

DOI: 10.15886/j.cnki.hdxzbzkb.2024031001

CSTR: 32403.14.hndk.2024031001

海洋牧场与现代渔业



引用格式:何银加,於锋,许莹,等.密度和饵料日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤(*Moenkhausia costae*)养殖的影响[J].海南大学学报(自然科学版中英文),2025,43(1):7-14.

Citation:HE Yinjia, YU Feng, XU Xuan, et al. Effects of the stocking density and daily feeding amount on the cultivation of *Moenkhausia costae*[J]. Natural Science of Hainan University, 2025, 43(1): 7-14.

密度和饵料日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤 (*Moenkhausia costae*) 养殖的影响

何银加^{1,2,3}, 於锋^{1,2,3}, 许莹^{1,2,3}, 邱达观^{1,2,3}, 孔德璇^{1,2,3}, 顾志峰^{1,2,3*}

(1. 海南大学 海洋生物与水产学院, 海南 海口 570228;

2. 淡水渔业海南省工程研究中心, 海南 海口 570228;

3. 海南大学 三亚南繁研究院, 海南 三亚 572000)

摘要: 为了揭示热带淡水观赏鱼科斯塔氏直线脂鲤(*Moenkhausia costae*)的适宜养殖密度及饵料日投喂量,采用循环水养殖系统进行不同养殖密度(0.5、1 和 1.5 条·L⁻¹)和饵料日投喂量(体质量的 3%、5% 和 7%)养殖,比较科斯塔氏直线脂鲤生长性能、摄食率(FI)、水质指标等差异性。结果表明:养殖密度为 0.5 条·L⁻¹、日投喂量为体质量 3% 的组别观察到最高的体质量增长率(WGR)为(517.96±56.09)% 和特定生长率(SGR)为(3.03±0.15)%·d⁻¹,以及最低的饵料系数(FCR)为 1.08±0.02。此外,养殖密度和日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤的 FCR 和 FI 存在交互作用(P<0.05)。FI、氨氮和亚硝酸盐呈现随养殖密度和日投喂率的增大而增大。G9(养殖密度为 1.5 条·L⁻¹ 和日投喂率为 7%)中氨氮和亚硝酸盐含量最高,分别为(0.56±0.07) mg·L⁻¹ 和(0.033±0.003) mg·L⁻¹。对体长-体质量进行幂函数拟合,得到方程 $W=0.0165L^{2.5373}$ (n=100, R²=0.9873)。本研究条件下,科斯塔氏直线脂鲤的最适养殖密度为 0.5 条·L⁻¹,适宜的饵料日投喂量为体质量的 3%。研究结果丰富了科斯塔氏直线脂鲤养殖资料,有助于建立科斯塔氏直线脂鲤的养殖技术和指导大规模苗种生产。

关键词: 科斯塔氏直线脂鲤; 养殖密度; 日投喂量; 生长性能; 摄食率; 水质

中图分类号: S965.8

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2025)01-0007-08

Effects of the stocking density and daily feeding amount on the cultivation of *Moenkhausia costae*

HE Yinjia^{1,2,3}, YU Feng^{1,2,3}, XU Xuan^{1,2,3}, QIU Dagan^{1,2,3}, KONG Dexuan^{1,2,3}, GU Zhifeng^{1,2,3*}

(1. School of Marine Biology and Fisheries, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Freshwater Fisheries Hainan Engineering Research Center, Haikou 570228, China; 3. Sanya Nanfan Research Institute, Hainan University, Sanya 572000, China)

Abstract: In order to obtain the optimal farming density and daily feeding amount for the tropical freshwater ornamental fish *Moenkhausia costae* (*M. costae*), a recirculating aquaculture system was used, and the effects of the different stocking densities (0.5, 1, and 1.5 individuals·L⁻¹) and the different daily feeding amounts (3%, 5%, and 7% of body weight) on the growth performance, feeding rate, and water quality indicators of

收稿日期: 2024-03-10

基金项目: 海南省自然科学基金(320QN207); 海南大学科研启动基金(KYQD(ZR)20061); 海南省院士创新平台建设基金项目(HD-YSZX-202011)

