

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.01299

温度与盐度对吉富品系尼罗罗非鱼仔鱼生长与存活的联合影响

强俊¹, 徐跑^{1,2}, 何杰², 李瑞伟³

1. 南京农业大学 无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;

2. 中国水产科学研究院 淡水渔业研究中心, 农业部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081;

3. 广东茂名茂南三高罗非鱼良种基地, 广东 茂名 525024

摘要: 采用中心复合实验设计(CCD)和响应曲面方法(response surface methodology, RSM), 探讨了温度(18~37℃)和盐度(0~16)对吉富品系尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)仔鱼生长和存活的联合影响。结果表明, 本实验条件下, 温度与盐度的一次与二次效应对特定生长率和存活率均有显著影响($P<0.05$), 随着温度或盐度的上升, 生长与存活均呈先上升后下降的变化。温度与盐度间存在互作效应($P<0.05$), 温度为 18~20℃时, 仔鱼的特定生长率与存活率在盐度为 8~9 时较高; 随着温度上升, 27~32℃时, 盐度为 5~7 时较高; 高温环境时(35~37℃), 盐度在 4 左右, 生长与存活率较高。所考察因子与生长和存活率间的二次多项回归方程的决定系数分别达到 0.979 6 和 0.982 1 ($P<0.01$), 可用于预测罗非鱼的生长与存活率; 温度效应对生长的影响较盐度明显, 而对存活率的影响则相反。通过对所建立的两个回归方程同时优化, 得到 2 个因子的最佳组合为: 温度 29.1℃和盐度 5.4, 在此最佳因子组合下罗非鱼仔鱼的特定生长率与存活率达到最优, 分别为 10.08%·d⁻¹ 和 91.34%, 其可靠性达 0.973。建议罗非鱼仔鱼在本研究中得到的最优因子组合下进行培育, 以提高生产效率。

关键词: 尼罗罗非鱼; 仔鱼; 生长; 存活; 中心复合设计; 响应曲面

中图分类号: S962.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2011)06-1299-09

温度与盐度作为重要的环境因子, 对鱼类的生长发育有重要影响^[1]。关于温度和盐度对罗非鱼生长与存活的影响已见一些报道, Suresh^[2]研究发现尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)与奥利亚罗非鱼(*O. aureus*)只适合在低盐环境中生长; Payne 和 Collinson^[3]发现盐度为 5~10 时, 尼罗罗非鱼的生长没有抑制作用; Cataldi 等^[4]报道了尼罗罗非鱼只能在海水环境中存活较短时间; 杂交罗非鱼的耐盐性显著高于纯种罗非鱼, 以色列红罗非鱼(*O. niloticus*×*O. mossambicus*)的耐盐性优于尼罗罗非鱼^[5]。罗非鱼对高温环境具有较强的耐受性, Baras 等^[6]发现, 温度为 37℃和 35℃时, 尼罗罗非鱼的平均成活率分别为 64.7%和 85%; Azaza 等^[7]

发现, 尼罗罗非鱼幼鱼在水温 26℃和 30℃时的生长速度显著高于 22℃和 34℃时。以上报道主要集中在幼鱼阶段, 关于仔鱼阶段仅见强俊等^[8]与王辉等^[9]的研究。这些研究以单因子实验为主, 此类实验存在很大的局限性, 往往只能建立在其他环境因素相同的条件下进行研究。众所周知, 各种环境因子对生物的影响是相互联系, 相互制约的关系^[10-11]。已有研究表明, 温度与盐度对尼罗罗非鱼^[12]、虹鳟(*Scophthalmus maximus*)^[13]、牙鲆(*Paralichthys dentatus*)^[14]和斑点狼鱼(*Anarhichas minor*)^[15]的幼鱼以及鲈鱼(*Perca fluviatilis*)仔鱼^[16]的生长存在显著的互作效应。关于温度与盐度对罗非鱼仔鱼生长与存活是否存在互作效应尚

收稿日期: 2011-02-12; 修订日期: 2011-04-08.

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903046-02); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXL11-0708); 中央公益性科研业务费专项资金资助项目(2011jbf09).

作者简介: 强俊(1984-), 男, 在读博士, 研究方向鱼类遗传繁殖和健康养殖. E-mail: qiangjunn@163.com

通信作者: 徐跑, 研究员, 博士生导师. E-mail: xup@ffrc.cn

未见到相关报道。本研究在已有研究的基础上,采用中心复合实验设计与响应曲面分析方法考察温度与盐度对吉富罗非鱼仔鱼特定生长率与存活率的联合影响,并对各因子的二次效应及其交互作用作了进一步的研究和探讨。中心复合设计^[17]是国内外近年来应用比较多的一种过程优化方法,可以用非线性数学模型进行拟合,具有实验次数少,精密度高,预测性好等优点。响应曲面法^[18]是一种过程优化的综合技术,本研究中拟用来建立因子与响应间关系的曲面模型,并对影响生物过程的因子及其交互作用进行评价,确定最佳温度与盐度组合,旨在优化苗种培育环境,最大程度发挥罗非鱼的生长潜能。

