

# 水温和余氯对黑棘鲷仔鱼存活的影响

晁敏, 王云龙, 沈新强

(中国水产科学研究院 东海水产研究所 农业部海洋和河口渔业重点开放实验室, 上海 200090)

**摘要:** 采用静水试验法, 模拟研究了电厂温排水排放导致的海水升温 and 余氯残留对黑棘鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*) 存活的影响。试验水温设 4 个梯度: 18、22、26、30℃, 余氯设 6 个浓度水平: 0.025、0.05、0.1、0.2、0.4、0.8 mg/L, 同时以过滤海水为对照组, 每一个水温条件下的余氯浓度均设 3 个平行样本, 取黑棘鲷初孵仔鱼进行试验, 试验共进行 96 h 观测。试验结果表明, 当水温升高至 30℃ 时, 对仔鱼的存活会产生显著性影响, 24 h 的死亡率为 23.4%, 48 h 的死亡率骤升至 98%, 而 18、22、26℃ 3 组 96 h 时死亡率均未超过 10%。24 h 时 4 种水温条件下余氯对黑棘鲷仔鱼的 LC<sub>50</sub> 值分别为 0.816、0.460、0.433、0.319 mg/L, 可见水温升高会增强余氯对仔鱼的致死效应, 而随着时间延长, 余氯对仔鱼的 LC<sub>50</sub> 值进一步降低, 至 96 h, 其值分别为 0.242、0.211、0.140、<0.025 mg/L。广义相加模型分析结果显示, 水温由 26℃ 升至 30℃ 时, 或当余氯浓度高于 0.2 mg/L 时, 或暴露时间超过 48 h, 均会对黑棘鲷初孵仔鱼产生明显致死效应, 双因素方差分析结果显示, 水温、余氯、暴露时间对仔鱼死亡率具有显著性影响 ( $P < 0.05$ ), 且水温-余氯、水温-暴露时间之间具有显著性交互作用 ( $P < 0.05$ )。

**关键词:** 黑棘鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*); 余氯; 水温; 广义相加模型; 双因素方差分析

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)12-0048-08

近年建在河口或沿海地区的滨海电厂不断增加, 电厂运营在保障海岸带地区经济发展的同时, 其冷却水系统的取排水对海区生态环境和资源生物也带来了较大的负面影响<sup>[1]</sup>, 比较直观的影响为急性热冲击和卷载效应<sup>[2-4]</sup>, 而经冷却系统加温的海水排入海域后同样具有环境效应<sup>[5-6]</sup>, 据研究, 电机容量为 1800~2000MW 机组的温排水可使出水口水温升高 8~12℃, 而为防止污损生物对冷却系统的阻塞, 氯制剂广泛应用于电厂冷却水系统, 导致排水口氯的残留浓度可达 0.1~0.2 mg/L<sup>[7]</sup>, 有时可达 0.42~1.0 mg/L<sup>[8]</sup>, 因此电厂温排水同时具有温度升高和余氯残留两个特点。

从 20 世纪 50 年代以来, 国外研究者就对海水中残留余氯的生态效应开展了大量研究<sup>[9-12]</sup>, 中国自 80 年代以来也开展了相关影响研究<sup>[13-15]</sup>。国际上已有余氯标准颁布, 如美国 EPA 水质标准规定水中总余氯的标准限值为 0.01 mg/L, 而欧洲标准更低, 为 0.005 mg/L, 国内尹伊伟<sup>[14]</sup>早在 1992 年就曾撰文推荐 0.01 mg/L 的标准限值, 然而至今中国还未制订温排水中余氯排放限值标准。

鱼类在胚胎发育及仔鱼期容易受到水温<sup>[16-17]</sup>及

污染物<sup>[18-20]</sup>的影响, 而中国目前关于水温和余氯双因素对海水鱼类胚胎发育和仔鱼期影响的研究还较少<sup>[21]</sup>, 本研究以黑棘鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*) (旧称黑鲷 (*Sparus macrocephalus*)) 的前期仔鱼为对象, 分析温度、余氯及两种因子交互作用对仔鱼存活率的影响, 黑棘鲷具有适温适盐性广、食谱杂、抗病能力较强、生长迅速等生理和生态特点, 在中国东南沿海属经济鱼种, 因此是一种比较理想的试验动物<sup>[22]</sup>, 本研究可望为中国将来制订沿海电厂温排水温度和残留余氯浓度限值提供基础数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方法

试验在江苏省海洋水产研究所启东海水增殖养殖基地进行。试验用海水取自基地, 经 0.45 μm 醋酸纤

收稿日期: 2010-11-22; 修回日期: 2011-05-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(2010CB429005); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(中国水产科学研究院东海水产研究所, 2007M02)