作者简介: 何银加(2000—), 男, 江苏淮安人, 海南大学水产专业 2021 级硕士研究生, E-mail: 755026153@qq.com

通信作者: 顾志峰(1975—), 男, 江苏常州人, 博士, 教授, 研究方向: 贝类遗传育种、观赏鱼养殖, E-mail: guzhi-feng@hainanu.edu.cn

M.costae were compared. The results indicated that the group with a stocking density of 0.5 individuals \cdot L⁻¹ and a daily feeding amount of 3% of the body weight exhibited the highest weight gain rate [$WGR=(517.96\pm 56.09)\%$], the specific growth rate [$SGR=(3.03\pm 0.15)\% \cdot d^{-1}$], and the lowest feed conversion ratio ($FCR=1.08\pm 0.02$). Additionally, there were significant interactions between the stocking density and daily feeding amount and the FCR and feed intake (FI) of *M. costae* ($P < 0.05$). With the elevation of stocking density and feeding rate, FI, Ammonia nitrogen, and Nitrite increased. In the G9 group (stocking density of 1.5 individuals \cdot L⁻¹ and feeding rate of 7%), the highest concentrations of Ammonia nitrogen and Nitrite were observed, which was (0.56 ± 0.07) mg \cdot L⁻¹ and (0.033 ± 0.003) mg \cdot L⁻¹, respectively. The length-weight relationship was fitted with a power function, and the equation $W=0.0165L^{2.5373}$ ($n=100$, $R^2=0.9873$) was obtained. Under the conditions, the optimal farming density for *M. costae* was determined to be 0.5 individuals \cdot L⁻¹, with a suitable daily feeding amount of 3% of the body weight. Our findings provide the valuable information for the cultivation of *M.costae*, which are helpful for guiding the large-scale seed production.

Keywords: *Moenkhausia costae*; stocking density; daily feeding amount; growth performance; feed intake; water quality

0 引言

鱼类养殖过程中的养殖密度与日投喂量会直接影响到鱼类的生长性能与养殖水质。养殖密度增加时,一般会导致养殖个体出现食物和空间争夺等种内斗争,且增加日投喂量会导致单位水体养殖密度下降并伴随水质恶化问题^[1]。养殖密度同时也是慢性应激原,对鱼类的生理,生长,基因表达甚至行为都造成影响^[2]。大多数鱼类的免疫力及生长速率,会随着养殖密度升高而呈现明显的降低^[3-4]。日投喂量是制定投喂策略时应着重考虑的关键因素之一。合理的日投喂量既可以防止投喂不足造成生长缓慢,又可以防止投喂过量造成饵料浪费和养殖水体污染。研究表明:日投喂量对养殖生物的生长和存活有重要影响^[5-6]。黄辉等^[7]研究了日投喂量对管角螺(*Hemifusus stuba*)幼螺生长的影响,证明了日投喂量对管角螺的生长存在显著影响,并确定体质量的4%为适宜的投喂量。与限饲投喂(80%饱食日投喂量)相比,饱食投喂显著促进了工业化循环水养殖大西洋鲑(*Salmo salar*)的生长、降低了饲料系数,提高了胃肠组织消化酶活力^[8],但整体死亡率也提高了。

观赏鱼是水产养殖业的重要组成部分。自20世纪70年代以来,观赏鱼在世界范围内得到了迅速发展,目前每年有超过10亿条鱼在国际上交易^[9]。2021年观赏鱼市场销售额已达54亿美元,全球观赏鱼贸易产值已超过150亿美元,涉及5300种淡水鱼类和1802种海洋鱼类^[10]。观赏鱼的来源可分为野外捕捞和人工繁殖。目前,大部分的观赏鱼仍来自于野捕,根据Ghafari等^[11]的研究,市面上销售的观赏鱼中约有98.3%从自然环境中被捕获的,人工养殖观赏鱼仅占总量的1.7%。野外捕捞过程对生态环境造成了极大的破坏。许多观赏鱼的主要出口国在捕捞观赏鱼的过程中,出现了自然资源被过度开采、栖息地受严重破坏等问题,导致当地的生物多样性减少,种质资源保护受到一定威胁^[12]。人工养殖是观赏鱼行业发展和生态多样性保护的必要条件。