1 材料与方法

1.1 材料

实验场地为广东省茂名“三高”国家级罗非鱼良种基地。选取性腺饱满的“吉富”品系尼罗罗非鱼雌鱼和雄鱼,分别取卵子与精液进行人工授精,然后将受精卵放置于车间孵化,孵化条件为温度 28~29℃,盐度 4~5, 90 h 后收集初孵仔鱼。实验前在室内 150L 水族箱(水温 28℃±0.5℃,盐度 5±0.2, pH 7.6±0.2)中暂养 5 d,自然光周期。暂养期间使用循环水连续充气。初孵仔鱼 2 日龄可以摄食,每天早、中、晚各投喂饲料 1 次进行饲食驯化(粗蛋

白质为 38.0%、脂肪 8.0%),投喂量为体重的 20%。

1.2 实验设计与分组

正式实验前先进行罗非鱼仔鱼的预实验,通过单因子实验确定仔鱼可以正常摄食与生长的温度和盐度范围。实验采用中心复合实验设计,本实验的响应值为特定生长率和存活率,因子为温度(18~37℃)和盐度(0~16),整个实验采用电子恒温棒(量程为 20~38℃)和冰袋控温,温差为±0.3℃;用海水晶进行盐度调节,变化为±0.2。每个因子的实验水平编码分别为-a、-1、0、1、a(表 1),|a|=1.414 21 为星号臂值。实验采用 2 因素 5 水平,共计 13 次实验,实验的次序随机,中心组合重复 5 次,每个实验组合重复 3 次。温度和盐度组合见表 1。

1.3 实验鱼的驯化

选择无病无伤,活力强的个体用于实验。实验鱼先进行温度驯化,驯化在 100 L 的塑料桶中进行。温度驯化采用渐进方式,每天温度升降幅不超过 2℃。驯化至相应的实验温度后开始进行相应的盐度驯化。盐度测定使用日本 ATAGO S-10E 盐度计,盐度调节也采用渐进方式,每天盐度升幅不超过 2。驯化至相应的设置后,在此设置下饲养 3 d。

1.4 实验方法

实验在 39 个 100 L 的塑料桶中进行,每个塑料桶添加曝气 3 d 后的自来水 50 L。调节至相应

表 1 温度与盐度的实验设计组合与结果
Tab. 1 Experimental design of temperature and salinity and results

组别 group	编码值 code value		实际值 actual value		特定生长率/(%·d ⁻¹) specific growth rate	存活率% survival rate
	T	S	T	S		
1	-a	0	18.0	8.0	4.10±0.92	56.33±3.79
2	0	a	27.5	16.0	7.27±0.97	74.67±4.51
3	1	-1	34.2	2.3	9.49±1.02	78.00±2.65
4	a	0	37.0	8.0	7.72±0.86	62.33±4.51
5	1	1	34.2	13.7	7.83±1.12	68.00±3.61
6	0	0	27.5	8.0	9.41±0.97	93.00±1.73
7	0	0	27.5	8.0	9.37±0.93	86.67±2.52
8	-1	-1	20.8	2.3	6.13±0.84	66.67±2.52
9	0	-a	27.5	0.0	9.35±0.87	87.00±2.65
10	0	0	27.5	8.0	9.66±1.05	91.67±2.08
11	0	0	27.5	8.0	10.13±1.17	90.67±5.86
12	-1	1	20.8	13.7	6.18±0.93	68.00±1.73
13	0	0	27.5	8.0	9.97±1.06	92.33±3.21

的温度与盐度组合, 实验开始前对仔鱼的体质量和体长进行测量, 体质量波动范围 $\pm 0.01\text{g}$, 体长波动范围 $\pm 0.1\text{cm}$ 。实验鱼平均体质量 $(0.124 \pm 0.007)\text{g}$, 体长 $(1.53 \pm 0.06)\text{cm}$, 每个组合放置 300 尾鱼, 每个平行组各 100 尾。各组初始体质量和体长没有显著差异(ANOVA, $P > 0.05$)。按 1.1 正常投喂, 每次过量投喂, 饲喂时间持续 1 h, 投喂结束后及时清除残饵。实验周期共计 26 d。实验期间连续充气, 采用虹吸法清除桶底废物, 日换水量 1/3, 保持换水前后温差范围 ± 0.3 , 溶氧保持在 $5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, pH 7.6 ± 0.2 , 氨氮和亚硝酸盐分别不高于 $0.003\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.004\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 自然光周期。

1.5 响应指标测定

实验结束前 24 h 停饲, 次日统计每桶鱼的数量, 并随机选取 50 尾实验用鱼进行体质量测量, 特定生长率(SGR)和存活率分别按下列公式计算:

$$\text{SGR}(\%\cdot\text{d}^{-1}) = [(\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)] \times 100;$$

$$\text{存活率}(\%) = [\text{初始尾数} - \text{终末尾数}] / (t_2 - t_1) \times 100$$

式中: W_1 、 W_2 分别为起始时间 t_1 、终末时间 t_2 时的体质量(g)。

1.6 数据处理

数据测定结果用平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm \text{SD}$)表示。通过最小二乘法拟合因子与响应值之间的二次多项回归方程为:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1T + b_2S + b_3T \times S + b_4T^2 + b_5S^2$$