作者简介: 晁敏(1975-), 男, 山东济宁人, 副研究员, 博士, 主要从事海洋与河口生态学研究, 电话: 021-65684690-8132, E-mail: chaomin1011@hotmail.com

维素滤膜过滤,煮沸、曝气 24 h 后备用。取安替福民即次氯酸钠(分析纯)配制余氯母液,由于该母液中氯属游离态氯,在光作用下易于降解,需避光保存。

试验设 4 个水温条件: 18、22、26、30℃, 其中 18℃ 为室温条件下水温, 后 3 个水温条件由水浴控温; 每个水温条件下设 0.025、0.05、0.10、0.20、0.40、0.80 mg/L 总计 6 个余氯浓度水平, 并以过滤海水为试验对照, 每个浓度设 3 个平行试验组。试验开始前各组预先调节好水温, 加入余氯母液。

以刚孵化出 1 d 的黑棘鲷前期仔鱼为试验生物, 用吸管挑取前期仔鱼 20~30 只置于已调节好水温、余氯浓度的 400 mL 烧杯内, 并计仔鱼放入的时刻为 0, 于 24、48、72、96 h 用解剖镜观察仔鱼存活状态, 当仔鱼心脏停止跳动时判定为死亡, 试验期间投喂轮虫为仔鱼的开口饵料。

由于中国电厂冷却系统加氯方法通常采取周期性连续加氯或每天加氯 1 h 的方式<sup>[23]</sup>, 电厂温排水中余氯浓度并不是恒定不变的, 而且余氯受光照、温度等因素影响在短短几小时内可衰减至极低水平, 因此为模拟电厂温排水中余氯分布特征, 试验期间各组试验液每 12 h 全部更换, 每次海水经水温预调、加氯, 再将仔鱼转移至新的烧杯中。

## 1.2 数据处理方法

分别计算 24、48、72、96 h 仔鱼存活率, 对仔鱼存活率数据进行标准化处理, 处理方法如下:

$$P_s = 1 - \frac{\text{实验组}P}{\text{对照组}P} \times 100$$

其中  $P_s$  为黑棘鲷仔鱼标准化死亡率(以 100 计),  $P$  为各组黑棘鲷仔鱼存活率(以 100 计)。

余氯对黑棘鲷仔鱼半致死余氯浓度(LC<sub>50</sub>)计算方法参见文献[24], 采用下式在 Statistica6.0 软件中对各组数据进行曲线拟合:

$$P_s = 50 + \frac{100}{\pi} \arctg\left(\frac{x-T}{W}\right) \quad (1)$$

其中  $x$  为余氯浓度,  $T$ 、 $W$  两个参数由迭代得到, 其中  $T$  为 LC<sub>50</sub> 或 EC<sub>50</sub>,  $W$  代表曲线的曲率因为:

$$x = T + W \times \text{tg}\left(\frac{EC_t - 50}{W}\right) \quad (2)$$

当  $P_s$  为 50 时,  $x=T$ 。

采用 SPSS 统计软件比较各组死亡率是否具有显著性差异分析, 当方差齐时, 采用多重比较方差分析方法(LSD), 当  $P < 0.05$  时统计具有显著性差异

意义, 当方差不齐时, 对数据进行排秩处理, 采用 SPSS 中广义线性模型(Generalized linear model, GLM)的多元方差分析中的 SNK (Student-newman-kuels)方法<sup>[25]</sup>, 当  $P < 0.05$  时统计具有显著性差异意义。

采用广义相加模型<sup>[26]</sup>(Generalized additive model, GAM)研究仔鱼死亡率与温度、余氯、曝露时间的关系, 模型表达形式如下:

$$g = S_1 + S_2 + S_3 + error \quad (3)$$

其中:  $g$  为仔鱼死亡率的连接函数,  $S$  为光滑函数, 一般采用 3 次样条函数<sup>[27-28]</sup>, 其中  $S_1$  为水温的光滑函数,  $S_2$  为余氯的光滑函数,  $S_3$  为曝露时间的光滑函数,  $error$  为随机误差。

仔鱼死亡数据为二元属性数据, 因此死亡率可采用逻辑连接函数表示, 其数学表达式为:

$$P' = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad (4)$$

因此广义相加模型可写为:

$$P' = S_1 + S_2 + S_3 + error \quad (5)$$

其中,  $error$  为随机误差。

然而, 为更有效地分析各因素间的交互作用, 在 SPSS 中采用双因素方差分析方法进行研究, 当  $P < 0.05$  时表明对死亡率具有显著性影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水温对对照组初孵黑棘鲷仔鱼的影响