科斯塔氏直线脂鲤属于脂鲤目(Characidae)脂鲤科(Moenkhausia),是市场潜力很大的热带淡水观赏鱼,供不应求^[13]。由于人工苗种繁育技术不成熟,市场销售的科斯塔氏直线脂鲤主要来自自然捕捞,不仅阻碍了产业的发展,而且对自然资源和生态系统构成严重威胁。为此,本研究采用循环水系统养殖,分析养殖密度和饵料日投喂量对其生长、摄食率和养殖水体水质的影响,旨在明确科斯塔氏直线脂鲤的适宜养殖密度和饵料日投喂量,为其人工苗种培育技术的建立奠定基础,推动规模化苗种生产和产业的发展。

1 材料与方 法

1.1 实验材料 实验鱼来自上海诚利信水族、广东佛山淘鱼水族和广东广州征游水族养殖场共 3 批次的健康个体, 平均体长和体质量分别为(2.03±0.13) cm、(0.10±0.01) g。正式试验前于玻璃缸中进行为期两周的暂养, 期间使用商品饲料投喂, 每天投喂 2 次。投喂的饲料来自三通生物工程(潍坊)有限公司, 颗粒大小: 1.1 ~ 1.4 mm, 粗蛋白含量≥55%, 粗脂肪含量≥8%, 粗纤维含量≤3%, 粗灰分含量≤16%, 钙含量≤4.0%, 总磷含量 1.5% ~ 3.0%, 赖氨酸含量≥2.5%, 水分含量≤9%。

1.2 实验装置 实验在循环水养殖系统(见图 1)中进行。该养殖系统包括玻璃水箱、PVC 滤箱 2 部分以及辅助结构。玻璃养殖缸容积为 62 L(实际养殖水体 60 L), 位于系统下半部; PVC 滤箱位于系统上半部, 内置“细菌屋”(东莞市宠翰宠物用品有限公司)作为滤材。玻璃养殖缸底部有排水管道, 右上侧设置有补水管道和水泵(流量 350 L·h⁻¹); 水泵将玻璃养殖缸中的水抽至 PVC 滤箱, 水流经“细菌屋”后从 PVC 滤箱另一侧底部流入玻璃养殖缸, 实现水循环。

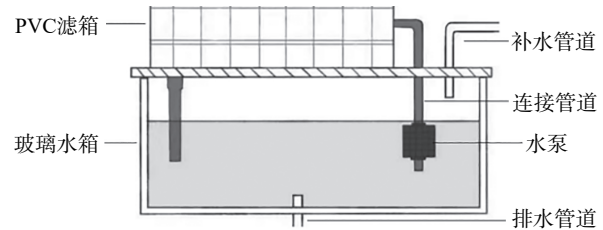


图 1 循环水养殖系统

1.3 实验设置 采用双因素设计方法, 饵料的日投喂量、养殖密度各设置 3 个梯度, 共 9 个实验组(表 1), 每个实验组各 3 个平行。饵料日投喂量按照实验鱼的体质量计算, 养殖密度按照单位养殖水体鱼的尾数计算。

表 1 实验处理设置

因子	组别								
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
日投喂量/%	3.0	3.0	3.0	5.0	5.0	5.0	7.0	7.0	7.0
养殖密度/(条·L ⁻¹)	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
实验鱼尾数/条	30	60	90	30	60	90	30	60	90

1.4 饲养管理 试验期间根据试验设计方案定时投喂, 投饵 30 min 后吸出残饵, 烘干称重。在整个培养期间, 水温保持在恒定的(25±0.8) °C, pH 值在 7.8 到 8.4 之间, 溶解氧水平始终保持在 7.3 mg·L⁻¹ 以上。实验持续 60 d, 期间不进行水质更换, 仅进行了补充水分以弥补蒸发损失。试验期间, 每 7 d 测量一次生长数据, 并根据平均体质量调整日投喂量。