式中, $\hat{Y}$ 为响应预测, 在此响应为特定生长率和存活率; b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 分别为回归常数、温度与盐度的一次效应、温度与盐度间互作效应、温度与密度的二次效应。

采用 STATISTICA 8.0 软件进行实验设计与结果处理, 对温度、盐度与响应值进行的二次多项回归拟合。利用响应曲面法对各响应值进行优化, 求的温度和盐度的最佳水平组合。显著水平为 0.05, 极显著水平为 0.01。

2 结果与分析

2.1 温度与盐度对吉富罗非鱼仔鱼特定生长率的影响

温度(T)与盐度(S)对罗非鱼仔鱼特定生长率

(SGR)的测定结果见表 1, 对数据采用最小二乘法进行回归拟合, 方差分析结果列于表 2。从表 2 可见, 模型 $P < 0.01$, 表明所建立的回归模型极显著; 失拟项 $P = 0.4206 > 0.05$, 表明拟合的模型有效。 T 、 S 的一次和二次效应对 SGR 均有极显著影响($P < 0.01$); T 与 S 存在互作效应($P < 0.05$)(表 3); 回归系数显示, 温度的效应较盐度明显。 T 和 S 与 SGR 之间的实际二次回归方程(1):

$$\text{SGR} = 9.7085 + 1.2653T - 0.5700S - 0.4268T \times S - 1.8257T^2 - 0.6248S^2$$

该方程的决定系数 $R^2 = 0.9796$, 说明该模型能解释 97.96%响应值的变化, 仅有总变异的 2.04%不能用此模型解释, 该模型拟合程度良好。

温度和盐度与 SGR 之间的响应曲面图及其等高线图(图 1-a、b)。通过该组动态图可评价实验因素对仔鱼生长的两两交互作用, 曲面较陡说明影响显著($P < 0.05$), 曲面较圆说明影响不显著($P > 0.05$); 等高线的形状可反映出交互效应的强弱大小, 椭圆型表示两因素交互作用显著($P < 0.05$), 而圆形则与之相反。本实验条件下, 随着温度和盐度升高, SGR 呈先上升后下降的变化趋势, 温度为 $29.7 \sim 30.7^\circ\text{C}$, 盐度为 $3.8 \sim 5.2$ 时, 仔鱼的 SGR 较高, 为 $10.13 \sim 10.14\%\cdot\text{d}^{-1}$ 。本实验范围内, 温度与盐度分别为 18°C 和 16 时仔鱼的生长有明显的抑制作用($P < 0.01$)。

2.2 温度与盐度对吉富罗非鱼仔鱼存活率的影响

对表 1 的存活率(survival rate, R_s)测定结果采用最小二乘法进行回归拟合, 方差分析结果列于表 4。模型 $P < 0.01$, 表明所建立的回归模型极显著; 失拟项 $P = 0.6653 > 0.05$, 表明拟合的模型有效。 T 的二次效应与 S 的一次和二次效应对存活率有极显著影响($P < 0.01$); T 的一次效应与 T 和 S 互作效应对存活率有显著影响($P < 0.05$)(表 5); 回归系数显示, 盐度的效应较温度明显。 T 、 S 与 R_s 之间的实际二次回归方程(2):

$$R_s = 90.8660 + 2.4773T - 3.2630S - 2.8333T \times S - 15.7457T^2 - 4.9949S^2$$

该方程的决定系数 $R^2 = 0.9821$, 说明该模型能解释 98.21%响应值的变化, 仅有总变异的 1.79%不

表 2 温度和盐度对仔鱼特定生长率的回归模型方差分析

Tab. 2 Analysis of variance for the effect of temperature and salinity on specific growth rate of larvae

变异源 source	平方和 sum of squares	自由度 df	均方 mean square	F	P
模型 model	40.3814	5	8.0763	67.1400	< 0.0001
残差 residual	0.8420	7	0.1203		
失拟 lack of fit	0.3964	3	0.1321	1.1859	0.4206
纯误差 pure error	0.4457	4	0.1114		
总和 total	41.2234	12			

$R^2=0.9796$ Adj $R^2=0.9650$ (Adj R^2 为校正系数)

表 3 回归方程系数显著性检验

Tab. 3 Test of significance for regression coefficient

变异来源 source of variation	回归系数 regression coefficient	标准误 standard error	置信下限 95%CI low	置信上限 95%CI high	P
intercept	9.7085	0.1551	9.3417	10.0753	
T	1.2653	0.1226	0.9753	1.5552	< 0.0001
S	-0.5700	0.1226	-0.8599	-0.2800	0.0023
T×S	-0.4268	0.1734	-0.8368	-0.0167	0.0434
T ²	-1.8257	0.1315	-2.1367	-1.5148	< 0.0001
S ²	-0.6248	0.1315	-0.9357	-0.3138	0.0021

注：表中系数为因子编码水平下的估计。
Note: Coefficient in table represent estimate of coded factors.

