、流向验证结果

Fig. 3 The verification of flow velocity and direction of site M1 during spring tide

(a). 表层流速;(b). 底层流速;(c). 表层流向;(d). 底层流向。

验证结果显示,表层流速和流向计算结果与实测的结果基本相符,且表现出了实际情况的变化趋势,只是表层流速随时间的变化比实测值略有滞后。底层流向的计算结果与实测值基本完全相符,而流速的计算值比个别实测值略为偏大。

2.1.2 水温验证

采用2011年夏季大潮期间围隔实验M1站连续26h监测的水温数据进行模式的水温验证。

计算的48h表层和底层水温随每日时间变化呈现出增减变化趋势(图4)。验证结果表明,表层水温模拟结果比实测数据偏高,但符合水温的实际变化趋势;底层水温模拟结果与实测数据基本相符,二者变化趋势相同。

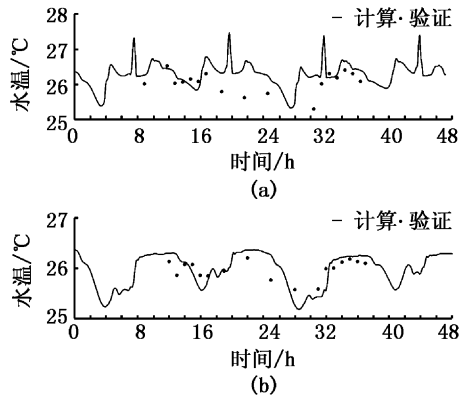


图4 M1 站位连续26 h 水温验证结果

Fig.4 The calibration results of flow velocity and direction in site M1 last 26 hours

(a). 表层水温;(b). 底层水温。

2.2 象山港电厂温排水温升分布

研究海域温升场估算主要根据模拟温排水在给定工况条件下持续排放期间大、小潮期,涨、落潮时的特征温度场与没有温排水排放时该海域相应时刻的温度场的差值求得。

2.2.1 大潮时期的温升分布

象山港海域夏季大潮涨急时刻,电厂温排水造成附近海域温升分布情况表明(图5):在海水表层,由于涨急时刻海水由港外向港内流动,故使得表层温度扩散方向趋向于港内。由于电厂排水口方式采取直排式,落潮时裸露在海水表面,涨潮时淹没于海水表层,在近排水口海域表层存在近半平方公里温升为2~4℃的水体。表层温升分布还可以看出涨潮流对温排水扩散的影响和冲击。而在海水底层,由于温排水同时存在水平扩散和垂直交换,故底层温升小于表层,且底层潮流对温排水扩散的冲击更为明显。底层的温升主要分布于铁港,而温升相对于电厂排水口附近更高。对比分析,表、底层0.8~1.0℃温升包络线的范围比较接近,且扩散趋势相同,主要分布于铁港,但电厂排水口附近海域表层温升主要在2℃以上且包络线范围较广,底层温升仅在1℃以内且面积较小,表层温升和影响范围均大于底层。

夏季大潮落急时刻的温升包络线分布情况表明(图5):在海水表层,由于落急时刻海水由港内向港外流动,使得表层温度扩散方向趋向于港外。在近排水口海域存在温升为2~4℃,及4℃以上的水体,0.8~1.5℃温升包络线的影响范