1.5 测量和计算 实验前后分别进行实验鱼的称重及体长的测量。使用随机抽样法在每个组别中挑选 50% 尾鱼进行测定。在投喂前称量投喂饵料的总质量, 投喂半小时后收集鱼缸内未被摄食的残余饵料, 经抽滤收集烘干后称量其质量, 以进行摄食率的计算。每个组的水样通过 0.45 μm 孔径膜进行过滤, 以测量水质指标。使用便携式多参数水质仪 M900(生产厂家为: 青岛精诚仪器)测量温度、溶解氧(DO)和 pH 值。氨氮、亚硝酸盐的测量采用 Cleverchem380 多功能水质分析仪(生产厂家为: 山东格林凯瑞精密仪器)进行。

具体的计算公式如下

$$\text{增重率}(WGR) = 100\% \times (W_t - W_0) / W_0 \quad (1)$$

$$\text{特定增长率}(SGR) = 100\% \times (\ln W_t - \ln W_0) / t \quad (2)$$

$$\text{摄食率}(FI) = 100\% \times (C_0 - C_t) I / W \quad (3)$$

$$\text{饵料系数}(FCR) = F / (W_t - W_0) \quad (4)$$

$$\text{体长 - 体质量关系}(W) = aL^b \quad (5)$$

式中: W_t 为鱼终末均体质量, g; W_0 为鱼初始均体质量, g; F 为鱼的平均总摄食量(风干样的质量), g; t 为

养殖天数, d ; C_0 为擦干表面水分后投喂饵料的质量, g ; C_t 为擦干表面水分后捞出饵料的质量, g ; I 为干质量率, $\%$, 其中 $I=I_t/I_0 \times 100\%$, I_t 为烘干后饵料的质量, g , I_0 为擦干表面水分后饵料的质量, g ; W 为体质量, g ; L 为体长, cm ; a 为条件因子; b 为异速生长因子。

1.6 数据统计与分析 用 SPSS 16.00 软件进行数据处理与分析, 以平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同养殖密度下科斯塔氏直线脂鲤体质量与体长关系 体质量和体长散点图拟合结果显示(图 2), 60 d 实验期间内, 科斯塔氏直线脂鲤的体质量随体长的增加呈幂函数增加趋势。体质量与体长拟合曲线的回归方程为 $W=0.016 5L^{2.537 3}$, 决定系数高, R^2 为 0.992 4。

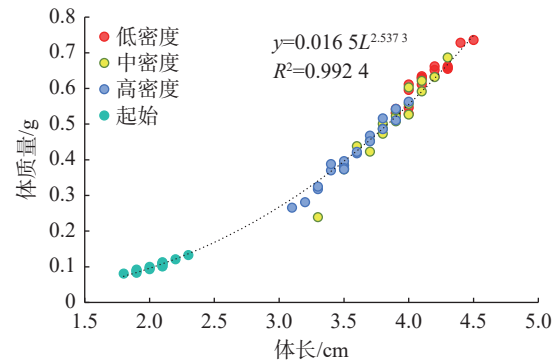


图 2 科斯塔氏直线脂鲤的体质量和体长拟合曲线

2.2 不同养殖密度和日投喂量下科斯塔氏直线脂鲤的生长比较 养殖 60 d 后, G1 组的体长、体质量、 WGR 和 SGR 最大(表 2), 但与其与 G4、G7 组之间无显著性差异($P>0.05$)。相同养殖密度、不同日投喂量各组间的科斯塔氏直线脂鲤的生长指标差异不显著($P>0.05$); 不同养殖密度、相同日投喂量各组间科斯塔氏直线脂鲤的生长指标存在显著性差异($P<0.05$), 但不存在交互作用效应($P>0.05$)。

