

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2013.00116

水温、饲料蛋白及其互作效应对吉富罗非鱼生长与血清能源物质的影响

强俊^{1,2}, 杨弘^{1,2}, 王辉³, 徐跑^{1,2}, 何杰¹

1. 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;

2. 南京农业大学 无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;

3. 广东海洋大学 水产学院, 广东 湛江 524025

摘要: 采用中心复合实验设计和响应曲面分析方法, 在实验室条件下, 探讨了温度(20~34℃)、饲料蛋白水平(25%~50%)及其互作效应对吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)幼鱼生长、饲料效率与血清能源物质(葡萄糖、甘油三酯和总蛋白)的影响。整个实验持续 8 周。结果表明, 温度与饲料蛋白水平的一次效应对特定生长率和饲料效率有显著影响($P<0.05$)。高温与饲料高蛋白水平会降低生长与饲料效率。温度的一次效应对血清葡萄糖、甘油三酯和总蛋白水平有显著影响($P<0.05$)。饲料蛋白水平为 37.5%时, 随温度的升高, 血清葡萄糖水平逐渐增加; 甘油三酯和总蛋白水平呈先下降后上升的变化。饲料蛋白水平对血清葡萄糖有显著影响($P<0.05$), 但对甘油三酯和总蛋白水平无显著影响($P>0.05$)。温度与饲料蛋白水平的互作效应对饲料效率、血清葡萄糖、甘油三酯和总蛋白有显著影响($P<0.05$)。温度对生长、饲料效率和血清甘油三酯与总蛋白水平的影响较饲料蛋白明显, 而对血清葡萄糖的效应则与之相反。因子与特定生长率、饲料效率、血清葡萄糖、甘油三酯及总蛋白水平这 5 项响应值间二次多项回归方程的决定系数分别达到 0.958、0.955、0.971、0.977 和 0.870($P<0.01$), 可用于预测。综合以上实验结果, 温度/饲料蛋白水平最优组合为 29.9℃/40.3%, 此时, 特定生长率和饲料效率均较高, 分别为 2.748%/d 和 0.775, 其可靠性达 0.888。不同饲料蛋白水平下, 水温对吉富罗非鱼血清代谢物质的影响也不同, 增加水温有助于更好地利用饲料蛋白, 提高血清中蛋白的分解与转化。

关键词: 吉富罗非鱼; 水温; 饲料蛋白; 生长; 葡萄糖; 甘油三酯; 总蛋白

中图分类号: S917.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2013)01-0116-13

温度是影响鱼类摄食与代谢的重要环境因子之一^[1-2]。蛋白质在饲料中所占比重较大, 对鱼类的生长与代谢也有明显影响^[3]。Singh 等^[4]研究发现, 在水温为 28~32℃时, 麦瑞加拉鲈 (*Cirrhinus mrigala*)的饲料中蛋白需求水平为 36%, 而蛋白质利用率在饲料蛋白水平为 28%时较高; 欧洲鲈 (*Dicentrarchus labrax*)在 15℃和 20℃水温下最优饲料蛋白水平均为 50%, 然而 20℃时蛋白质利用

与摄食率明显高于 15℃时的^[5]。升高温度有助于提高鱼类的能量代谢。关于不同水温与饲料蛋白水平对罗非鱼的影响方面, 仅见 Musuka 等^[6]对伦氏罗非鱼(*Tilapia rendalli*)的研究。Musuka 等^[6]研究发现, 饲料蛋白水平为 30%时, 伦氏罗非鱼在水温为 26℃时生长较快, 而蛋白水平为 40%时, 伦氏罗非鱼在 30℃时生长较优。葡萄糖、甘油三酯与总蛋白是机体糖类、脂肪与蛋白质代谢后存

收稿日期: 2012-03-07; 修订日期: 2012-04-17.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD26B00); 现代农业产业技术体系建设专项资金“罗非鱼产业技术体系”(CARS-49); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX11-0708); 中央公益性科研业务费专项资金项目(2011jbf09); 广东省海洋渔业科技推广专项项目(A201009C02, A2010002-010(b)), 广东省科技计划项目(2010B090500032).

作者简介: 强俊(1984-), 男, 博士研究生, 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

在于血液中的主要形式,反映了鱼类对于饲料营养的摄取、消化与吸收。饲料中高蛋白水平可以增加氮排泄、糖原异生与血浆和肝中游离氨基酸含量^[7]。Abdel-Tawwab 等^[8]研究发现,尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)血清葡萄糖与总蛋白水平随饲料蛋白(25%~45%)上升而上升,而血清脂肪水平无变化。Vieira 等^[7]研究发现,饲料蛋白水平为 20%~41%时,头石脂鲤(*Brycon cephalus*)血清葡萄糖水平随饲料蛋白水平的上升而上升,甘油三酯与总蛋白在蛋白水平为 41%时显著下降。大盖巨脂鲤(*Colossoma macropomum*)血浆中葡萄糖与游离脂肪酸水平在投喂高蛋白饲料后明显上升,而氨基酸呈下降变化^[9]。镜鲤(*Cyprinus specularis*)血清葡萄糖与总蛋白水平随饲料蛋白的上升而上升,而甘油三酯水平无明显变化^[10]。水温可以调节鱼类对饲料蛋白的吸收与利用^[11-12]。不同水温下,鱼类可以通过调节体内相关酶的活性来改变能量代谢模式^[8,13],从而影响鱼类生长及其饲料利用。因此,水温与饲料蛋白水平对鱼体的生长与能量响应可能存在互作效应,这在以往的研究中尚未发现。

罗非鱼作为中国南方地区主要养殖的淡水鱼类之一,其产业化发展在促进渔业增产与渔民增收上发挥着重要作用。罗非鱼的健康养殖依赖于适宜的营养状况和饲养环境。本研究旨在分析不同水温下饲料蛋白水平对吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)生长和饲料利用以及血清葡萄糖、甘油三酯与总蛋白水平的响应,并对水温与饲料蛋白的互作与二次效应进行了探讨,建立了相关曲面模型。本研究可以为提高罗非鱼饲料蛋白的利用与健康养殖提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验用鱼

实验鱼采自中国水产科学研究院淡水渔业研究中心宜兴基地自繁的第十六代“吉富”品系尼罗罗非鱼幼鱼,选择无病无伤,活力强的个体作为实验用鱼。实验前在室内水泥池(水温 $27^{\circ}\text{C}\pm 0.3$, pH 7.4 ± 0.2)中暂养 10 d,采用自然光周期。暂养期间使用循环水连续充气,每天 7:00、11:00 和

16:00 各投喂沉水性饲料 1 次(粗蛋白质为 37.5.0%、脂肪 8.0%),投喂量为体质量的 8%。

1.2 实验设计与分组

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、饲料效率与血清葡萄糖、甘油三酯和总蛋白,因子为温度($20\sim 34^{\circ}\text{C}$)和饲料蛋白水平(25%~50%),分别以 T 和 P 表示,每个因子的实验水平编码分别为 $-\alpha$ 、 -1 、 0 、 1 、 α (表 1),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。具体的温度和饲料蛋白水平组合见表 1。