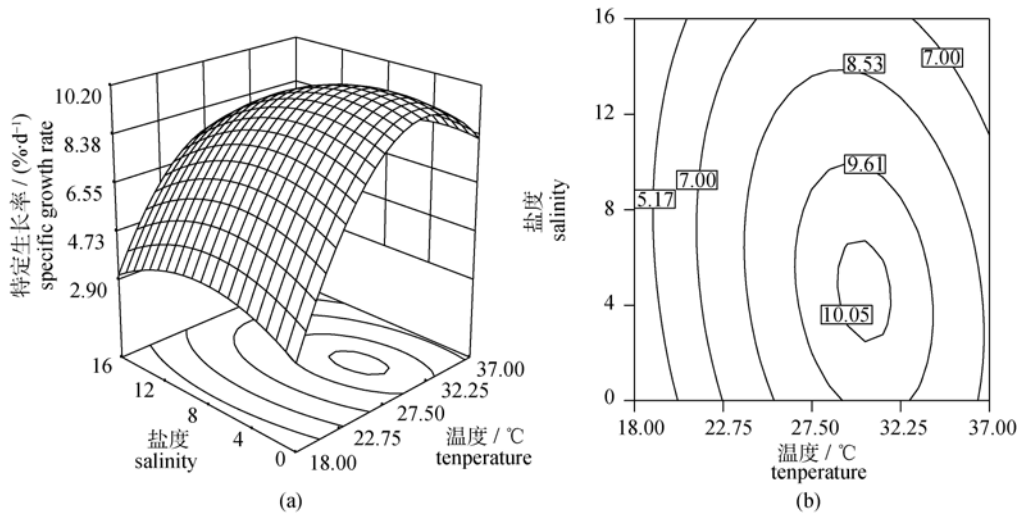


图 1 温度、盐度及其交互作用对吉富罗非鱼仔鱼特定生长率影响的响应面(a)和等高线(b)

Fig. 1 Response surface plot (a) and its contour plot (b) of the effect of temperature and salinity and their mutual interactions on specific growth rate of GIFT tilapia larvae

能用此模型解释，该模型拟合程度良好。

温度和盐度与存活率之间的响应曲面图及其等高线图(图 2-a、b)。本实验条件下，随着温度和盐度升高，存活率呈先上升后下降的变化趋势，温度 28.2℃和盐度 6.0 时，存活率较高，达到 91.59%，其可靠性可达 0.961。温度为 18℃时，仔鱼的存活率在盐度为 0 时较低；温度为 37℃时，

存活率在盐度为 16 时较低，仔鱼的存活率随温度与盐度的变化而改变。

2.3 响应优化

按照文献[18]的方法，对生长和存活同时优化，获得温度与盐度的最优组合为 29.1℃和 5.4，在此最优组合条件下，SGR 与存活率的最优预测值分别为 10.08%·d⁻¹和 91.34%，其可靠性达 0.973。

表 4 温度和盐度对仔鱼存活率的回归模型方差分析
Tab. 4 Analysis of variance for the effect of temperature and salinity on survival of larvae

变异源 source	平方和 sum of squares	自由度 df	均方 mean square	F	P
模型 model	1952.3117	5	390.4623	76.6572	< 0.0001
残差residual	35.6553	7	5.0936		
失拟 lack of fit	10.6428	3	3.5476	0.5673	0.6653
纯误差 pure error	25.0125	4	6.2531		
总和 total	1987.9670	12			

$R^2=0.9821$ Adj $R^2=0.9693$ (Adj R^2 为校正系数)

表 5 回归方程系数显著性检验
Tab. 5 Test of significance for regression coefficient

变异来源 source of Variation	回归系数 regression coefficient	标准误 standard error	置信下限 95%CI low	置信上限 95%CI high	P
intercept	90.8660	1.0093	88.4793	93.2527	
T	2.4773	0.7979	0.5905	4.3641	0.0172
S	-3.2630	0.7979	-5.1498	-1.3762	0.0046
T×S	-2.8333	1.1285	-5.5017	-0.1650	0.0403
T ²	-15.7457	0.8557	-17.7691	-13.7223	< 0.0001
S ²	-4.9949	0.8557	-7.0183	-2.9715	0.0006