用于试验的仔鱼刚孵化出 1 d, 仍处于前期仔鱼阶段, 卵黄囊尚未消失, 仔鱼为内源营养期。6 h 时, 各组没有仔鱼死亡, 其中, 18℃ 组、22℃ 组仔鱼可灵活游动, 26℃ 组的仔鱼则沉于烧杯底部, 但对接触反应灵敏, 而 30℃ 组仔鱼的背鳍基部出现隆起, 发育速度明显高于其他组, 但已有部分仔鱼出现尾部弯曲, 且对接触没有反应, 表明运动受到抑制。24 h 时, 18℃ 组、22℃ 组、26℃ 组没有仔鱼出现死亡, 其中, 18℃ 组、22℃ 组的尾鳍、消化道已形成, 26℃ 组除尾鳍、消化道形成外, 部分仔鱼已开口, 而 30℃ 组全部仔鱼运动受到抑制, 有 23.4% 的仔鱼死亡。48 h 时, 只有 18℃ 组未出现仔鱼死亡, 22℃ 组、26℃ 组、30℃ 组出现了不同程度的死亡情况, 死亡率分别为 2.9%、1.3%、98%, 30℃ 组仔鱼死亡率增加明显。72 h 时, 各组仔鱼均有死亡, 死亡率分别为 0.8%、2.9%、7.7%、98%。96 h 时, 各组死亡率分别为 1.6%、7.0%、7.7%、98%, 22℃ 组、26℃ 组仔鱼死亡率没有变化, 表明该实验组仔鱼的生长和发育已非常适应试验水温条件

(表 1)。

对各实验组数据进行多重比较分析, 18℃组、22℃组、26℃组 3 组仔鱼死亡率没有显著差别( $P > 0.05$ ), 且死亡率均低于 10%, 可认为这 3 个水温条件对仔鱼死亡不存在显著性影响, 而 30℃水温则对仔鱼死亡具有显著性影响( $P < 0.05$ )。

每种生物对水温均有一定的耐受范围, 仔鱼的耐热性往往低于幼鱼或成鱼, 曾江宁<sup>[29]</sup>的研究表明, 初孵 1 周的黑棘鲷仔鱼 24 h 的半数致死水温为 30.3℃, 与本实验结果相近, 24 h 时 30℃水温造成的初孵仔鱼死亡率为 23.4%。

表 1 对照组黑棘鲷仔鱼不同水温条件下的死亡率  
Tab. 1 The lethal rate of *Acanthopagrus schlegelii* larvae in control group at different water temperature

组别	死亡率(%)			
	时间(h)			
	24	48	72	96
18℃	0.0	0.0	0.8±1.3	1.6±2.7
22℃	0.0	2.9±2.6	2.9±2.6	7.0±3.3
26℃	0.0	1.3±2.3	7.7±3.3	7.7±3.3
30℃	23.4±3.8	98.0±3.4	98.0±3.4	98.0±3.4

表 2 各余氯浓度组仔鱼死亡率与对照组仔鱼死亡率差异性检验

Tab. 2 Significance test of mortality rate of *Acanthopagrus schlegelii* larvae between rc (residual chlorine) and control group

余氯浓度 (mg/L)	18				22				26				30			
	24h	48h	72h	96h	24h	48h	72h	96h	24h	48h	72h	96h	24h	48h	72h	96h
0																
0.025																
0.05								*		*	*	*				
0.1			*	*				*		*	*	*				
0.2		*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*			*
0.4		*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*		*
0.8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

注: \*表示该组仔鱼死亡率与对照组具有显著性差异( $P < 0.05$ )

表 3 各水温条件下余氯对仔鱼的 LC<sub>50</sub> 值(mg/L)

Tab. 3 Lethal concentration of residual chlorine to the larvae of *Acanthopagrus schlegelii* at different temperature

组别	时间 (h)			
	24	48	72	96
18℃	0.816	0.810	0.417	0.242
22℃	0.460	0.423	0.313	0.211
26℃	0.433	0.443	0.227	0.140
30℃	0.319	<0.025	<0.025	<0.025

## 2.2 余氯对初孵黑棘鲷仔鱼的影响

高浓度余氯可在短时间内造成仔鱼死亡, 仔鱼体形一般为 S 形扭曲, 或尾部断裂、甚至蜷缩成球状。由表 2 可知, 0.8 mg/L 的余氯在 24 h 时对仔鱼的死亡率与对照组具有显著性差异( $P < 0.05$ ), 随着暴露时间的延长, 低浓度余氯对仔鱼的死亡率开始与对照组显现出差异, 水温越高, 余氯致毒浓度愈低, 如 26℃组在 48 h 时 0.05 mg/L 的余氯对仔鱼的死亡率与对照组具有显著性差异。