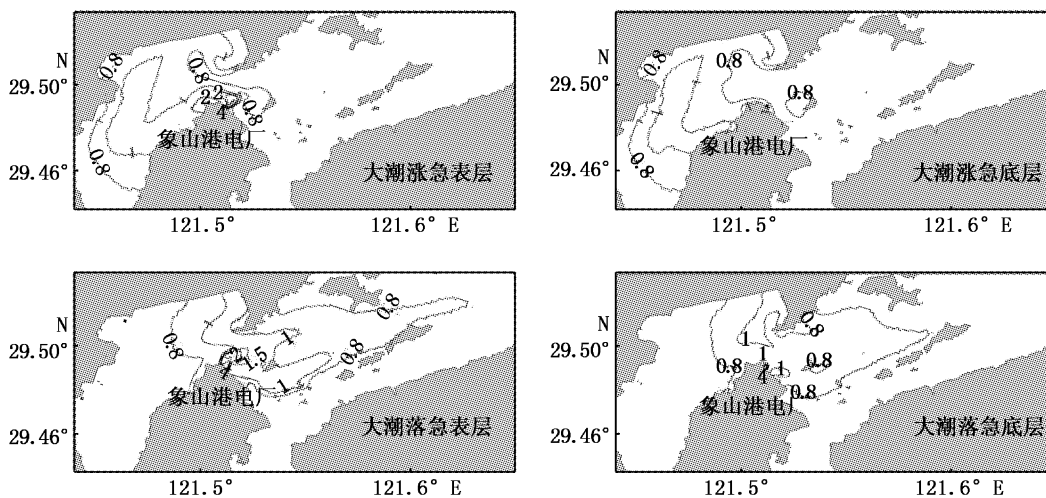


图5 夏季大潮时期温升分布

Fig.5 Temperature rise distribution in spring tide in summer

围分布十分广泛。而底层高于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升的水体影响范围相对于表层很小, $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升包络线的影响范围也很大。对比分析, 由于海水表层流速大于底层, 表层 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升包络线比底层向港外的扩散更远, 向港内的扩散范围表、底层相同, $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升包络线表层范围远大于底层, $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上温升主要分布于表层。温排水整体影响范围表层大于底层, 但二者的扩散趋势基本一致。

2.2.2 小潮时期的温升分布

小潮涨急时刻温升分布情况表明(图6): 表层 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升包络线分布范围较广, $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上包络线范围较底层也更为广泛。底层由于受到潮流的冲击, $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升包络线范

围明显小于表层, 电厂排水口附近底层强温升范围较小。对比分析, 表层温升和影响范围均大于底层, 表层和底层 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升包络线分布有明显差异, 表层向港内和港外均有扩散, 而底层主要向港内方向。

小潮落急时刻温升分布情况表明(图6): 表(底)层温升分布异同性也与大潮落急时刻表(底)层的温升分布相近。对比分析, 表层 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 向港内方向表层和底层相近, 向港外方向表层扩散范围比底层更远。表层 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升包络线向港外的扩散范围也较底层更远。 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温升包络线主要分布在表层且趋向于港外方向, 底层 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温升包络线面积很小。

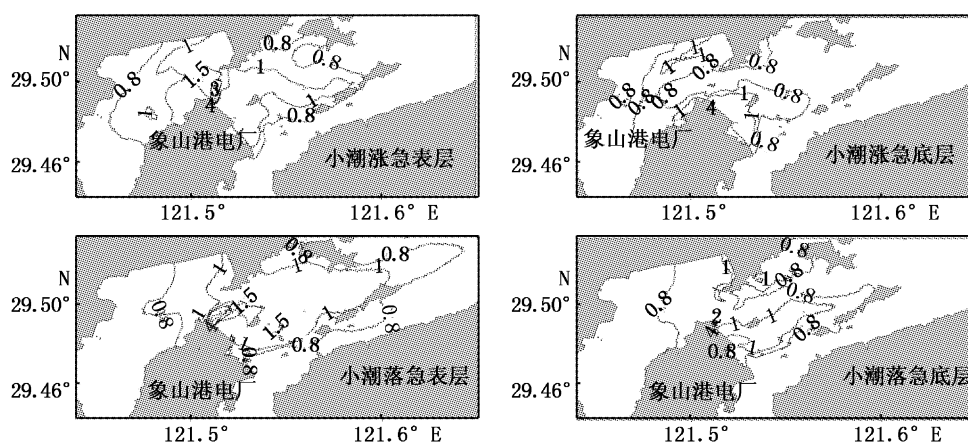


图6 夏季小潮时期温升分布

Fig.6 Temperature rise distribution in neap tide in summer

2.2.3 大、小潮时期的温升分布对比分析

根据图5和图6对比分析, 相对于大潮, 一方面由于小潮时期的水位较低, 容纳温排水的海水体积也相对较小, 另一方面小潮时期的海水流速比大潮时的流速缓慢, 使得潮水对温排水的混合和影响相对较小。因此表现为小潮涨急时刻海水表层 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高幅度温升包络线所包含的范围大于大潮涨急时刻, 同时小潮涨急时刻表层的温排扩散范围大于大潮同一时刻。小潮涨急时刻的温升分布相对于大潮更靠近电厂周边海域。