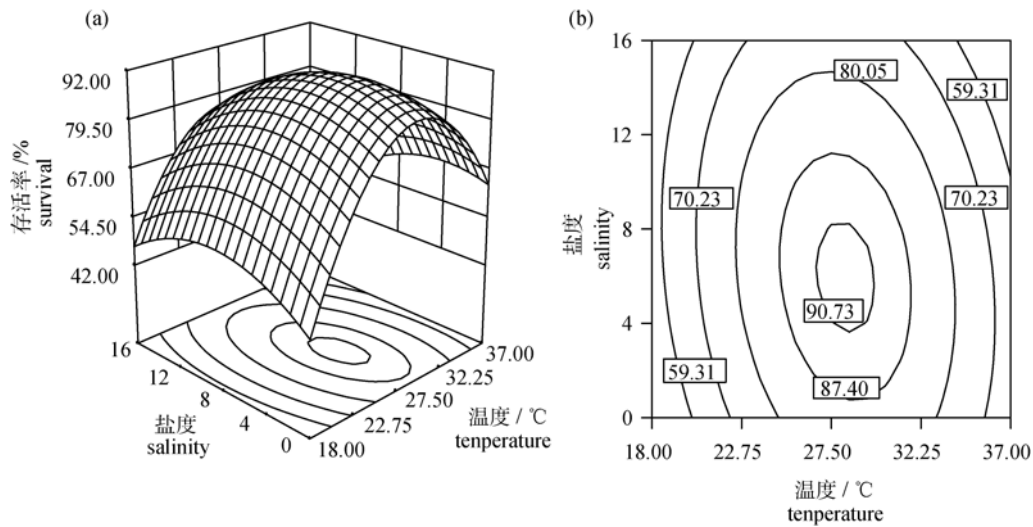


图 2 温度、盐度及其交互作用对吉富罗非鱼仔鱼存活率影响的响应面(a)和等高线(b)
Fig. 2 Response surface plot (a) and its contour plot (b) of the effect of temperature and salinity and their mutual interactions on survival of GIFT tilapia larvae

表 6 温度与盐度对吉富罗非鱼仔鱼特定生长率和存活率影响优化的置信区间
Tab. 6 Optimization of confidence interval of the effect of temperature and salinity on specific growth rate and survival of larval “GIFT” tilapia

响应值 reponse	预测值 prediction	平均标准误 mean standard error	95%置信下限 95%CI low	95%置信上限 95%CI high
特定生长率/(%·d ⁻¹) specific growth rate	10.0792	0.1513	9.7215	10.4369
存活率/% survival rate	91.3407	0.9843	89.0132	93.6683

3 讨论

鱼类生长和存活与环境因子的变化紧密相连^[19]。环境因子包括生物因子与非生物因子,生物因子指食物的摄取、个体的发育阶段、亲本的来源以及病害等;非生物因子通常指与水质有关的因子,如温度、盐度、pH、溶氧等。从本实验的研究结果可以看出,基于统计学意义的中心复合设计是一种十分有效的实现实验设计与过程优化的技术,以较小的实验次数同时考察多个因子,能够在实验条件范围内快速的接近目标函数的极值点,所得回归方程具有较高精度,可以保证预测的准确性。本实验中,温度与盐度对生长和存活的二次多项回归模型决定系数分别达到 0.979 6 和 0.982 1。

温度主要对鱼类代谢反应速度起控制作用^[20],在适温范围内,鱼类的代谢强度一般与温度成正比相关,而鱼类的生长和存活与机体的新陈代谢密切联系^[21]。实验中发现,当温度为 18~30℃时,仔鱼的 SGR 随着温度升高而升高,当仔鱼的体内环境与外界的环境相协调时,摄食能力较强,用于调节机体适应环境的能量和用于维持生命活动的那部分能量较少,而用于生长的能量较多,表现出生长速度加快^[22];温度高于 30℃时,罗非鱼的摄食量继续提高,但其 SGR 呈下降趋势,可能是因为环境温度超过了鱼类的适宜范围,仔鱼的活动强度增大,基础代谢旺盛,机体产生的能量很大程度用于供给活动需求,因而体内累积用于生长的能量将会减少,表现出生长下降。这与 Azaza 等^[8]对罗非鱼幼鱼的研究结论相似。罗非鱼属于亚热带水产动物,适宜温度较高的环境中生存,本实验条件下,盐度为 0~10,温度为 27~32℃时,仔鱼的存活率在 85%以上,升高或降低温度存活率都将下降。

生长速率对鱼类摄食活动的变化较为敏感,这也合理的解释了温度引起鱼类摄食节律的变化从而导致了生长的改变。Fuiman 和 Ottey^[23]研究发现,水温为 26℃时,美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)的游动能力显著高于 21℃时,游动能力的

增加可以提高鱼类搜寻食物的范围,摄食成功率也将随之提高。本实验中,水温由 18℃上升到 30℃时,较高的温度使罗非鱼仔鱼的摄食率得到提高,SGR 也相应提高。

与温度相比,在尼罗罗非鱼最适盐度的研究中,由于实验用鱼的规格、饲养条件的不同等,不同学者的结论之间可能存在一定差异。李学军等^[24]认为尼罗罗非鱼在淡水中拥有最佳生长速度,盐度为 10、20 和 30 时,生长速度显著下降;Chervinski^[25]研究发现,尼罗罗非鱼在半咸水(15)与淡水中时,生长速度没有差异,盐度为 7.5 时,其生长速度略优于淡水中的;Likongwe 等^[12]报道,盐度为 0、8 和 12 时,盐度对尼罗罗非鱼的生长速度没有显著影响,盐度为 16 时,其生长速度明显下降。本研究中,在最优温度范围内,盐度为 2~6 时,尼罗罗非鱼仔鱼的生长速度较快;盐度高于 8 时,生长速度显著降低。盐度通过改变糖酵解与磷酸戊糖的代谢途径,或对氨基酸代谢与氨氮排泄施加影响,从而使鱼类适应低渗与高渗环境中 Na^+ 浓度的改变^[26]。盐度为 2~6 可能更接近尼罗罗非鱼的等渗点,因此无需消耗额外能量维持渗透压平衡,血液与水环境之间的渗透压梯度较小,新陈代谢产生的能量不断地用于机体物质的积累与新组织的增生上,生长速率也会相应加快^[27]。盐度高于 8 时,对仔鱼的生长与存活有明显的抑制作用。当环境盐度对仔鱼生存产生胁迫时,由于渗透压调节耗能,通过提高鳃丝中的 $\text{Na}^+\text{-K}^+$ ATPase 活力,利用主动运输的方式将离子转运到水中,随着盐度梯度增加,需转运的离子数目增多,渗透调节所消耗的能量则上升^[28]。Gaumet 等^[29]、Woo 和 Chung^[30]、Morgan 和 Iwama^[31]研究发现虹鳟、条纹盖刺鱼(*Pomacanthus imperator*)、鲑鱼(*Oncorhynchus kisutch*)鳃丝中 Na^+ 含量随盐度升高而显著上升。Imsland 等^[32]发现,与高盐环境相比,比目鱼(*Hippoglossus hippoglossus*)饲养在低盐环境中时,渗透压调节能力与新陈代谢活力降低,能量消耗较少,因而有助于其更快生长。Fiess 等^[33]研究发现,随着盐度和温度上升,环境压力会导致莫桑比克罗非鱼(*O. mossambicus*)血液免疫