采用公式 1 对各组数据进行拟合, 得到余氯对仔鱼的半致死效应浓度 LC<sub>50</sub> 值, 列于表 3。大多数生物在温度升高时表现出对更低剂量的余氯敏感, 如大型溞(*Daphnia magna*)、白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)<sup>[14]</sup>, 虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、美洲原银汉鱼(*Menidia beryllina*)<sup>[30]</sup>, 银鲑(*Oncorhynchus kisutch*)、胡瓜鱼(*Osmerus mordax*)、斑尾美洲鲈(*Notropis hudsonius*)<sup>[31]</sup>等, 黑棘鲷仔鱼也不例外, 从表 3 总数据可明显看出, 余氯对黑棘鲷仔鱼的 LC<sub>50</sub> 值显著受到了水温的协同影响, 当水温达到 30℃时, 水温则成为仔鱼主要死亡因素。

## 2.3 黑棘鲷初孵仔鱼死亡率与水温、余氯、暴露时间关系

采用 GAM 模型研究仔鱼死亡率与水温、余氯、暴露时间的关系, 建立 GAM 模型连接函数所需数据见表 4, 对 response 数据, 以二元数据赋值, 对仔鱼未死亡赋值 0, 其对应余氯的值选择余氯对仔鱼无观测影响浓度(None observed effect concentration, 简称 NOEC), 即与对照无显著性差异的余氯浓度, 见表 2; 对 50%死亡的仔鱼赋值 0.5, 其对应余氯的值为 LC<sub>50</sub>。

表 4 GAM 模型连接函数所需数据  
Tab. 4 Data for link function of GAM

暴露时间(h)	24	24	24	24	48	48	48	72	72	72	96	96	96			
水温(°C)	18	22	26	30	18	22	26	18	22	26	18	22	26			
NOEC	0.4	0.11	0.1	0.1	0.1	0.4	0.025	0.05	0.1	0.025	0.05	0.025	0.025			
P'	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
暴露时间(h)	24	24	24	24	48	48	48	48	72	72	72	72	96	96	96	96
水温(°C)	18	22	26	30	18	22	26	30	18	22	26	30	18	22	26	30
LC <sub>50</sub> (mg/L)	0.816	0.460	0.433	0.319	0.810	0.423	0.443	0	0.417	0.313	0.227	0	0.242	0.211	0.140	0
P'	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

GAM 分析结果(表 5)显示, 仔鱼死亡率与水温、余氯含量、暴露时间并不存在 3 次或更复杂分段样曲线关系( $P_r > 0.05$ ), 而是近似的分段线性关系, 见图 1-1, 各因子的光滑函数随对应因子的变化曲线也具有此特点, 从图 1-2 可看出, 水温在 18~26°C 间与  $S(\text{水温}, 4)$  间具有线性关系, 从图 1-3 可看出, 余氯在 0.025~0.4 mg/L 与  $S(\text{余氯}, 4)$  间具有近似线性关系, 从图 1-4 可看出, 96 h 暴露时间内时间与仔鱼死亡率

具有近似线性关系。各因子的光滑函数随对应因子的变化曲线可进一步解释仔鱼死亡率随因子变化的关系, 当光滑函数值高于 0 时, 所对应的因子值即对仔鱼产生明显致死效应的数值, 从图 1-2 看出, 水温为 26°C 时,  $S(\text{水温}, 4)$  开始大于 0, 水温由 26°C 升至 30°C 时,  $S(\text{水温}, 4)$  急剧上升, 表明水温高于 26°C 对黑棘鲷初孵仔鱼的致死效应明显, 从图 1-3 可看出, 余氯浓度高于 0.2 mg/L 时, 开始对仔鱼具有明显的