小潮落急时刻海水表层 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高幅度温升包络线包含的范围大于大潮落急时刻。同时表现为小潮落急时刻各温升梯度包络线的影响范围大于大潮同一时刻, 这一现象表层更为显著。

2.3 象山港电厂温排水温升影响面积和体积估算

2.3.1 温排水温升影响面积估算

依据数值计算结果及海上围隔实验不同温升梯度与浮游植物生物量的响应关系, 将温升划分为弱温升区(包含 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升包络线)和强温升区(包含 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温升包络线), 估算2011年夏季象山港电厂不同梯度温升温排水的影响面积: 表层弱温升区和强增温区温排水大小潮、涨落潮时影响面积的平均值分别为 42.567 km^2 和 0.487 km^2 , 总计 43.055 km^2 ; 底层平均值分别为 30.100 km^2 及 0.018 km^2 , 总计 30.118 km^2 。所得结论与王明才等^[15]关于某滨海核电厂温排

水三维数值模拟研究中所计算出的结果:三维模型 4 °C 表层温升面积约为 0.02 ~ 0.05 km², 1 °C 表层温升面积约为 4 ~ 9 km², 0.5 °C 表层温升面积约为 19 ~ 29 km² 较为吻合。而李静晶^[16]在关于某核电厂温排水混合区边缘的温升限值研究中的结果表明:温升超过 1.0 °C 的面积为 2.75 km², 由于其研究中排放口的温升为 4.40 °C, 故其温升范围相对本研究结果较小。综合分析本文研究结果还表明(图 7):表层温升水域面积主

要分布在 1.5 °C 温升包络线内;底层的温升水域面积主要分布在 1 °C 温升包络线内;0.8 ~ 1 °C 温升包络线范围内,底层面积接近于表层, 1 °C 以上温升水域面积底层均远小于表层,相差基本接近一个数量级(10⁻¹);在表层,对于同一温升范围,大潮期间落急时刻的温扩面积大于涨急时刻的温扩面积;小潮亦是如此;小潮时期,同一时刻,同一温升包络线包含的面积大于大潮时期。