1.3 实验鱼的驯化

实验自 2011 年 11 月 1 日起到 2011 年 12 月 26 日,共计 8 周。实验鱼先进行温度驯化,驯化在 1.2 m^3 塑料桶中进行,用电子恒温棒(量程为 $18\sim 36^{\circ}\text{C}$)控温,温差为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。温度驯化采用渐进方式,每天温度升降幅不超过 2°C 。驯化至相应的温度后,在此设置下饲养 7 d。

1.4 实验方法

实验在 39 个 1.2 m^3 塑料桶中进行,每个塑料桶添加曝气 3 d 后的自来水 1 m^3 ,每个实验桶放置 1 个 300 W 的潜水泵,用于水体的循环与过滤。调节至相应的温度,实验开始前对幼鱼的体质量和体长进行测量。实验用鱼平均体质量为 $(27.64\pm 2.79)\text{ g}$,体长为 $(9.43\pm 0.46)\text{ cm}$,每个实验组合共放置 45 尾鱼,每个平行组各 15 尾鱼。各组初始体质量和体长没有显著差异($P>0.05$)。按照表 1 的组合投喂不同的蛋白水平饲料,每次定量投喂(保证桶底无饲料残留),日投喂量为体质量的 6%~8%。饲料营养成分与组成如表 2 所示。实验期间连续充气,采用虹吸法清除桶底粪便,日换水量 1/3,保持换水前后温差不得超过 ± 0.3 ,溶氧保持在 5 mg/L 以上, pH 7.6 ± 0.2 ,氨氮和亚硝酸盐不高于 0.01 mg/L ,自然光周期。

1.5 响应指标测定

实验结束后停饲 24 h,次日对每个实验组合的全部实验用鱼进行体质量测量,测量前用 200 mg/L 的 MS-222 作快速深度麻醉。

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

表 1 温度-饲料蛋白水平实验组合与响应值
Tab. 1 Experimental design of temperature-dietary protein level combinations and response observations

$\bar{x} \pm SD$

组数 run	编码值 code		实际值 actual		特定生长率/ (%·d ⁻¹) SGR	饲料效率 FE	葡萄糖/ (mmol·L ⁻¹) glucose	甘油三酯/ (mmol·L ⁻¹) triglyceride	总蛋白/ (g·L ⁻¹) total protein
	T	P	T/℃	P/%					
1	0	0	27.0	37.5	2.62±0.76	0.99±0.21	28.62±2.43	2.454±0.147	0.757±0.068
2	-1	-1	22.1	28.7	2.21±0.44	1.08±0.17	28.12±2.31	1.501±0.102	0.436±0.032
3	0	-α	27.0	25.0	2.23±0.57	0.89±0.16	30.83±3.47	1.989±0.151	0.576±0.042
4	0	0	27.0	37.5	2.71±0.45	1.04±0.11	29.39±2.82	2.503±0.217	0.782±0.071
5	-1	1	22.1	46.3	2.50±0.61	0.85±0.13	33.24±3.81	1.764±0.146	0.605±0.055
6	0	0	27.0	37.5	2.74±0.39	1.09±1.18	28.91±2.71	2.378±0.152	0.803±0.063
7	0	α	27.0	50.0	3.25±0.40	0.62±0.08	31.60±3.28	2.484±0.163	0.703±0.072
8	0	0	27.0	37.5	2.58±0.43	0.95±0.22	27.54±2.29	2.526±0.231	0.752±0.061
9	α	0	34.0	37.5	3.23±0.37	1.42±0.16	29.52±3.05	2.330±0.205	0.629±0.047
10	-α	0	20.0	37.5	2.34±0.41	1.27±0.19	33.00±2.91	1.408±0.107	0.391±0.026
11	1	1	31.9	46.3	4.07±0.59	2.30±0.23	25.72±1.79	2.991±0.271	0.683±0.055
12	0	0	27.0	37.5	2.77±0.49	1.02±0.14	30.11±2.68	2.597±0.219	0.741±0.058
13	1	-1	31.9	28.7	2.33±0.31	1.58±0.18	30.68±3.21	2.570±0.248	0.772±0.073

注: α为星号臂, |α|=1.414 21.
Note: α is star arm, and |α|=1.414 21 for this experimental design.

表 2 饲料营养成分与组成
Tab. 2 Ingredients and composition of experimental diets

	饲料蛋白水平/% dietary protein level				
	25.0	28.7	37.5	46.3	50.0
原料 ingredients					
鱼粉 fish meal	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
酪蛋白 casein	4.00	7.60	16.20	23.80	27.50
明胶 gelatin	1.00	1.90	4.05	5.95	6.88
玉米淀粉 corn starch	36.80	32.30	21.55	12.05	7.42
鱼油+豆油(1:1) fish oil + soybean oil(1 1)	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
豆粕 soybean meal	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
棉粕 cottonseed meal	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
菜粕 rapeseed meal	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
复合维生素 vitamin premix	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
复合矿物盐 mineral premix	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
氯化胆碱 choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
维 C 磷酸酯钠 vitamin C phosphate ester	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
组成成分 proximate composition					
干物质 dry matter	91.57	91.68	91.74	91.94	92.05
蛋白 crude protein	25.16	28.95	38.04	46.09	49.92
脂肪 crude lipid	7.87	7.89	7.93	7.97	7.99
灰分 ash	6.23	6.38	6.64	6.87	6.92
总能量 gross energy	12.90	12.97	13.12	13.26	13.31

注: 复合维生素与复合矿物盐由广州市诚一水产科技有限公司提供。
Note: Vitamin premix and mineral premix were provided by Guangzhou Chengyi Aquatic Science & Technology Co., Ltd.

饲料效率(FE)=(W₂ - W₁) / F

式中: W₁、W₂ 为起始时间 t₁、终末时间 t₂ 时的体质量(g)、F 为总投饵量(g)。每个养殖桶随机选取 5 尾鱼, 尾静脉采血。血样于 4℃ 冰箱中静置 2 h, 在 4℃, 3 500 g 离心 10 min 制备血清, 上清液移置 -80℃ 冰箱中保存备用。血清总蛋白的测定采用双缩脉比色法, 葡萄糖的测定采用葡萄糖氧化酶法, 甘油三脂的测定采用酶法。血清总蛋白、葡萄糖与甘油三脂均在罗氏 cobas c 311 全自动生化分析仪上测定, 试剂盒购于南京建成生物工程研究所。

1.6 数据分析

数据测定结果用平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$) 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:

$\hat{Y} = b_0 + b_1T + b_2P + b_3T \times P + b_4T^2 + b_5P^2$

式中, $\hat{Y}$ 为响应预测, 在此响应为特定生长率、饲料效率与血清葡萄糖、甘油三酯和总蛋白; b₀、b₁、b₂、b₃、b₄、b₅ 分别为回归常数、温度与饲料蛋白水平的一次效应、温度与饲料蛋白水平间互作效应、温度与饲料蛋白水平的二次效应。

采用 STATISTICA 8.0 软件进行实验设计与结果处理, 对温度、饲料蛋白水平与响应值进行二次多项回归拟合。当 P<0.05 时认为差异显著, P<0.01 时认为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 温度与饲料蛋白水平对吉富罗非鱼幼鱼生长的影响