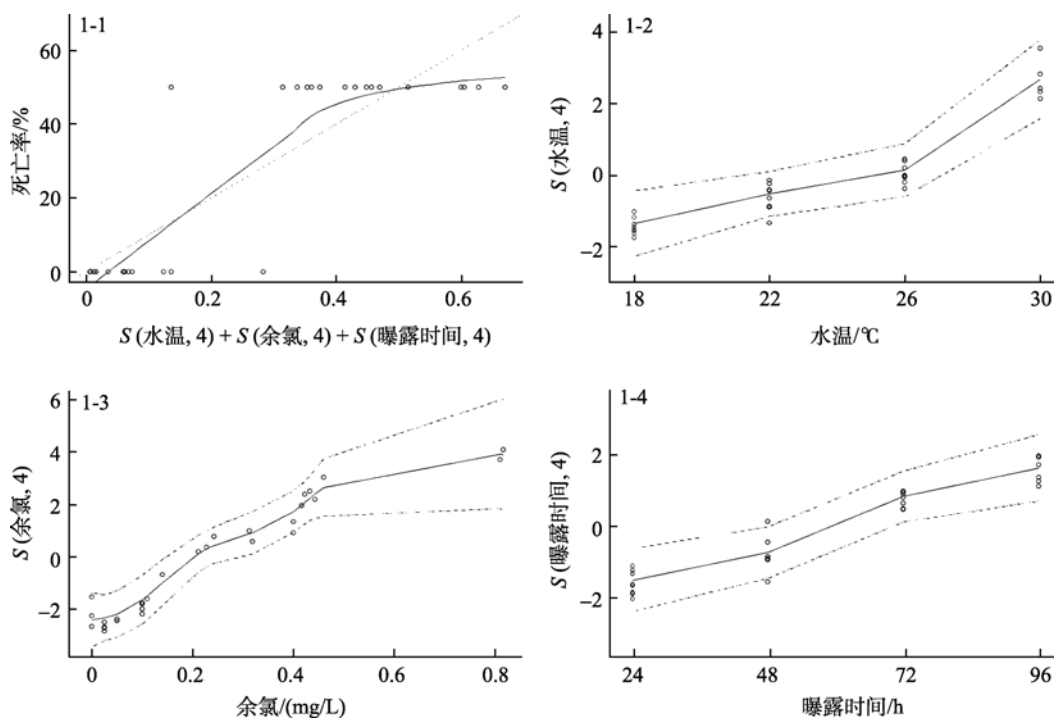


图 1 仔鱼死亡率与水温、余氯、暴露时间的光滑函数拟合结果

Fig. 1 GAM plots for temperature, residual chlorine and exposure time

1-1. 仔鱼死亡率与水温、余氯、暴露时间的关系曲线; 1-2. 水温的光滑函数曲线; 1-3. 余氯的光滑函数曲线; 1-4. 暴露时间的光滑函数曲线, 图中实线为拟合的光滑函数, 虚线为光滑函数的标准误差估计

1-1. fitted plot of lethal rate and factors; 1-2. smooth spline of temperature; 1-3. smooth spline of residual chlorine; 1-4. smooth spline of exposure time, the solid line represents the fitted smooth spline, the dashed lines represent two standard errors above and below the smooth estimate

表 5 广义相加模型拟合结果

Tab. 5 Fitted results of GAM

光滑成分	DF	$\chi^2$ 值	Pr(chi)
$S_1$ (水温, 4)	2	0.986	0.609
$S_2$ (余氯, 4)	3	1.816	0.608
$S_3$ (曝露时间, 4)	2	0.125	0.93

致死效应, 从图 1-4 可看出, 在有余氯存在情况下, 曝露时间超过 48 h, 会对黑棘鲷初孵仔鱼产生明显致死效应。

经多元方差分析结果可知(表 6), 水温、余氯、曝露时间对仔鱼死亡率具有显著性影响( $P < 0.05$ ), 水温-余氯、水温-曝露时间之间具有显著性交互作用( $P < 0.05$ ), 从图 2-1 和图 2-2 存在线段相交的情况也可说明交互作用的存在, 其中, 水温和余氯的交互

作用主要发生在低浓度余氯组, 余氯和曝露时间的交互作用主要发生在 24 h 和 48 h; 而水温与曝露时间之间没有显著的交互作用( $P = 0.989 > 0.05$ ), 从图 2-3 可看出没有线段相交的情况。

与多种化学因子如重金属 Cu<sup>[32]</sup>、Cd<sup>[33]</sup>、农药<sup>[34]</sup>与水温具有交互作用一样, 余氯与水温之间也具有交互作用, 且一般为协同作用<sup>[32]</sup>, 而从本实验结果看, 当水温高于 30°C 或余氯浓度高于 0.8 mg/L 时, 水温和余氯间均可成为仔鱼死亡主导因素, 二者间的交互作用很难被观测到。

曝露时间与污染物的毒性间通常具有显著的时间-剂量效应关系, 本实验中, 仔鱼死亡率与曝露时间之间呈线性关系, 随着曝露时间的延长, 余氯的 LC<sub>50</sub> 值逐渐减少, 与 Hall 等<sup>[35]</sup>研究结论相似。