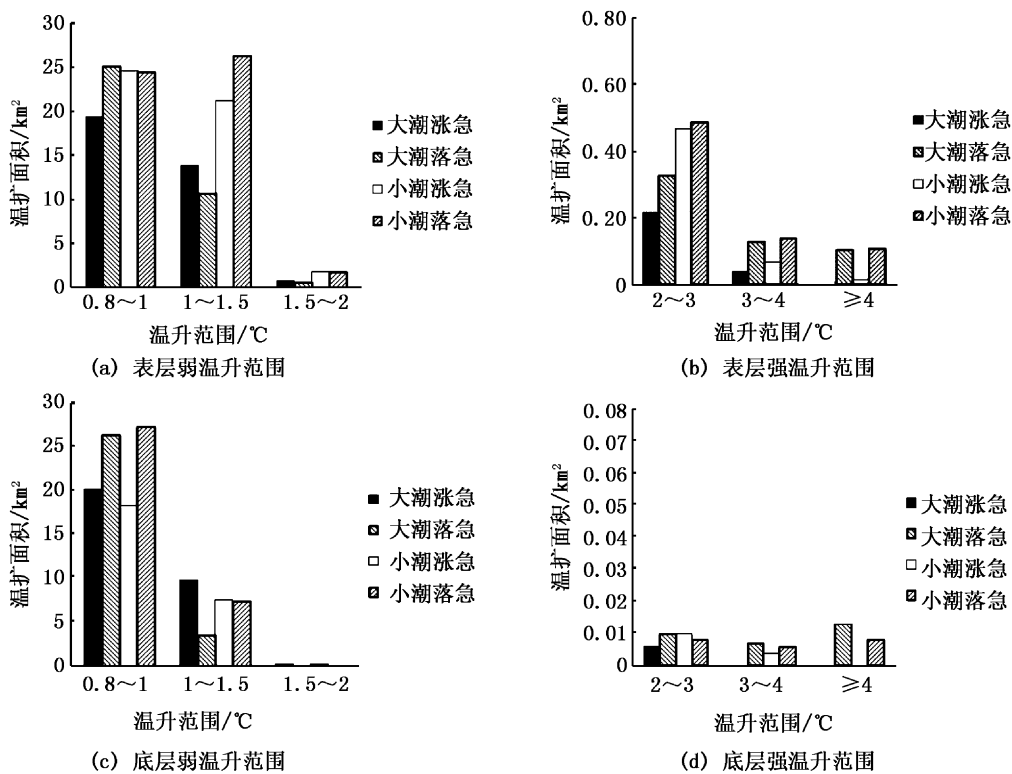


图 7 夏季大、小潮不同温升包络线的区域面积

Fig. 7 The area of different thermal discharge envelope in spring tide and neap tide in summer

2.3.2 温排水温升影响体积估算

根据前文所述方法,估算得到研究区域真光层的平均深度约为 2.2 m。计算得到的夏季大小潮、涨落潮时受电厂温排水影响的弱温升区和强温升区内温排水影响海水体积分别为 $93.650 \times 10^6 \text{ m}^3$ 及 $1.073 \times 10^6 \text{ m}^3$, 总计 $94.723 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

2.4 温排水温升对琼氏圆筛藻生物量损失分析

根据多年历史调查资料以及围隔实验本底调查结果,选取象山港浮游植物优势种琼氏圆筛藻作为实验研究对象。运用 SPSS 19.0 统计分析方法,结合 26 组围隔实验监测数据,对温升与琼

氏圆筛藻生物量变化的响应关系进行统计分析,数据样本均通过单个样本检验,曲线拟合分析结果为:温升在 0.02 ~ 0.79 °C 之间(模型 1),有利于琼氏圆筛藻的生长,即呈正相关,本文不进行赘述;温升在 0.80 ~ 2.00 °C 之间(模型 2),不利于琼氏圆筛藻的生长,即呈负相关,响应关系式如下:

$$\Delta N = -119.86 \times \ln(\Delta T) - 26.80$$

式中: ΔN 为琼氏圆筛藻的生物量变化 ($\times 10^4 / \text{m}^3$); ΔT 为水温变化 (°C)。模型 2 的统计分析数据结果如表 1 所示。

表1 统计分析结果

Tab.1 Results of statistics analysis

模型汇总					
df	R	R ²	调整 R ²	估计值的标准误	Sig.
13	0.853	0.727	0.672	2.169	0.010

注:自变量为温度。

计算得到水温升高 1.0 °C, 琼氏圆筛藻的生物量减少 $26.80 \times 10^4 / \text{m}^3$, 减少了 6.38%; 水温升高 1.5 °C, 琼氏圆筛藻的生物量减少 $75.399 \times 10^4 / \text{m}^3$, 减少了 17.95%; 水温升高 2.0 °C, 琼氏圆筛藻的生物量减少 $109.810 \times 10^4 / \text{m}^3$, 减少了 26.17%。所得结论与杜晓明等^[17]于 1992 年研究所得结论相近。他们发现, 当水温适中时, 弱增温可以促进藻类的生长, 而强增温可能抑制藻类的生长。而贝利纳^[18]的研究结果表明, 随着温升幅度的增大, 抑制作用更强, 本文的研究结果也印证了这一点。黄世玉和林均民^[19]进行的琼氏圆筛藻细胞分裂的光温效应研究中也得出相似结论: 琼氏圆筛藻在 22 °C 与 27 °C 下种群增殖率具有明显的差别。说明该藻细胞分裂的温度效应最为明显。