实验期间各实验组均未发现死鱼。温度(T)与

饲料蛋白水平(P)对罗非鱼幼鱼特定生长率(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, 回归方程系数的显著性检验结果列于表 3。模型 P=0.0001<0.01, 表明所建立的回归模型极显著; 失拟项 P=0.0993>0.05, 表明拟合的模型有效。T 的一次与二次效应、P 的一次效应对 SGR 有极显著影响(P<0.01), P 的二次和 T、P 互作(T×P)对 SGR 无显著影响(P>0.05)。回归系数显示, 温度的效应较饲料蛋白水平明显。T 和 P 与 SGR 之间的实际二次回归方程:

$$SGR = -8.808 + 0.583T + 0.093P + 0.001T \times P - 0.01T^2 - 0.001P^2 \tag{1}$$

该方程的决定系数 R²=0.958, 说明该模型能解释 95.8%响应值的变化, 仅有总变异的 4.2%不能用此模型解释, 该模型拟合程度良好。

温度和饲料蛋白水平与 SGR 之间的响应曲面图如图 1 所示。通过该组动态图可评价实验因素对幼鱼生长的两两交互作用。本实验条件下, 随着温度升高, SGR 呈先上升后下降的变化趋势。饲料蛋白水平为 37.5%时, 幼鱼在水温为 31~33℃ 环境下生长较快。当饲料蛋白水平为 25%~45%时, SGR 随蛋白水平的升高而升高, 饲料蛋白水平高于 45%时, SGR 缓慢下降。水温为 27℃时, 饲料蛋白水平为 45%时, 幼鱼的 SGR 为 2.565 %/d, 显著高于 25%时的 1.989 %/d (P<0.05)。温度和饲料蛋白水平对 SGR 无互作效应(P>0.05)。

2.2 温度与饲料蛋白水平对吉富罗非鱼幼鱼饲料效率的影响

温度(T)与饲料蛋白水平(P)对罗非鱼幼鱼饲

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
截距 intercept	2.492	0.056	2.358	2.625	
T	0.485	0.045	0.380	0.591	< 0.0001
P	0.173	0.045	0.068	0.278	0.0060
T×P	0.040	0.063	-0.110	0.189	0.5506
T ²	-0.235	0.048	-0.348	-0.122	0.0017
P ²	-0.102	0.048	-0.215	0.011	0.0710

注: 表中系数为因子编码水平下的估计, 下同。
Note: coefficient in table represent estimate of coded factors. The same as below.

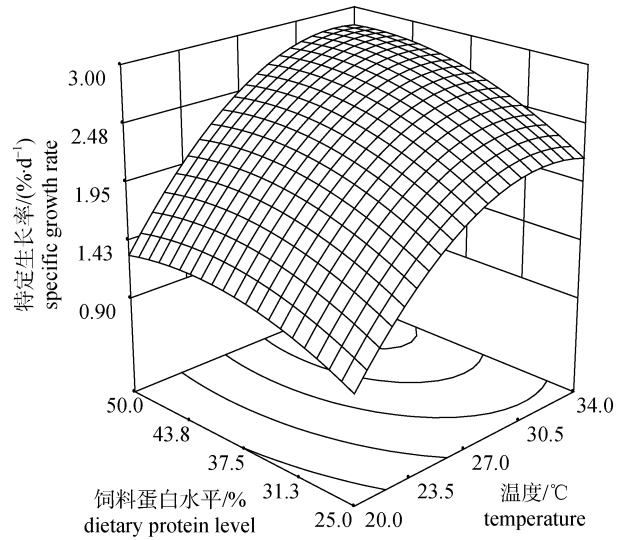


图 1 温度、饲料蛋白水平及其交互作用对吉富罗非鱼幼鱼特定生长率影响的响应面图

Fig. 1 Response surface plot of the effect of temperature and dietary protein level and their mutual interactions on specific growth rate of juvenile GIFT tilapia

料效率(FE)的测定结果如表 1 所示, 对数据采用最小二乘法进行回归拟合, 回归方程系数显著性检验结果列于表 4。模型 $P=0.0001<0.01$, 表明所建立的回归模型极显著; 失拟项 $P=0.1231>0.05$, 表明拟合的模型有效。 T 的一次效应、 P 和 T 的二次效应与 $T\times P$ 对 FE 有极显著影响($P<0.01$), P 的一次效应对 FE 有显著影响($P<0.05$)。回归系数显示, 温度的效应较饲料蛋白水平明显。 T 和 P 与 FE 之间的实际二次回归方程:

$$FE=-5.758+0.331T+0.093P-0.002T\times P-0.005T^2-0.001P^2 \quad (2)$$

该方程的决定系数 $R^2=0.955$, 说明该模型能解释 95.5%响应值的变化, 仅有总变异的 4.5%不

能用此模型解释, 该模型按拟合程度良好。

温度和饲料蛋白水平与 FE 的响应曲面见图 2。本实验条件下, 饲料蛋白水平为 37.5%, 温度为 20~29℃时, 随着温度升高, FE 呈上升趋势。温度对 FE 有极显著影响($P<0.05$), 温度高于 29℃时, FE 明显下降; 温度为 27℃, 饲料蛋白水平为 25%~40%时, FE 逐渐升高, 蛋白水平高于 40%时, FE 开始下降。温度和饲料蛋白水平的互作效应对 FE 有极显著影响($P<0.01$), 不同水温下, 罗非鱼对饲料蛋白的利用率有所不同。

2.3 温度与饲料蛋白水平对吉富罗非鱼幼鱼血清葡萄糖水平的影响

不同温度(T)与饲料蛋白水平(P)组合下, 罗非鱼幼鱼血清葡萄糖水平(Glu)的测定结果见表 1, 对数据采用最小二乘法进行回归拟合, 回归方程系数显著性检验结果列于表 5。模型 $P<0.01$, 表明所建立的回归模型极显著; 失拟项 $P=0.1322>0.05$, 表明拟合的模型有效。 T 和 P 的一次效应与 $T\times P$ 对 Glu 有极显著影响($P<0.01$), T 与 P 的二次效应对 Glu 无显著影响($P>0.05$)。回归系数显示, 饲料蛋白的效应较温度明显。 T 和 P 与 Glu 之间的实际二次回归方程(3):

$$Glu=9.4017+0.356T-0.205P+0.0085T\times P+0.0022T^2+0.0004P^2 \quad (3)$$

该方程的决定系数 $R^2=0.971$, 说明该模型能解释 97.1%响应值的变化, 仅有总变异的 2.9%不能用此模型解释, 该模型拟合程度良好。

由图 3 可见, 本实验条件下, 随着水温与饲料蛋白水平的升高, Glu 均呈显著上升趋势。温度与饲料蛋白水平的互作效应对血清 Glu 有显著影

表 4 回归方程系数显著性检验

Tab. 4 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	0.767	0.016	0.728	0.806	
T	0.094	0.013	0.063	0.124	0.0002
P	0.032	0.013	0.002	0.063	0.0404
T×P	-0.065	0.018	-0.108	-0.021	0.0096
T ²	-0.116	0.014	-0.149	-0.083	<0.0001
P ²	-0.051	0.014	-0.084	-0.019	0.0076