表 6 双因素方差分析受试者间效应结果

Tab. 6 Results of tests between subjects effects of univariate analysis

自变量: 仔鱼死亡率					
来源	III 型方差	自由度	平均方差	统计量 $F$ 值	$P$ 值
修正模型	14.428(a)	50	0.289	11.105	0.000
截距	14.881	1	14.881	572.672	0.000
水温	0.456	3	0.152	5.847	0.002
余氯	10.197	5	2.039	78.481	0.000
曝露时间	1.651	3	0.550	21.179	0.000
水温-余氯	0.899	15	0.060	2.305	0.016
余氯-曝露时间	1.173	15	0.078	3.009	0.002
水温-曝露时间	0.053	9	0.006	0.228	0.989
误差	1.169	45	0.026		
总计	30.479	96			

$a R^2 = 0.925$  (调整  $R^2 = 0.842$ )

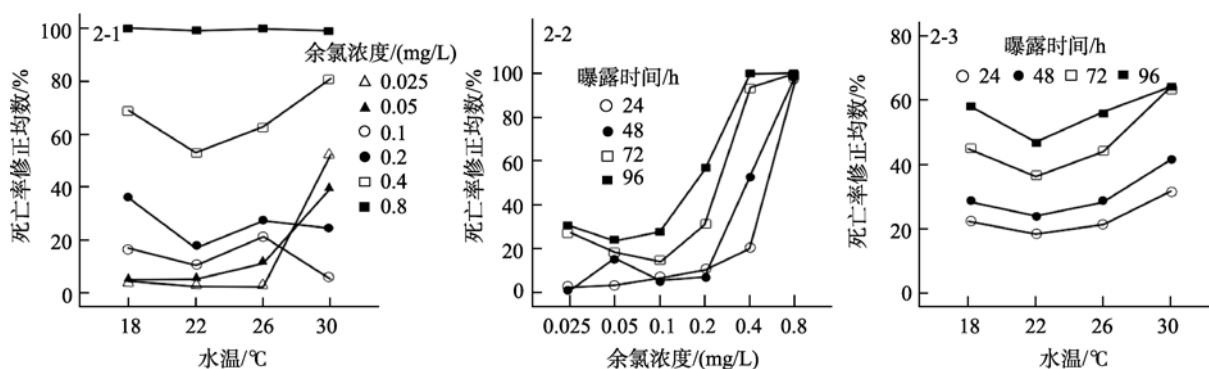


图 2 各因子间交互作用

Fig. 2 The plot of interaction between factors

2-1. 水温和余氯交互作用; 2-2. 余氯和曝露时间交互作用; 2-3. 水温和曝露时间交互作用

2-1. plot between temperature and residual chlorine; 2-2. plot between residual chlorine and exposure time; 2-3. plot between temperature and exposure time

### 3 结论

18、22、26℃ 3 种水温对黑棘鲷初孵仔鱼致死率均低于 10%，与对照组相比不存在显著性差异，30℃ 水温对仔鱼死亡率与对照相比具有显著差异( $P < 0.05$ )，24 h 时初孵仔鱼死亡率 23.4%，48 h 时为 98%。

24 h 时 18、22、26、30℃ 4 种水温条件下余氯对黑棘鲷仔鱼的  $LC_{50}$  值分别为 0.816、0.460、0.433、0.319 mg/L，可见水温升高会增强余氯对仔鱼的致死效应，而随着时间的延长，余氯对仔鱼的  $LC_{50}$  效应浓度值进一步降低，至 96 h，其值分别为 0.242、0.211、0.140、 $<0.025$  mg/L。

GAM 分析结果显示，水温在 18~26℃ 间与仔鱼死亡率间具有线性关系，水温由 26℃ 升至 30℃ 时，仔鱼死亡率有急剧上升，表明水温高于 26℃ 对黑棘鲷初孵仔鱼致死效应明显；余氯在 0.025~0.4 mg/L 与仔鱼死亡率间具有近似线性关系，当余氯浓度高于 0.2 mg/L 时，对仔鱼致死效应明显；96 h 内曝露时间与仔鱼死亡率具有近似线性关系，在有余氯存在的情况下，曝露时间超过 48 h，会对黑棘鲷初孵仔鱼产生明显致死效应。

经多元方差分析结果可知，水温、余氯、曝露时间对仔鱼死亡率具有显著性影响( $P < 0.05$ )，水温-余氯、水温-曝露时间之间具有显著性交互作用( $P < 0.05$ )。