表 2 科斯塔氏直线脂鲤生长指标

组别	L/cm	W/g	$WGR/\%$	$SGR/(\% \cdot d^{-1})$
G1	4.12 \pm 0.18 ^a	0.63 \pm 0.06 ^a	517.96 \pm 56.09 ^a	3.03 \pm 0.15 ^a
G2	3.79 \pm 0.26 ^{bcd}	0.48 \pm 0.11 ^{bc}	369.43 \pm 104.53 ^{bc}	2.53 \pm 0.44 ^{bc}
G3	3.54 \pm 0.22 ^d	0.40 \pm 0.07 ^c	299.06 \pm 70.50 ^c	2.28 \pm 0.31 ^c
G4	4.10 \pm 0.20 ^a	0.60 \pm 0.08 ^a	491.18 \pm 75.24 ^a	2.95 \pm 0.22 ^a
G5	3.87 \pm 0.21 ^{abc}	0.52 \pm 0.09 ^{ab}	416.37 \pm 87.11 ^{ab}	2.71 \pm 0.28 ^{ab}
G6	3.58 \pm 0.25 ^{cd}	0.42 \pm 0.09 ^{bc}	315.07 \pm 88.77 ^{bc}	2.33 \pm 0.36 ^{bc}
G7	4.07 \pm 0.21 ^a	0.61 \pm 0.07 ^a	507.58 \pm 69.08 ^a	3.00 \pm 0.20 ^a
G8	3.92 \pm 0.22 ^{ab}	0.53 \pm 0.08 ^{ab}	422.40 \pm 76.61 ^{ab}	2.74 \pm 0.25 ^{ab}
G9	3.68 \pm 0.21 ^{bcd}	0.45 \pm 0.07 ^{bc}	344.03 \pm 69.51 ^{bc}	2.46 \pm 0.26 ^{bc}

注: 同列中标有不同字母者表示组间有显著性差异($P<0.05$)。

2.3 不同养殖密度和日投喂量下科斯塔氏直线脂鲤的摄食率和饵料系数 相关分析结果(表 3)显示, 养殖密度和日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤的 FI 、 FCR 均存在显著差异($P<0.05$), 同时存在交互作用效应($P<0.05$)。在日投喂量为 3% 且养殖密度为 0.5 条 \cdot L^{-1} 的组别中, FCR 最小, 为(1.08 \pm 0.02)%, 与其他组别存在显著差异($P<0.05$)。日投喂量相同前提下, FCR 随着养殖密度的增加而增大的趋势; FI 随着养殖密度的增加各组而显示出不同变化, 低日投喂量组呈现减小趋势, 而中、高日投喂量组均呈现增大趋势。在相同的养殖密度下, FCR 随着日投喂量的增加各组同样显示不同变化, 低、中养殖密度组随日投喂量增加呈现增大趋势, 高密度组随着日投喂量的增加呈现先增大后减小的趋势; FI 随着日投喂量的增加而增大趋势。

表 3 科斯塔氏直线脂鲤的 FI 及 FCR

组别	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
$FI/\%$	2.90 \pm 0.26 ^b	2.84 \pm 0.11 ^{ab}	2.71 \pm 0.08 ^a	3.27 \pm 0.05 ^c	3.50 \pm 0.07 ^c	3.54 \pm 0.22 ^{dc}	3.36 \pm 0.05 ^{cd}	3.52 \pm 0.07 ^{dc}	3.57 \pm 0.08 ^c
FCR	1.08 \pm 0.02 ^a	1.22 \pm 0.01 ^b	1.35 \pm 0.01 ^{de}	1.18 \pm 0.02 ^b	1.32 \pm 0.02 ^{cd}	1.45 \pm 0.03 ^c	1.32 \pm 0.02 ^{bc}	1.43 \pm 0.02 ^{cd}	1.41 \pm 0.04 ^{de}

注: 同列中标有不同字母者表示组间有显著性差异($P<0.05$)。

科斯塔氏直线脂鲤日投喂量和养殖密度的 FCR 标准化线性回归系数分别为 0.800 和 0.332(表 4)。用 A 表示日投喂量, B 表示养殖密度, 线性回归方程可以使用非标准化回归系数构建, $y_{FCR}=0.963+0.103A+0.021B$, 相同方法得到日投喂量和养殖密度对科斯塔氏直线脂鲤 FI 的标准化回归系数分别为 0.773 和 0.143, 回归方程为 $y_{FI}=2.329+0.158A+0.057B$ 。

表 4 饵料日投喂量和养殖密度对科斯塔氏直线脂 FCR 的线性回归分析

模型	未标准化系数		标准化系数	t	P
	B	标准错误	$Beta$		
常量	0.963	0.043		22.264	< 0.001
日投喂量	0.103	0.013	0.800	7.842	< 0.001
养殖密度	0.021	0.007	0.332	3.251	< 0.05