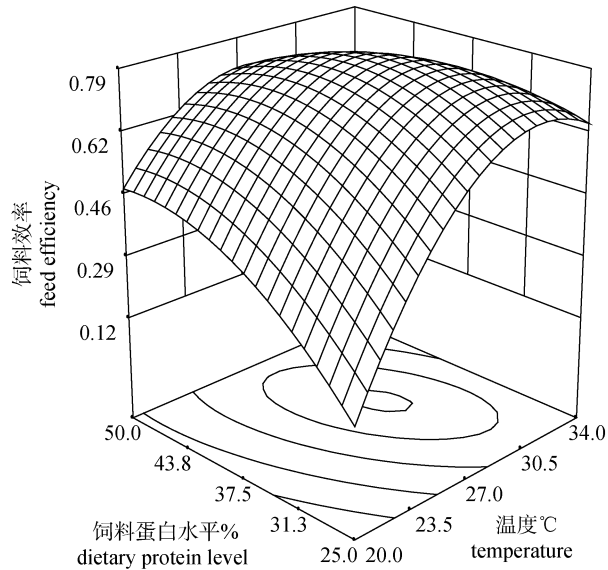


图 2 温度、饲料蛋白水平及其交互作用对吉富罗非鱼幼鱼饲料效率影响的响应面图

Fig. 2 Response surface plot of the effect of temperature and dietary protein level and their mutual interactions on feed efficiency of juvenile GIFT tilapia

响($P<0.05$)。低温时, 血清 Glu 水平在饲料蛋白水平为 25%~50%范围内无明显变化; 随着温度上升, 血清 Glu 水平随饲料蛋白水平的升高而显著上升。饲料蛋白水平为 25%~26%时, 随着温度上升, 血清 Glu 水平呈下降趋势; 蛋白水平为 26%~30%时, 温度对血清 Glu 水平没有显著影响; 然而, 蛋白水平高于 30%时, 血清 Glu 水平随温度升高而上升。

2.4 温度与饲料蛋白水平对吉富罗非鱼幼鱼血清甘油三酯水平的影响

温度(T)与饲料蛋白水平(P)对罗非鱼幼鱼血清甘油三酯水平(TG)的测定结果见表 1, 对数据采用最小二乘法进行回归拟合, 回归方程系数显

著性检验结果列于表 6。模型 $P<0.01$, 表明所建立的回归模型极显著; 失拟项 $P=0.1378>0.05$, 表明拟合的模型有效。 T 的一次与二次效应对 TG 有极显著影响($P<0.01$), $T\times P$ 对 TG 有显著影响($P<0.05$); P 的一次与二次效应对 TG 无显著影响($P>0.05$)。回归系数显示, 温度的效应较饲料蛋白明显。 T 和 P 与 TG 之间的实际二次回归方程:

$$\text{TG}=10.6347-0.7619T-0.0078P+0.0025T\times P+0.0136T^2-0.0008P^2 \quad (4)$$

该方程的决定系数 $R^2=0.977$, 说明该模型能解释 97.7%响应值的变化, 仅有总变异的 2.3%不能用此模型解释, 该模型拟合程度良好。

温度和饲料蛋白水平与血清 TG 之间的响应曲面图见图 4。本实验条件下, 水温为 27℃时, 随着饲料蛋白水平的升高, TG 水平呈先上升后下降的变化趋势。饲料蛋白水平为 37.5%时, TG 水平随水温的上升呈先下降后上升的变化。温度和饲料蛋白水平的互作效应对血清 TG 有显著影响($P<0.05$)。低温时, 血清 TG 水平随饲料蛋白水平的上升呈下降趋势; 随着温度上升, TG 水平随饲料蛋白水平的升高呈先上升后下降的变化。不同蛋白水平下, 血清 TG 水平随水温的升高均呈先下降后上升的变化。

2.5 温度与饲料蛋白水平对吉富罗非鱼幼鱼血清总蛋白水平的影响

温度(T)与饲料蛋白水平(P)对罗非鱼幼鱼血清总蛋白水平(TP)的测定结果见表 1, 对数据采用最小二乘法进行回归拟合, 回归方程系数的显著性检验结果列于表 7。模型 $P=0.005\ 3<0.01$, 表明所建立的回归模型极显著; 失拟项 $P=0.393\ 3>0.05$, 表明拟合的模型有效。 T 的一次效应对 TP

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
截距 intercept	2.684	0.052	2.562	2.806	
T	0.371	0.041	0.274	0.467	<0.0001
P	0.435	0.041	0.338	0.531	<0.0001
$T\times P$	0.364	0.058	0.227	0.500	0.0004
T^2	0.054	0.044	-0.049	0.158	0.2563
P^2	0.031	0.044	-0.072	0.135	0.5002

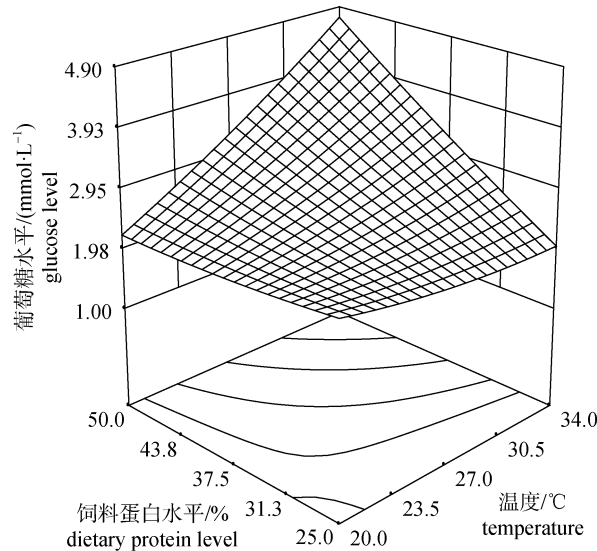


图 3 温度、饲料蛋白水平及其交互作用对吉富罗非鱼幼鱼血清葡萄糖水平的响应面图

Fig. 3 Response surface plot of the effect of temperature and dietary protein level and their mutual interactions on serum glucose level of juvenile GIFT tilapia