致谢：本次实验得到了江苏省海洋水产研究所启东海水增养殖基地的大力支持，同时也得到了东海水产研究所蒋玫副研究员、黄世林、马继臻同学的大力帮助，谨此表示感谢。

#### 参考文献：

- [1] 曾江宁, 陈全震, 郑平, 等. 余氯对水生生物的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2717-2724.
- [2] Bamber R N. The influence of rising background temperature on the effects of marine thermal effluents[J]. Journal of Thermal Biology, 1995, 20(1-2): 105-110.
- [3] 苗绿田. 核电站冷却水系卷载效应的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 1989, 1: 13-19.
- [4] 盛连喜, 侯文礼. 电厂冷却系统对梭幼鱼和对虾仔虾卷载效应的初步探讨[J]. 环境科学学报, 1994, 14(1): 47-55.
- [5] 黄洪辉, 王肇鼎, 张穗. 电厂温排水中的余氯对邻近水域生态环境的影响[J]. 南海研究与开发, 1998, 2: 46-58.
- [6] 张穗, 黄洪辉, 陈浩如, 等. 大亚湾核电站余氯排放对邻近海域环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(2): 14-18.
- [7] Bamber R N, Seaby R M H. The effects of power station entrainment passage on three species of marine planktonic crustacean, *Acartia tonsa* (Copepoda), *Crangon crangon* (Decapoda) and *Homarus gammarus* (Decapoda)[J]. Marine Environmental Research, 2004, 57(4): 281-294.
- [8] 张燕, 孙英兰. 电厂温排水中余氯浓度预测[J]. 海洋科学, 2007, 31(2): 5-8.
- [9] Buckley J A. Acute toxicity of residual chlorine in wastewater to coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) and some resultant hematologic changes[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1976, 33(12): 2854-2856.
- [10] Zeitoun I H. Assessment of intermittently chlorinated heated effluents on survival of adult rainbow trout (*Salmo gairdneri*) at power generating facilities[J]. Environmental Science & Technology, 1978, 12(10): 1173-1179.
- [11] Giattina J D, Cherry D S, Cairns J R, et al. Comparison of laboratory and field avoidance behavior of fish in heated chlorinated water[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1981, 110(4): 526-535.
- [12] Hall L W, Burton D T, Margrey S L, et al. The effect of acclimation temperature on the interactions of chlorine,  $\Delta T$  and exposure duration to eggs, prolarvae and larvae of striped bass, *Morone saxatilis*[J]. Water Research, 1983, 17(3): 309-317.
- [13] 林可椒, 高宏伟. 余氯对鳊鱼苗的急性毒性试验[J]. 淡水渔业, 1991, 3: 24-25.
- [14] 尹伊伟, 温晓燕, 吕颂辉, 等. 不同温度下氯对水生生物的毒性及制订渔业水质标准的探讨[J]. 生态科学, 1992, 2: 41-49.
- [15] 江志兵, 曾江宁, 陈全震, 等. 滨海电厂冷却水余热