功能下降, 有机渗透调节物质含量上升; Lee 和 Fielder^[34]发现, 盐度高于 6.6 时, 草鱼(*Macrobrachium ausraliense*)血浆电解质(Na^+ 、 K^+ 等)浓度增加, 而盐度为 10.9 时, 血浆电解质浓度将失去控制。因此, 仔鱼长期生存在这种环境下, 其存活率可能会相应降低。而盐度较低时, 罗非鱼也必须从水中吸收盐类来维持体内渗透压的平衡。因此在实际生产中, 可以适当提高盐度来降低渗透调节所消耗的能量, 促进罗非鱼仔鱼快速生长。

环境因子变化时, 生物体依靠自身特有的平衡调控机制来进行适应性反应, 而这种反应可能包括不同水平的生化、生理与行为上的变化^[35]。本实验设计采用的中心复合设计法, 考察了温度与盐度的交互影响。首次发现, 温度与盐度对罗非鱼仔鱼的生长与存活有明显的互作效应。Magnussen 等^[15]研究发现, 温度对盐度的影响有调节作用, 温度改变时, 对盐度的需求也随之变化, 鱼类的等渗点随温度的变化而变化, 通常, 在温度适宜的条件下, 环境盐度在等渗点附近时, 用于进行渗透压调节和离子转运的能量较少, 新陈代谢产生的能量主要用于生长需求。本实验中, 温度或盐度对仔鱼生长和存活的影响都呈先上升后下降变化趋势, 结合图 1 与图 2 的响应曲面图对温度与盐度的共同效应进行考察发现, 随着温度变化, 生长与存活在不同盐度下具有最大值。温度为 18~20℃时, 仔鱼的 SGR 与存活率在盐度为 8~9 时较高; 随着温度上升, 27~32℃时, 盐度为 5~7 时较高; 高温环境时(35~37℃), 盐度在 4 左右, 生长与存活率较高。可能原因是, 低温环境中, 鱼类对盐度的耐受性较差, 适宜的盐度范围相对较窄; 随着温度的升高, 鳃丝中 Na^+ - K^+ AT-Pase 活力发生变化, 离子透过体液的强度增加, 鱼类调节渗透压的能力提高, 等渗点随之改变, 鱼类的能量代谢也会发生相应的变化, 从而导致生长速率的改变。Likongwe 等^[12]、Imsland 等^[13]、Malloy 和 Targett^[14]、Magnussen 等^[15]、Watanabe 等^[36]在研究温度与盐度互作效应时也发现了类似结论。温度效应对生长的影响较盐度明显, 而对存活率的影响则相反。本研究中, 温度与盐度

的二次效应对罗非鱼仔鱼的生长与存活也有显著影响, 说明温度与盐度对其的影响存在最优值。因此, 可以根据最优组合, 合理的控制养殖水体的温度与盐度将有效地提高罗非鱼的生产性能并提高养殖业的经济效益。

以往在研究环境因子对罗非鱼仔鱼生长与存活时, 采用单因子实验, 实验没有对因子间的协同效应与各因子二次效应进行考察, 因此无法给出最优因子组合。本实验采用中心复合设计—响应曲面法, 克服了传统正交设计与均匀设计所建立的数学模型预测性较差的问题, 建立温度与盐度对 SGR 和存活率的连续变量曲面模型, 二次多项回归方程的拟合度较好, 可以对生长与存活率进行很好的分析与预测。按照文献[18]的方法, 获得影响 SGR 与存活率的最佳条件: 温度 29.1℃和盐度 5.4, 仔鱼的 SGR 与存活率分别可达 10.08%·d⁻¹ 和 91.34%, 其可靠性为 0.973。

在实际生产中, 通过相关措施将温度与盐度控制在最佳水平是可行的, 如加注适当海水、利用锅炉加热等, 可使罗非鱼的生长潜能得到较好的发挥。同时应该注意到酸碱度、溶氧、氨氮、亚硝酸盐、光照、养殖密度等也是影响罗非鱼苗种培育的重要环境因子。

参考文献:

- [1] Ponce-Palafox J, Martínez-Palacios CA, Ross LG. The effects of salinity and temperature on the growth and survival rates of juvenile white shrimp, *Penaeus vannamei*, Boone, 1931[J]. Aquaculture, 1997, 157 (1-2): 107-115.
- [2] Suresh A V and Lin C K. Tilapia culture in saline waters: a review[J]. Aquaculture, 1992, 106(3-4): 201-226.
- [3] Payne A I and Collinson R I. A comparison of the biological characteristics of *Sarotherodon niloticus*(L.) with those of *Surotherodon nureus* (Steindachner) and other tilapia of the Delta and lower Nile[J]. Aquaculture, 1983, 30(1-4): 335-351.
- [4] Cataldi E, Crosetti D, Come G, et al. Morphological changes in the esophageal epithelium during adaptation to salinities in *Oreochromis mossambicus*, *O. niloticus* and their hybrid[J]. Journal of Fish Biology, 1988, 32(2): 191-196.
- [5] Watanabe WO, Kuo C M, Huang M C. The ontogeny of salinity tolerance in the tilapias *Oreochromis aureus*, *O.*

- niloticus*, and an *O. mossambicus*×*O. niloticus* hybrid, spawned and reared in freshwater[J]. *Aquaculture*, 1985, 47(4): 353–367.
- [6] Baras E, Jacobs B, M  lard C. Effect of water temperature on survival, growth and phenotypic sex of mixed (XX–XY) progenies of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*[J]. *Aquaculture*, 2001, 192(2–4): 187–199.
- [7] Azaza M S, Dhra  ef M N, Kra  em M M. Effects of water temperature on growth and sex ratio of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) reared in geothermal waters in southern Tunisia[J]. *J Therm Biol*, 2008, 33(2): 98–105.
- [8] 强俊, 王辉, 李瑞伟, 等. 盐度对奥尼罗非鱼仔、稚鱼生长存活及其消化酶活力的影响[J]. *南方水产*, 2009, 5(5): 8–14.
- [9] 王辉, 强俊, 李瑞伟. 温度对奥尼罗非鱼仔稚鱼生长-饲料利用和消化酶活力的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2008, 28(6): 14–18.
- [10] Doroudi M S, Southgate P C, Mayer R J. The combined effects of temperature and salinity on embryos and larvae of the black-lip pearl oyster, *Pinctada margaritifera* (L.) [J]. *Aquaculture Research*, 1999, 30(4): 271–277.
- [11] Mihelakakis A, Kitajima C. Effects of salinity and temperature on incubation period, hatching rate, and morphogenesis of the silver sea bream, *Sparus sarba* (Forsk  al, 1775) [J]. *Aquaculture*, 1994, 126(3–4): 361–371.
- [12] Likongwe J S, Stecko T D, Stauffer, J R, et al. Combined effects of water temperature and salinity on growth and feed utilization of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) [J]. *Aquaculture*, 1996, 146(1–2): 37–46.
- [13] Imsland A K, Foss A, Gunnarsson S, et al. The interaction of temperature and salinity on growth and food conversion in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. *Aquaculture*, 2001, 198(3–4): 353–367.
- [14] Malloy K D, Targett T E. Feeding, growth and survival of juvenile summer flounder *Paralichthys dentatus*: experimental analysis of the effects of temperature and salinity[J]. *Mar Ecol Progr Ser*, 1991, 72(4): 213–223.
- [15] Magnussen A B, Imsland A K, Foss A. Interactive effects of different temperatures and salinities on growth, feed conversion efficiency, and blood physiology in juvenile spotted wolffish, *Anarhichas minor* Olafsen[J]. *J World Aqu Soc*, 2008, 59(2): 804–811.
- [16] Hild  n M, Hirvi J P. The survival of larval perch, *Perca fluviatilis* L., under different combinations of acidity and duration of acid conditions, analyzed with a generalized linear model[J]. *J Fish Biol*, 1987, 30(6): 667–677.
- [17] 于杰, 邹梅娟, 郝秀华, 等. 中心复合设计法优化盐酸普罗帕酮缓释微丸包衣液处方[J]. *沈阳药科大学学报*, 2006, 11(23): 686–709.
- [18] Deniz B, Boyacı I H. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology[J]. *J Food Engin*, 2007, 78(3): 836–845.
- [19] Ferron A, Leggett WC. An appraisal of condition measures for marine fish larvae[C]. *Adv Mari Biol*, 1994, 30: 217–303.
- [20] 殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1993: 38–47.
- [21] Nurdiani R, Zeng CS. Effects of temperature and salinity on the survival and development of mud crab, *Scylla serrata* (Forssk  al), larvae[J]. *Aqu Res*, 2007, 38(14): 1529–1538.
- [22] Hephher B, Liao I C, Cheng S H, et al. Food utilization by red tilapia-effects of diet composition, feeding level and temperature on utilization efficiencies for maintenance and growth[J]. *Aquaculture*, 1983, 32(3–4): 255–275.
- [23] Fuiman L A, Ottey D R. Temperature effects on spontaneous behavior of larval and juvenile red drum *Sciaenops ocellatus*, and implications for foraging[J]. *Fish Bull US*, 1992, 91(1): 23–35.
- [24] 李学军, 李思发, 么宗利, 等. 不同盐度下尼罗罗非鱼、萨罗罗非鱼和以色列红罗非鱼幼鱼生长、成活率及肥满系数的差异[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(3): 245–251.
- [25] Chervinski J. Laboratory experiments on the growth of *Tilapia nilotica* in various saline concentrations[J]. *Bamidgeh*, 1961, 13(1): 8–14.
- [26] Heinle D R, Vernberg F J, Vernberg W B. Functional Adaptations of Marine Organisms[C]. New York: Academic Press, 1981: 85–136.
- [27] MIS de Bravo. Influence of salinity on the physiological conditions in mussels, *Perna perna* and *Perna viridis* (Bivalvia: Mytilidae) [J]. *Revista de Biologia Tropical*, 2003, 51(4): 153–158.
- [28] Sardella B A, Cooper J, Gonzalez R J, et al. The effect of temperature on juvenile Mozambique tilapia hybrids (*Oreochromis mossambicus*×*O. urolepis hornorum*) exposed to full-strength and hypersaline seawater[J]. *Compar Biochem Physiol*, 2004, 137(4): 621–629.
- [29] Gaumet F G, Boeuf A, Severe A, et al. Effects of salinity on the ionic balance and growth of juvenile turbot[J]. *J Fish Biol*, 1995, 47(5): 865–876.
- [30] Woo N Y S, Chung K C. Tolerance of *Pomacanthus imperator* to hypoosmotic salinities: changes in body composition