有显著影响($P<0.05$), $T\times P$ 对 TP 有极显著影响($P<0.01$); P 的一次效应与 T 和 P 的二次效应对 TP 无显著影响($P>0.05$)。回归系数显示, 温度的效应较饲料蛋白明显。 T 和 P 与 TP 之间的实际二次回归方程:

$$TP=15.7185+0.0393T+0.8091P-0.0576T\times P+0.0347T^2+0.0106P^2 \quad (5)$$

该方程的决定系数 $R^2=0.870$, 说明该模型能解释 87%响应值的变化, 仅有总变异的 13%不能用此模型解释, 该模型拟合程度良好。

温度和饲料蛋白水平与血清 TP 之间的响应曲面图见图 5。本实验条件下, 水温为 27℃时, 随着饲料蛋白水平的升高, TP 水平呈先下降后上升

的变化趋势。饲料蛋白水平为 37.5%时, TP 水平随水温的上升也呈先下降后上升的变化, 温度为 30~31℃时, 血清 TP 水平较低。温度和饲料蛋白水平的互作效应对血清 TP 有显著影响($P<0.05$)。随饲料蛋白水平的增加, 低温时, 血清 TP 水平呈上升趋势; 随着温度上升, 血清 TP 水平呈先下降后上升的变化; 而温度为 34℃时, 血清 TP 水平呈逐渐下降变化。饲料蛋白水平为 25%~29%时, 随水温的上升, 血清 TP 水平呈逐渐上升趋势; 蛋白水平为 29%~33%时, 血清 TP 水平呈先下降后上升的变化趋势, 但此时, 温度对其无显著影响($P>0.05$); 蛋白水平高于 33%时, 血清 TP 水平随温度的升高呈下降趋势。

2.6 响应优化

参考 Montgomery^[14]的方法, 对生长和饲料效率同时优化, 获得温度与饲料蛋白水平的最优组合为 29.9℃和 40.3%, 在此最优组合条件下, 特定生长率与饲料效率的最优预测值分别为 2.748%/d 和 0.775, 其可靠性达 0.888(表 8)。

3 讨论

3.1 水温、饲料蛋白水平及其交互作用对吉富罗非鱼生长与饲料效率的影响

水温对鱼类食物消耗有重要影响, 较高的温度有助于提高鱼类的摄食和饲料利用, 促进肠道的消化和吸收^[6]。本研究中, 水温的变化对罗非鱼的生长和饲料效率有显著影响, 饲料蛋白水平为 37.5%, 水温为 27℃时, 罗非鱼的特定生长率为 2.378~2.597%/d, 饲料效率为 0.741~0.803, 显著高于水温为 20℃时的 1.408%/d 和 0.391%。这

表 6 回归方程系数显著性检验
Tab. 6 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	<i>P</i>
截距 intercept	1.018	0.033	0.939	1.097	
<i>T</i>	0.311	0.026	0.249	0.374	< 0.0001
<i>P</i>	-0.016	0.026	-0.079	0.046	0.5519
$T\times P$	0.108	0.037	0.020	0.196	0.0228
T^2	0.332	0.028	0.265	0.399	< 0.0001
P^2	-0.063	0.028	-0.130	0.003	0.0596

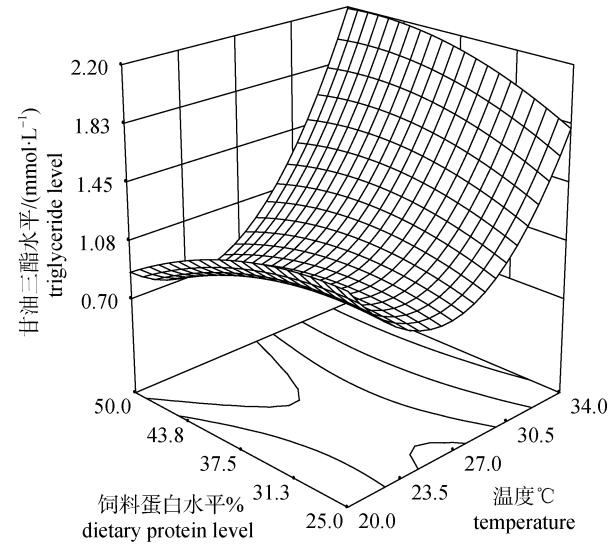


图 4 温度、饲料蛋白水平及其交互作用对吉富罗非鱼幼鱼血清甘油三酯水平的响应面图

Fig 4 Response surface plot of the effect of temperature and dietary protein level and their mutual interactions on serum triglyceride level of juvenile GIFT tilapia

与 Musuka 等^[6]的研究结论类似。响应曲面分析表明, 蛋白水平为 37.5%时, 水温在 30.2℃, 罗非鱼幼鱼生长与饲料效率同时达到最优, 分别为 2.706%/d 和 0.779, 可靠性为 0.879。这在 Popma 等^[15]所报道的罗非鱼最优生长水温 29~31℃范围之内。Likongwe 等^[16]也发现, 水温为 28℃和 32℃时, 尼罗罗非鱼的生长速度快于水温为 24℃时的。可见, 最优水温下鱼类维持体内需求的能量较少, 可以促进其快速有效的生长。温度高于 33℃时, 较高的温度可能对鱼体产生了生理应激, 代谢产生的能量主要用于维持机体的衡态, 或增加了肠胃的排空速率, 从而导致生长与饲料效率的下降^[17]。Azaza 等^[17]研究也发现, 水温为 30℃

时, 尼罗罗非鱼的生长速率高于水温为 34℃时。

本研究中, 随着饲料蛋白水平的上升, 罗非鱼显示出更优的生长速度。水温为 27℃, 蛋白水平为 45%时, 罗非鱼的特定生长率为 2.565%/d, 显著高于蛋白水平为 25%时的 1.989%/d。45%蛋白水平对生长无抑制作用。胡国成等^[18]也发现, 饲料蛋白水平为 23.1%~47.9%时, 新吉富罗非鱼的特定增重率随蛋白水平升高而上升。这与 Abel-Tawwab 等^[8]与 Siddiqui 等^[19]的研究结果有所差异。Abdel-Tawwab 等^[8]发现, 水温为 27℃, 蛋白水平为 45%时, 特定生长率为 1.107%/d, 略低于 35%时的 1.143%/d。Siddiqui 等^[19]研究尼罗罗非鱼对饲料蛋白需求时发现, 0.838 g 仔鱼与 40 g 幼鱼对饲料蛋白最优需求量分别为 40%与 30%。饲料蛋白对罗非鱼生长的影响可能与其规格、饲养密度、罗非鱼的品系与选育代数以及环境条件密切相关^[20]。本实验所选用的尼罗罗非鱼为吉富第十六代罗非鱼, 并在中国宜兴实验基地采用群体选育法进一步选育了 4 代。实验中同时发现, 当水温为 27℃, 蛋白水平为 50%时, 罗非鱼的特定生长率有所下降, 为 2.533%/d, 饲料中高蛋白水平对生长出现了抑制作用。Juancey 等^[21]也发现, 饲料中蛋白质水平为 56%时, 莫桑比克罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*) 的生长速度低于 48%时的生长速度。然而, 蛋白水平为 25%时, 大部分蛋白可能用于维持机体自身能量需求, 鱼体生长所需的必须氨基酸减少, 或者是饲料中较高的碳水化合物水平对罗非鱼的生长有抑制作用^[22]。

饲料蛋白水平对罗非鱼幼鱼的饲料效率也有显著影响。水温为 27℃, 蛋白水平为 25%~40%

表 7 回归方程系数显著性检验
Tab. 7 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	28.914	0.451	27.846	29.982	
T	-1.235	0.357	-2.079	-0.391	0.0105
P	0.407	0.357	-0.437	1.251	0.2917
T×P	-2.520	0.505	-3.714	-1.326	0.0016
T ²	0.849	0.383	-0.056	1.754	0.0621
P ²	0.825	0.383	-0.080	1.730	0.0680