2.4 不同养殖密度和日投喂量下养殖水体中氨氮、亚硝酸盐质量浓度 养殖水体中氨氮如图 3a 所示。各组间水体残余氨氮于 $(0.02\pm 0.01) \sim (0.56\pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间浮动变化, 均未超过氨氮对科斯塔氏直线脂鲤的安全质量浓度 ($SC=2.334 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。但当养殖密度较高、日投喂量加大时, 水体中仍存在较高质量浓度的氨氮。水体残余氨氮随养殖密度的升高和日投喂量的加大呈现逐步上升的趋势, 其中, G9 组水体中的氨氮质量浓度最高, 达 $(0.56\pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。G6 组水体中的氨氮质量浓度其次, 达 $(0.45\pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但二者间无显著性差异 ($P>0.05$)。低日投喂量下各组别水体的氨氮均呈较低状态, 其中, G1 组水体中的氨氮质量浓度最低, 仅为 $(0.02\pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

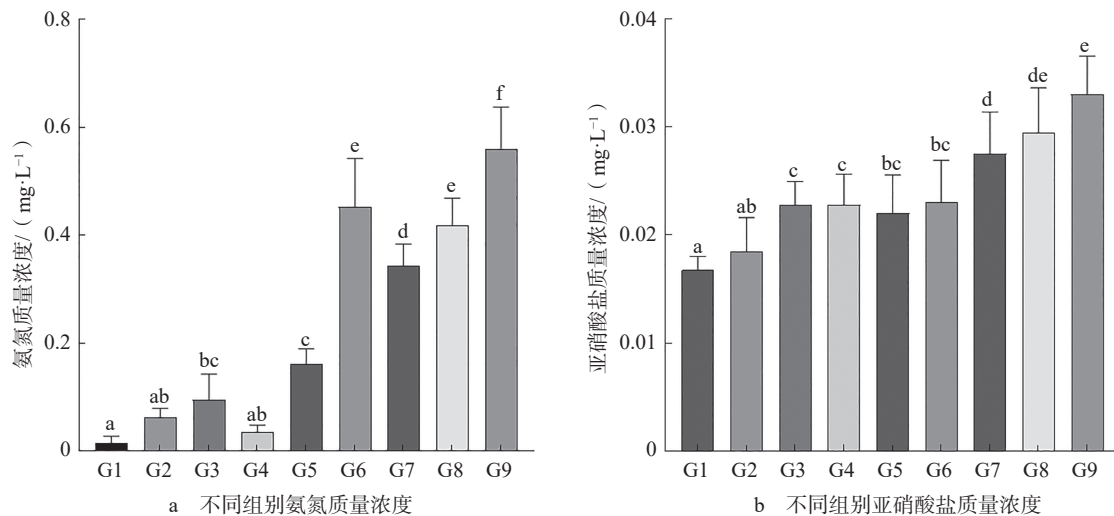


图 3 养殖 60 d 后养殖水体中氨氮和亚硝酸盐质量浓度

注: 图中标有不同字母者表示组间有显著性差异 ($P < 0.05$)。

养殖水体中亚硝酸盐质量浓度如图 3b 所示。各组别养殖水体的亚硝酸盐质量浓度在 $(0.017\pm 0.001) \sim (0.033\pm 0.003) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间浮动变化。均未超过亚硝酸盐对科斯塔氏直线脂鲤的安全质量浓度 ($SC=3.583 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。其中, 水体中亚硝酸盐质量浓度随养殖密度的升高与日投喂量的增加呈现上升趋势。高养殖密度各组水体中的亚硝酸盐含量均高于低养殖密度各组, 且具有显著性差异 ($P < 0.05$)。G9 组水体亚硝酸盐质量浓度最高 $(0.033\pm 0.003) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, G1 组水体具有最低的亚硝酸盐质量浓度。

通过养殖密度和日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤养殖水质中氨氮和亚硝酸盐的方差分析, 得到不同养殖密度与日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤的养殖水质中氨氮均差异显著 ($P < 0.05$), 同时显示出交互作用 ($P < 0.05$)。二元线性回归分析表明(表 5): 日投喂量、养殖密度的标准化回归系数分别 0.769 和 0.498, 日投喂量、养殖密度对科斯塔氏直线脂鲤养殖水质中的氨氮的影响是显著正向的, 同时日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤养殖水质中的氨氮的影响最大。同时可使用非标准化回归系数构建模型公式为: $y_{\text{NH}_3\text{-N}} = -0.485 + 0.096A + 0.124B$ 。