- and hepatic enzyme activities[J]. J Fish Biol, 1995, 47(1): 70–81.
- [31] Morgan J D, Iwama G K. Salinity effects on oxygen consumption, gill Na^+ , K^+ -ATPase and ion regulation in juvenile coho salmon[J]. J Fish Biol, 1998, 53(5): 1110–1119.
- [32] Imsland A K, Gústavsson A, Gunnarsson S, et al. Effects of reduced salinities on growth, food conversion efficiency and blood physiology in juvenile Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) [J]. Aquaculture, 2008, 274(2-4): 254–259.
- [33] Fiess J C, Kunkel-Patterson A, Mathias L, et al. Effects of environmental salinity and temperature on osmoregulatory ability, organic osmolytes, and plasma hormone profiles in the Mozambique tilapia (*Oreochromis mossambicus*) [J]. Compar Biochem Physiol, 2007, 146(2): 252–264.
- [34] Lee C L, Fielder D R. The effect of salinity and temperature on the larval development of the freshwater prawn, *Macrobrachium ausraliense* Holthuis, 1950 from south eastern Queensland, Australia[J]. Aquaculture, 1981, 26(1-2): 167–172.
- [35] Spanopoulos-Hernández M, Martínez-Palacios CA, Vane-gas-Pérez RC, et al. The combined effects of salinity and temperature on the oxygen consumption of juvenile shrimps *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874) [J]. Aquaculture, 2005, 244(1-4): 127–138.
- [36] Watanabe W O, Ernst D H, Chasar M P, et al. The effects of temperature and salinity on growth and feed utilization of juvenile, sex-reversed male Florida red tilapia cultured in a recirculating system[J]. Aquaculture, 1993, 112(4): 309–320.

Combined effects of temperature and salinity on growth and survival of (GIFT) Nile tilapia larvae (*Oreochromis niloticus*)

QIANG Jun¹, XU Pao^{1,2}, HE Jie², LI Ruiwei³

1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;

2. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture, Freshwater Fisheries Research Center of Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;

3. Maonan Sango Tilapia Breeding Base, Maoming 525024, China

Abstract: We evaluated the effects of temperature and salinity on specific growth rate (SGR) and survival of Nile tilapia larvae (*Oreochromis niloticus*). We used response surface methodology (RSM) based on a two-factor Central Composite Rotatable Design (CCD) of experiments to optimize the level of these two factors within the range 18–37°C and 0–16. The linear and quadratic effects of temperature and salinity had a significant effect on SGR and survival ($P < 0.05$). larval growth and survival increased then decreased with as temperature or salinity increased. In addition, the interaction between temperature and salinity had a significant effect on growth and survival ($P < 0.05$). SGR and survival were higher at 18–20°C between salinities 8 and 9 and at 27–32°C between salinities 5 and 7. In contrast, SGR and survival were higher at ~salinity 4 at between 35–37°C. The resulting formula was corrected for its coefficient of determination, yielding values of 0.979 6 and 0.982 1 ($P < 0.01$), and had good predictive value. Temperature had a great influence on SGR than salinity, whereas the pattern was reversed for survival. Solving the regression equation for temperature equal to 29.1°C and salinity equal to 5.4, the optimum predicted value for specific growth rate and survival is 10.08%·d⁻¹ and 91.34%, respectively (value of desirability is 0.973). Thus, our data suggest the growth and survival of tilapia larvae can be improved by rearing the species at an optimal combination of temperature and salinity

Key words: *Oreochromis niloticus*; larvae; growth; survival; central composite design; response surface

Corresponding author: XU Pao. E-mail: xup@ffrc.cn