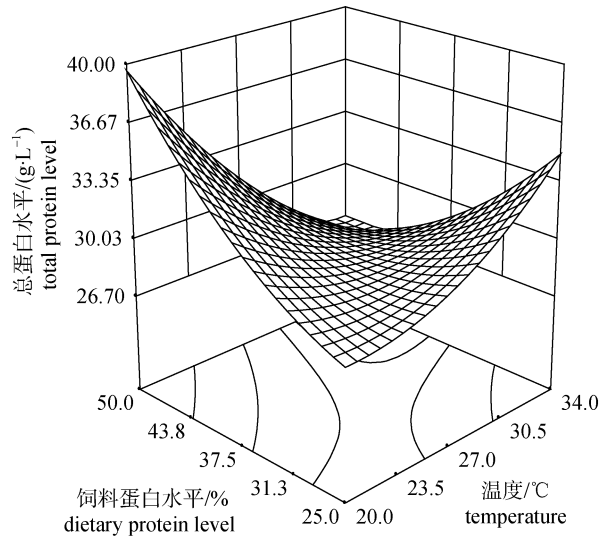


图 5 温度、饲料蛋白水平及其交互作用对吉富罗非鱼幼鱼血清总蛋白水平的响应面图

Fig. 5 Response surface plot of the effect of temperature and dietary protein level and their mutual interactions on total protein level of juvenile GIFT tilapia

时，饲料效率随蛋白水平升高而升高，这与 Al Hafedh^[20]的研究结果相似。饲料蛋白水平高于 40% 时，饲料效率随蛋白水平的升高而降低，Abel-Tawwab 等^[8]也发现了类似结论。这可能是因为饲料中蛋白水平超出罗非鱼的需求范围，过量的氨基酸无法被正常吸收，转化为脂肪在组织和肌肉中沉积，或增加尿液中氮的排泄，造成蛋白质浪费^[23]。

本研究首次发现，温度与饲料蛋白水平对罗非鱼幼鱼的饲料效率存在互作效应，而对特定生长率无互作效应。最优饲料效率随温度与饲料蛋白水平的改变而改变。水温对罗非鱼饲料蛋白的利用有明显影响。可能是因为，水温较低时，罗非鱼的蛋白需求量较高，机体需要利用较多的氨基酸来维持能量需求；温度为 29℃ 左右时，水温可

能较适宜于鱼体生存，机体能量需求降低，减少了对饲料蛋白的需求，并且更多能量用于生长；而高温环境下会对鱼体产生生理应激，抑制体内蛋白酶的活性，造成蛋白浪费。温度与饲料蛋白水平对特定生长率无互作效应，主要是因为在实验所设计的饲料蛋白范围内，不同温度下，蛋白水平为 25%~45% 时，特定生长率均随蛋白水平上升而上升，饲料中较高的蛋白水平有助于鱼体生长；50% 蛋白水平对罗非鱼生长有一定抑制作用，但不显著。

3.2 水温、饲料蛋白水平及其交互作用对吉富罗非鱼血清葡萄糖水平的影响

血清作为营养物质的运输者，与代谢关系密切。血液中代谢物浓度的变化反映了鱼类在面对环境条件或营养状况改变时，机体对于能源物质的分解与吸收的情况^[7]。血清葡萄糖主要来自于饲料在消化道内被消化吸收及肝糖元、肌糖元的分解作用^[10]。本实验中，饲料蛋白水平为 38% 时，随着水温上升，血清葡萄糖水平呈上升趋势。这与对银鲈(*Rhamdia quelen*)^[24]、金头鲷(*Sparus aurata*)^[25]和镜鲤^[10]的研究结论相似。Guijarro 等^[26]也报道过，须鲶 (*Tinca tinca*) 的血浆葡萄糖水平在冬季和春季时会下降，可能是因为摄食率的降低和胰腺分泌的激素加速了组织摄入。然而，本实验的结果与张贤刚^[27]的结果有所差异。张贤刚认为，尼罗罗非鱼血糖水平随温度升高逐渐下降。结合本实验的响应曲面图，可以发现，温度与饲料蛋白水平对血清葡萄糖水平有互作效应。饲料蛋白水平为 25%~26% 时，血清葡萄糖水平随温度的升高也呈逐渐下降的变化。可能是因为，饲料中较低的蛋白水平无法满足鱼体的能量需求，随着水温的上升，通过增加糖元的分解与转化来

表 8 温度和饲料蛋白水平对吉富罗非鱼幼鱼特定生长率和饲料效率影响优化的置信区间

Tab. 8 Optimization of confidence interval of the effect of temperature and dietary protein level on specific growth rate and feed efficiency of juvenile GIFT tilapia

响应值 response	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	2.748	0.056	2.616	2.879
饲料效率 feed efficiency	0.775	0.016	0.737	0.813

提供能量^[28]。同时, 本实验所采用的是等能饲料, 以增加碳水化合物含量来弥补低蛋白饲料中能量的减少。Enes 等^[29]在研究欧洲鲈与金头鲷时发现, 饲料中添加 20%葡萄糖的实验组, 血清葡萄糖水平显著上升, 肝中糖原代谢的关键酶葡萄糖激酶活性也明显提高。可见, 饲料中糖元的增加也有助于提高血清葡萄糖水平。温度高于 27℃时, 血清葡萄糖水平随饲料蛋白水平的减少而下降。Vieira 等^[7]与 Abdel-Tawwab 等^[8]也发现类似变化规律, 可能归因为组织摄取葡萄糖来供应能量需求。

3.3 水温、饲料蛋白水平及其交互作用对吉富罗非鱼血清甘油三酯水平的影响

血清中甘油三酯主要来源于营养物质消化吸收与糖元和脂肪酸的转化。水温可以改变脂类分解速率或影响脂肪酸的再酯化反应。脂类的分解远远超过氧化需求。因此, 一部分释放的脂肪酸将被再酯化。同时, 甘油三酯/脂肪酸的循环通过脂类分解与再酯化的作用进行流动^[30]。本实验中, 饲料蛋白水平为 38%时, 血清甘油三酯水平随水温上升呈先下降后上升的变化。这与唐玲等^[10]对镜鲤的研究结果相似。可能是因为低温环境中, 罗非鱼可能储存较多的脂肪来应对环境应激; 随着温度上升, 鱼体各组织代谢速率增加, 提高了脂酶活性, 增加了脂类分解与吸收^[24]。de Pedro 等^[31]也发现, 在夏季水温较高时, 须鲷血清甘油三酯水平明显高于冬季与春季。然而, 当水温超过罗非鱼的适宜温度时, 高温可能对代谢循环中的某些关键酯酶产生了抑制作用, 或加速了组织中能源物质的分解与释放。温度为 27℃时, 血清甘油三酯水平在蛋白水平为 25%~50%的范围内呈先上升后下降的变化趋势, 然而, 饲料蛋白水平对血清甘油三酯无显著影响。这与 Abdel-Tawwab 等^[8]的研究结果相似, 同时, 在其他鱼类, 如头石脂鲤^[7]、大盖巨脂鲤^[9]和虹鳟^[32]的研究中也发现类似结果。随着蛋白供应的减少, 鱼体可以分解甘油三酯来供应能量需求。而高饲料蛋白可能影响了罗非鱼肝脏脂肪合成与释放^[7]。