海上围隔实验的设计温升在 2 °C 以下, 数值计算结果包含 2 °C 以上的温升影响范围。根据上述响应关系式, 推算 2 °C 以上强温升与生物量的关系, 估算得到水温升高 3 °C, 生物量减少 $158.48 \times 10^4 / \text{m}^3$, 减少了 37.73%; 水温升高 4 °C 及以上, 生物量平均减少 $241.56 \times 10^4 / \text{m}^3$, 减少了 57.51%。

据此, 估算出滨海电厂周围海域温排水排放导致弱温升区和强温升区域琼氏圆筛藻总损失量分别为 3.087×10^{13} 和 0.171×10^{13} , 总计 3.258×10^{13} 。可以看出, 浮游植物的损失量与温排水扩散的海水体积及海域温升幅度均有密切关系。由于弱温升区分布范围较广, 在此范围内浮游植物损失量占总损失量的 94.76%, 而虽然强增温对浮游植物影响较大, 但是由于分布面积较小, 强温升区域内只占生物损失总量的 5.24%。

3 结论

根据数值计算结果, 考虑温排水受到潮汐和潮流的作用, 计算得到夏季大小潮时期、涨落潮时刻不同温升梯度温排水对周围海域造成的影响包括: (1) 表层温排水扩散范围主要分布在 1.5

°C 温升包络线内, 底层主要分布在 1°C 温升包络线内。表、底层 0.8 ~ 1 °C 温升包络线面积较接近, 1 °C 以上温升水域面积底层均远小于表层, 相差基本接近一个数量级。在表层, 对于同一温升范围, 大潮期间落急时刻的温扩面积大于涨急时刻的温扩面积; 小潮亦是如此。小潮时期, 同一时刻, 同一温升包络线包含的面积大于大潮时期。(2) 表层弱温升区和强增温区温排水大小潮、涨落潮时影响面积的平均值分别为 42.567 km² 和 0.487 km², 总计 43.055 km²; 底层平均值分别为 30.100 km² 及 0.018 km², 总计 30.118 km²。弱温升区和强温升区内温排水影响海水体积分别为 $93.650 \times 10^6 \text{ m}^3$ 及 $1.073 \times 10^6 \text{ m}^3$, 总计 $94.723 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。(3) 估算出滨海电厂周围海域温排水导致琼氏圆筛藻总损失量为 3.258×10^{13} , 弱温升区占 94.76%, 强温升只占 5.24%。

本研究中海上围隔实验设计温升范围在 2 °C 以下, 而数值计算结果包括 2 °C 以上的温升影响范围, 今后的研究中可以适当补充室内实验对 2 °C 以上的温升影响进行分析。还可以本研究为例, 增加浮游动物、底栖生物以及种群结构等生物指标作为研究对象对滨海电厂温排水影响进行进一步研究。对于水动力数值计算的结果分析中, 本文仅估算了电厂温排水造成的周围海域表层和底层的分布及扩散面积。今后可以运用模式分层计算的优势, 估算温排水在整个海区所影响的海水体积。这样, 浮游植物损失量的估算也会更加准确。此外, 滨海电厂温排水对海域生态环境的影响除热污染外, 还包括余氯、机械卷载和核素等, 本研究主要针对影响海域范围最为广泛的热污染进行分析, 若考虑余氯等其它因子对浮游植物的影响, 则总的损害影响效应还会加剧。

参考文献:

- [1] 徐晓群, 曾江宁, 曾淦宁, 等. 滨海电厂温排水对浮游动物分布的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(6): 933 - 939.
- [2] 王丽霞. 热扩散预测方法研究概况: I 影响海洋水温的因素[J]. 海洋科学, 1997(5): 24 - 28.
- [3] 李静晶, 张永兴. 核电厂温排水混合区边缘的温升限值研究——以某核电厂为例[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 414 - 417.
- [4] 金腊华, 黄报远, 刘慧璇, 等. 湛江电厂对周围水域生态的影响分析[J]. 生态科学, 2003, 22(2): 165 - 167.