- 和余氯对中华哲水蚤的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1401-1406.
- [16] 张海发, 刘晓春, 王云新, 等. 温度、盐度及 pH 对斜带石斑鱼受精卵孵化和仔鱼活力的影响[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(2): 31-36.
- [17] 关键, 柳学周, 兰春燕, 等. 温度、盐度对褐牙鲈(♀) × 犬齿牙鲈(♂) 杂交子一代胚胎发育和仔鱼存活的影响[J]. 海洋水产研究, 2007, 28(3): 31-37.
- [18] 陈民山, 范贵旗. 胜利原油对海洋鱼类胚胎及仔鱼的毒性效应[J]. 海洋环境科学, 1991, 10(2): 1-5.
- [19] 蒋玫, 沈新强, 晁敏, 等. AOX 漂白废水对黑鲟鱼卵及仔鱼的毒性效应[J]. 环境科学研究, 2007, 19(2): 27-30.
- [20] 蒋玫, 林钦, 沈新强. 航道疏浚泥悬浮液对黑鲟胚胎的发育及仔鱼摄食生长的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1674-1678.
- [21] 江志兵, 廖一波, 高爱根. 余氯对鱼类毒性影响的研究进展[J]. 海洋学研究, 2009, 27(4): 86-94.
- [22] 穆景利, 王新红, 王淑红, 等. 苯并(a)芘影响黑鲟肝脏 EROD 活性变化的动力学研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(1): 68-71.
- [23] 刘兰芬, 郝红, 吕光四. 电厂温排水中余氯衰减规律及其影响因素的影响研究[J]. 水利学报, 2004, 5: 94-98.
- [24] Hampel M, Moreno-Garrido I, Sobrino C, et al. Acute toxicity of LAS homologues in marine microalgae: esterase activity and inhibition growth as endpoints of toxicity[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2001, 48: 287-292.
- [25] 刘万里, 薛茜, 曹明芹, 等. 用 SPSS 实现完全随机多组比较秩和检验的多重比较[J]. 地方病通报, 2007, 22(2): 27-29.
- [26] Taylor J M G, Zhang F, Withers H R. Non-linear effects in dose-time analyses: application of modern statistical techniques[J]. Radiotherapy and Oncology, 1997, 45: 133-140.
- [27] Cawsey E M, Austin M P, Baker B L. Regional vegetation mapping in Australia: a case study in the practical use of statistical modeling[J]. Biodiversity and Conservation, 2002, 11: 2239-2274.
- [28] 赫晓慧, 温仲明, 王金鑫. 基于 GAM 模型的延河流域主要草地物种空间分布及其与环境的关系[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1718-1724.
- [29] 曾江宁. 滨海电厂温排水对亚热带海域生态影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 1-157.
- [30] Fisher D J, Burton D T, Yonkos L T. The relative acute toxicity of continuous and intermittent exposure of chlorine and bromine to aquatic organisms in the presence and absence of ammonia[J]. Water Research, 1999, 33(3): 760-768.
- [31] Seegert G L, Brooks A S. The effects of intermittent chlorination on coho salmon, alewife, spottail shiner, and rainbow smelt[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1978, 107(2): 346-353.
- [32] Gama-Flores J L, Sarma S S S, Nandini S. Interaction among copper toxicity, temperature and salinity on the population dynamics of *Brachionus rotundiformis* (Rotifera)[J]. Hydrobiologia, 2005, 181: 559-568.
- [33] Abdel-lateif H M, Donker M H, Van Straalen N M. Interaction between temperature and cadmium toxicity in the isopod *Porcellio scaber*[J]. Functional Ecology, 1998, 12(4): 521-527.
- [34] Fisher S W. Changes in the toxicity of three pesticides as a function of environmental pH and temperature[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1991, 46(2): 197-202.
- [35] Hall L W, Burton D T, Margrey S. The influence of acclimation temperature on the interactions of chlorine, elevated temperature, and exposure duration for grass shrimp, *Palaemonetes pugio*[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1979, 108: 626-631.

# Effects of temperature and residual chlorine on the survival of black porgy *Acanthopagrus schlegelii* larvae

CHAO Min, WANG Yun-long, SHEN Xin-qiang

(Key and Open Laboratory of Marine and Estuary Fisheries, Ministry of Agriculture of China, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Shanghai 200090, China)

**Received:** Nov., 22, 2010

**Key words:** *Acanthopagrus schlegelii*; temperature; residual chlorine; generalized additive model; univariate analysis

**Abstract:** The lenitic test method was used to analyze the effects of increased water temperature and residual chlorine resulted from power plants thermal drainage on the survival of *Acanthopagrus schlegelii* larvae. Four different water temperatures were set as 18, 22, 26 and 30°C, and six different gradients of residual chlorine concentration were set as 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 and 0.8 mg/L in triplicate. At the same time, filtered seawater was taken as the control. The sac-fry stage larvae were used and test was terminated at 96 h. The bioassay results showed that there is a significant lethal effect on black porgy larvae at 30°C. The lethal rate was 23.4% at 24 h and fast arose to 98% at 48 h. Whereas the lethal rate of group at 18, 22 and 26°C were all lower than 10%. The half maximal effective concentration after exposure for 24 h (24 h-LC<sub>50</sub>) at 18, 22, 26 and 30°C were 0.816, 0.460, 0.433 and 0.319 mg/L respectively. The data indicated temperature can enhance the lethal effect of residual chlorine on the survival of black porgy larvae, and LC<sub>50</sub> value significantly decreased with increased time. The half maximal effective concentration after exposure for 96 h (96 h-LC<sub>50</sub>) at 18, 22, 26 and 30°C were 0.242, 0.211, 0.140 and lower than 0.025 mg/L respectively. We used generalized additive model to analysis the relation between lethal rate and factors including temperature, residual chlorine, exposure time. The results showed that the toxicity significantly enhanced when the temperature was higher than 26°C, or the concentration of residual chlorine was higher than 0.2 mg/L, or exposure time of larvae to residual chlorine was longer than 48 h. The univariate analysis results indicated that the lethal rate was significantly affected by temperature, residual chlorine and exposure time. Furthermore, there is significant influence between temperature and residual chlorine, as well as residual chlorine and exposure time ( $P < 0.05$ ).

(本文编辑: 谭雪静)