本研究首次发现温度与饲料蛋白水平的交互

效应对血清甘油三酯也有显著影响。温度为 20~21℃时, 血清甘油三酯水平随饲料蛋白的上升而下降; 而温度为 33~34℃时, 甘油三酯水平随饲料蛋白的上升而逐渐上升。水温可以影响罗非鱼摄食及其对饲料中蛋白成分的消化与吸收。不同水温下, 鱼体对能量物质的利用模式也有所差异。

3.4 水温、饲料蛋白水平及其交互作用对吉富罗非鱼血清总蛋白水平的影响

血清总蛋白的变化与多种因素密切相关, 如饲料的消化率、鱼体规格、饲料组成与水温等^[33]。血清蛋白在鱼类的代谢、免疫以及组织蛋白合成与氮沉积方面发挥着重要作用^[34]。本实验中, 饲料蛋白水平为 38%时, 血清总蛋白水平随水温升高呈先下降后上升的变化趋势。这与唐玲等^[10]对镜鲤的研究结果相似。可能是因为, 随着水温升高, 提高了机体的代谢速率与蛋白酶活性^[35], 加速血清中蛋白的分解与利用, 鱼体组织可以摄取更多蛋白用于更新与增殖。而高温环境中, 水温可能对蛋白质代谢与饲料蛋白的利用有抑制作用, 从而引起血清总蛋白水平的重新升高。本实验的研究结论与丁立云等^[3]、Vargas-chacoff 等^[25]、杨严欧等^[36]、何福林等^[37]的研究结果有差异, 可能是由于实验用鱼的不同。然而, 本实验的结果与张贤刚^[27]对罗非鱼的研究结果也不同。张贤刚认为, 水温对尼罗罗非鱼血清总蛋白的变化没有影响。根据本实验的响应曲面图可以发现, 温度与饲料蛋白水平的交互效应对血清总蛋白有显著影响。饲料蛋白水平为 32%左右时, 在水温 20~34℃范围内, 血清总蛋白水平在 28.6~30 mg/L 之间, 温度对血清总蛋白水平也无显著影响。因而, 张贤刚的结果只能说明在特定饲料条件或养殖环境下, 单一因子温度变化时, 血清总蛋白水平的变化规律。同时, 本研究中发现, 温度为 27℃时, 血清总蛋白水平随饲料蛋白水平的上升呈先下降后上升的变化。饲料蛋白高于 35%时, 可能由于消化蛋白的增加^[37]或饲料中过量的蛋白被消化道吸收后, 在血液中沉积^[38]。

以往在研究温度与饲料蛋白时, 多采用交叉

设计, 只能考察单一组合的变化。而采用本实验方法可以很好地将温度与饲料蛋白水平在整个实验范围内的变化以及因子间的互作效应进行分析, 并且建立相关的曲面模型, 可以更好地分析与预测因子和响应值间的关系。本实验中, 采用最小二乘法进行回归拟合, 模型都达到了较优的拟合度, 决定系数分别达到 0.958、0.955、0.971、0.977 和 0.870。采用 Montgomery^[14]的方法, 对生长与饲料利用的响应值进行同时优化。当温度与饲料蛋白水平分别为 29.9℃ 和 40.3% 时, 罗非鱼幼鱼的特定生长率与饲料效率同时达到最高, 分别为 2.748%/d 和 0.775。然而, 在实际生产中, 随着鱼粉价格的上涨, 较高的蛋白水平可能会带来养殖成本的增加。提高饲料脂肪水平或建立最优蛋白与碳水化合物比例可能有助于提高饲料中氮的利用, 减少蛋白浪费。同时应该注意其他环境因子, 如盐度、酸碱度、溶氧和光照等, 对罗非鱼饲料蛋白的利用上可能存在影响, 需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王辉, 强俊, 王海贞, 等. 温度与盐度对吉富品系尼罗罗非鱼幼鱼能量代谢的联合效应[J]. 中国水产科学, 2012, 19(1): 51–61.
- [2] 强俊, 徐跑, 何杰, 等. 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[J]. 中国水产科学, 2011, 18(6): 1300–1308.
- [3] 丁立云, 张利民, 王际英, 等. 饲料蛋白水平对星斑川鲷幼鱼生长、体组成及血浆生化指标的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(6): 1285–1292.
- [4] Singh R K, Chavan S L, Desai A S, et al. Influence of dietary protein levels and water temperature on growth, body composition and nutrient utilization of *Cirrhinus mrigala* (Hamilton, 1822) fry [J]. J Therm Biol, 2008, 33: 20–26.
- [5] Hidalgo F, Alliot E. Influence of water temperature on protein requirement and protein utilization in juvenile Sea bass, *Dicentrarchus labrax*[J]. Aquaculture, 1988, 72: 115–129.
- [6] Musuka C G, Likongwe J S, Kang'Ombe J, et al. The effect of dietary protein and water temperatures on performance of *T. rendalli* juveniles reared in indoor tanks[J]. Pakistan J Nutr, 2009, 8: 1526–1531.
- [7] Vieira V P, Inoue L A K, Moraes G. Metabolic responses of matrinxã (*Brycon cephalus*) to dietary protein level[J]. Comp Biochem Physiol, 2005, 140 A: 337–342.
- [8] Abdel-Tawwab M, Ahmad M H, Khattab Y A E, et al. Effect of dietary protein level, initial body weight, and their interaction on the growth, feed utilization, and physiological alterations of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) [J]. Aquaculture, 2010, 298: 267–274.
- [9] Almeida L C D E, Avilez I M, Honorato C A, et al. Growth and metabolic responses of tambaqui (*Colossoma macropomum*) fed different levels of protein and lipid[J]. Aquacult Nutr, 2011, 17: 253–262.
- [10] 唐玲, 徐奇友, 王常安, 等. 不同水温和饲料蛋白质水平对镜鲤血清生化指标的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(1): 41–46.
- [11] Singh R K, Chavan S L, Desai A S, et al. Influence of dietary protein levels and water temperature on growth, body composition and nutrient utilization of *Cirrhinus mrigala* (Hamilton, 1822) fry[J]. J Therm Biol, 2008, 33: 20–26.
- [12] Hidalgo F, Alliot E. Influence of water temperature on protein requirement and protein utilization in juvenile Sea bass, *Dicentrarchus labrax*[J]. Aquaculture, 1988, 72: 115–129.
- [13] 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): 14–19.
- [14] Montgomery D C. Design and Analysis of Experiments[M] 6th ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005: 405–444.
- [15] Popma T J, Lovshin L. Worldwide prospects for commercial production of tilapia. International center for aquaculture and aquatic environments department of fisheries and allied aquacultures[M]. Alabama: Auburn University, 1995: 8–9.
- [16] 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: 37–46.
- [17] Azaza M S, Dhraief M N, Kraiem 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, 2007, 192: 132–145.
- [18] 胡国成, 李思发, 何学军, 等. 不同饲料蛋白质水平对吉富品系尼罗罗非鱼幼鱼生长和鱼体组成的影响[J]. 饲料工业, 2006(27): 24–27.
- [19] Siddiqui A Q, Howlader M S, Adam A A. Effects of dietary protein levels on growth, feed conversion and protein utilization of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) [J]. J Therm Biol, 2007, 192: 132–145.