- [5] 林昭进. 大亚湾核电站温排水对邻近水域鱼卵,仔鱼的影响[J]. 热带海洋, 2000, 19(1): 44-51.
- [6] 潘明祥. 核电站冷却水系统对渔业资源影响评估的建模[J]. 海洋通报, 2000, 19(5):41-46.
- [7] 孙秀敏. 热电厂温排水排海环境影响预测方法及应用[J]. 辽宁城乡环境科技, 2001, 21(1): 30-31.
- [8] 王极刚. 华能丹东发电厂温排水和灰水对近海海域水环境的影响[J]. 辽宁城乡环境科技, 1998, 18(6): 52-58.
- [9] 范红英. 中国海湾志(第五册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 海洋调查规范第4部分: 海水化学要素调查[S]. GB/T12763.4-2007. 北京,2007: 7-29.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 海洋监测规范第7部分: 近海污染生态调查和生物监测[S]. GB 17378.7-2007. 北京,2007: 3-24.
- [12] 王坚红, 耿姗姗, 苗春生, 等. 近海水动力要素对入侵台风响应的FVCOM数值模拟研究[J]. 气象科学, 2011, 31(6): 694-703.
- [13] CHEN C S, ROBERT C. Beardsley and Geoffrey Cowles. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model FVCOM user manual[M]. FVCOM User Manual, SMAST/UMASSD-06-0602, 2006.
- [14] 沈国英, 施并章. 海洋生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [15] 王明才, 倪培桐, 张晓艳. 某滨海核电站温排水三维数值模拟[J]. 广东水利水电, 2011(6): 1-4.
- [16] 李静晶, 张永兴, 刘永叶, 等. 核电站温排水混合区边缘的温升限值研究——以某核电站为例[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 414-417.
- [17] 杜晓明, 刘厚田, 沈英娃, 等. 水体增温对浮游植物群落结构及其生态特性影响的研究[J]. 环境科学研究, 1992, 59(3): 35-41.
- [18] И. Л. 贝利纳. 增温对浮游植物发育和光合作用影响的实验研究[J]. 国外环境科学与技术, 1985(4): 6-13.
- [19] 黄世玉, 林均民. 琼氏圆筛藻细胞分裂的光温效应[J]. 集美大学学报, 1998, 3(3): 126-131.

Study on the temperature rise characteristics and influence effects of thermal discharge from coastal power plant in Xiangshan Bay

ZHANG Hui-rong^{1,2}, ZHAO Ying¹, YANG Hong¹, CHEN Bing-rui³, DING Jun¹, DAI Gui-xiang¹, DU Pan-jun³

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. East China Sea Branch, State Oceanic Administration People's Republic of China, Shanghai 200137, China; 3. East China Sea marine Forecasting center of state oceanic administration, State Oceanic Administration People's Republic of China, Shanghai 200081, China)

Abstract: In order to quantitatively analyse the impact of thermal discharge on *Coscinodiscus Jonesianus* biomass at different temperature rise gradient. A three-dimensional hydrodynamic model was set up to simulate the distribution characteristics, impact area and volume of thermal discharge at different temperature gradient in the summer of 2011 with FVCOM model, and based on the experiment data of enclosure experiments in Xiangshan Bay in summer of 2011, the losses of *Coscinodiscus Jonesianus* biomass at different temperature gradient ranges were analysed. The results showed that the surface temperature rise range in summer was mainly distributed within the envelope of 1.5 centigrade temperature rise, while the bottom one was within the envelope of 1.0 centigrade temperature rise. The seawater volume affected by weak temperature rise zone and strong temperature rise zone were 93.650 million m³ and 1.073 million m³ respectively, with a total of 94.723 million m³. The total losses of *Coscinodiscus Jonesianus* biomass influenced by the thermal discharge were 32.580 trillion cells, and the weak temperature rise zone accounted for 94.76 percent, while the strong temperature rise zone was only 5.24 percent.

Key words: coastal power plant; thermal discharge; hydrodynamic; temperature rise characteristics; *Coscinodiscus Jonesianus*; influence effects