- tion in fry and young Niletilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. Aquaculture, 1988, 70: 63–73.
- [20] Al Hafedh Y S. Effects of dietary protein on growth and body composition of Nile tilapia [J]. Aquacult Res, 1999, 30: 385–393.
- [21] Juancey K. The effects of varying dietary protein level on the growth, food conversion, protein utilization and body composition of juvenile tilapias (*Sarotherodon mossambicus*) [J]. Aquaculture, 1982, 27: 43–54.
- [22] Pérez-Sánchez J, Martí-Palanca H, Kaushik S J. Ration size and protein intake affect circulating growth hormone concentration, hepatic growth hormone binding and plasma insulin-like growth factor-I immunoreactivity in a marine teleost, the gilthead sea bream (*Sparus aurata*)[J]. J Nutr, 1995, 125: 546–552.
- [23] Alvarez-Gonzalez C A, Civera-Cerecedo R, Ortiz-Galindo J L, et al. Effect of dietary protein level on growth and body composition of juvenile spotted sand bass, *Paralabrax maculatofasciatus*, fed practical diets [J]. Aquaculture, 2001, 194: 151–159.
- [24] Lermen C L, Lappe R, Crestani M, et al. Effect of different temperature regimes on metabolic and blood parameters of silver catfish *Rhamdia quelen*[J]. Aquaculture, 2004, 239: 497–507.
- [25] Vargas-Chacoff L, Arjona F J, Polakof S, et al. Interactive effects of environmental salinity and temperature on metabolic responses of gilthead sea bream *Sparus aurata*[J]. Comp Biochem Physiol, 2009, 154 A: 417–424.
- [26] Guijarro A I, Lopez-Patiño M A, Pinillos M L, et al. Seasonal changes in haematology and metabolic resources in the tench[J]. J Fish Biol, 2003, 62: 803–815.
- [27] 张贤刚. 水温对尼罗罗非鱼几种血液学指标影响的初步研究[J]. 淡水渔业, 1991, 2: 15–17.
- [28] Couto A, Enes P, Peres H, et al. Effect of water temperature and dietary starch on growth and metabolic utilization of diets in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) juveniles[J]. Comp Biochem Physiol, 2008, 151 A: 45–50.
- [29] Enes P, Panserat S, Kaushik S, et al. Rearing temperature enhances hepatic glucokinase but not glucose-6-phosphatase activities in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and gilthead sea bream (*Sparus aurata*) juveniles fed with the same level of glucose[J]. Comp Biochem Physiol, 2008, 150 A: 355–358.
- [30] Wolfe R R, Klein S, Carraro F, et al. Role of triglyceride-fatty acid cycle in controlling fat metabolism in humans during and after exercise[J]. Am J Physiol, 1990, 258: 382–389.
- [31] De Pedro N, Guijarro A I, López-Patiño M A, et al. Daily and seasonal variations in haematological and blood biochemical parameters in the tench, *Tinca tinca* Linnaeus, 1758[J]. Aquacult Res, 2005, 36: 1185–1196.
- [32] Kirchner S, Seixas P, Kaushik S, et al. Effects of low protein on extra-hepatic gluconeogenic enzyme expression and peripheral glucose phosphorylation in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Comp Biochem Physiol, 2005, 140B: 333–340.
- [33] Darcy B. Availability of amino acids in monogastric animals[J]. Diabetes Metab, 1984, 10:121–133.
- [34] Peragón J, Barroso J B, García-Salguero L, et al. Dietary protein effects on growth and fractional protein synthesis and degradation rates in liver and white muscle of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture, 1994, 124: 35–46.
- [35] 田宏杰, 庄平, 章龙珍, 等. 水温对施氏鲟幼鱼消化酶活力的影响[J]. 中国水产科学, 2007, 14(1): 126–131.
- [36] 杨严欧, 姚峰, 吴继鹏, 等. 温度对黄颡鱼血细胞数量、大小及血清生化成分的影响[J]. 长江大学学报, 2005, 11(2): 58–63.
- [37] 何福林, 向建国, 李常健, 等. 水温对虹鳟血液学指标影响的初步研究[J]. 水生生物学报, 2007, 31(3): 363–369.
- [38] Melo J F B, Lundstedt L M, Metón I, et al. Effects of dietary levels of protein on nitrogenous metabolism of *Rhamdia quelen* (Teleostei: Pimelodidae) [J]. Comp Biochem Physiol, 2006, 145 A: 181–187.

Effect of water temperature, dietary protein levels and their interaction on growth and serum energetic compounds in GIFT tilapia juvenile, *Oreochromis niloticus* (L.)

QIANG Jun^{1,2}, YANG Hong^{1,2}, WANG Hui³, XU Pao^{1,2}, HE Jie¹

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

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

3. Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524025, China

Abstract: We evaluated the combined effect of temperature (20–34°C) and dietary protein level (25%–50%) on growth and serum glucose, triglyceride, and total protein levels in GIFT tilapia juveniles. We used a central composite rotatable experimental design and response surface methodology. The entire experiment lasted for 8 weeks. The linear effects of temperature, dietary protein level on growth and feed utilization were statistically significant ($P<0.05$). High temperatures and high dietary protein levels inhibited specific growth rate (SGR) and feed efficiency (FE). The linear effects of water temperature on serum glucose, triglyceride, and total protein levels were statistically significant ($P<0.05$). At a dietary protein level of 37.5%, serum glucose levels increased gradually as water temperature increased, whereas serum triglyceride and total protein levels decreased at the beginning and increased thereafter. The linear effect of dietary protein levels on serum glucose levels was significant ($P<0.05$); but the linear effect on serum triglyceride and total protein levels was insignificant ($P>0.05$). The reciprocal effects of temperature×dietary protein levels on FE, serum glucose, triglyceride, and total protein levels were significant ($P<0.05$). SGR, FE, serum triglyceride, and total protein levels were influenced more by temperature than by dietary protein levels. However, the pattern was reversed for serum glucose levels. Using our data, we developed a model to describe the effect of temperature and dietary protein level on serum glucose, triglyceride and total protein levels. The coefficients of determination were 0.958, 0.955, 0.971, 0.977, and 0.870, respectively ($P<0.01$), and could be applied in projection. The optimal temperature/dietary protein level combination, obtained using a statistical optimization approach, was 29.9°C/ 40.3%, at which the maximal SGR and FE were 2.748%/d and 0.775 respectively, with the desirability being 0.888. The respective effects of water temperature on serum glucose, triglyceride, and total protein levels were observed under different dietary protein levels. Increased water temperature contributes to the better use of dietary protein, and an increase in serum protein catabolism and conversion.

Key words: GIFT tilapia; water temperature; dietary protein level; growth; glucose; triglyceride; total protein

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