表5 养殖密度和日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤养殖水质中氨氮的线性回归分析

模型	未标准化系数		标准化系数	<i>t</i>	<i>P</i>
	<i>B</i>	标准错误	<i>Beta</i>		
常量	-0.485	0.057		-8.473	<0.001
日投喂量	0.096	0.009	0.769	11.044	<0.001
养殖密度	0.124	0.017	0.498	7.146	<0.001

3 讨论

3.1 科斯塔氏直线脂鲤体长-体质量关系 本研究中,科斯塔氏直线脂鲤的生长参数 b 值为 2.537 3。当 b 值小于 3 时,种群为负异速生长,即体长的增速大于体质量的增速,当 b 值等于 3 时,种群为等速生长,当 b 值大于 3 时,种群为正异速生长,体型表现为肥满而不是纤细^[14]。意味着更多来自外部环境的营养被分配用于体长的增长。对于观赏鱼销售来说,体长是决定销售价格的重要因素之一,养殖科斯塔氏直线脂鲤可能在较短时间内产生更高的利润。因此,这为科斯塔氏直线脂鲤作为具有良好经济效益的观赏鱼种提供了有价值的理论见解。 b 值的差异可以归因于多种因素,如检测的标本数量、捕获个体的长度范围^[15]、栖息地类型^[16]、季节性^[17]和地理区域^[18]。生长环境是显著影响 b 值的因素之一^[19]。Jisr 等^[20]发现,棕线石斑鱼等的生长参数 b 值在高温环境下明显高于低温环境。Sileesh 等^[21]对黑头鱼、深海鲱,蛇鲭等研究也表明 b 值水平显著受环境因素影响。

3.2 养殖密度与日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤生长指标、摄食行为、水质的影响 鱼类的生长性能、摄食行为、养殖水质受到各种限制因素的影响,包括日投喂量^[7]、低氧水平^[22]、盐度^[23]和养殖密度^[24]。有关养殖密度的研究支持其在影响鱼类生长方面的重要性,正如 Lupatsch 等^[24]和 Diao 等^[25]的研究所证实的,适宜的养殖密度有助于促进鱼类的生长,而过度拥挤的条件会导致生长抑制和生理应激。李大鹏等^[26]在对史氏鲟稚鱼生长的研究中发现:养殖密度是影响史氏鲟稚鱼生长重要因子之一,低密度有利于史氏鲟稚鱼的生长。石勇等^[27]在对青鱼幼鱼的生长研究中发现:随着养殖密度的提高,青鱼幼鱼的生长速度减慢、免疫力下降、抗氧化能力降低。摄食是水生动物的重要行为,使得他们能够获取生长和发育所需的必要营养和能量。该类动物的摄食行为可以受到不同的投喂模式的影响,通过调整投喂频率和日投喂量,他们的摄食行为可以得到增强,从而加速生长^[28]。日投喂量是影响水生动物生长的关键因素^[29],但是过高的日投喂量会对鱼类施加代谢应激,影响他们的消化效率、氧气消耗和废物排泄过程,从而阻碍他们的生长。因此,初始时增加日投喂量会提高养殖生物的生长,但随后会减缓,引发了关于最适日投喂量的问题^[30]。同时在高养殖密度和日投喂量下,未消耗的饵料、粪便和鱼类残体的分解促使氮(N)和磷(P)等营养物质转化为水中的氨氮和亚硝酸盐等有害物质^[31]。该类物质是水产养殖中水污染的主要根源,对养殖生物的短期和长期应激产生重大影响。崔平等^[32]在 pH 与氨氮对黄颡鱼幼鱼生长与肝脏超氧化物歧化酶的影响研究发现,氨氮可能对肝脏和鳃组织造成损害,引起缺氧条件,阻碍鱼类的生长和发育,与实验结果相似。养殖密度为 0.5 条·L⁻¹、日投喂量为 3% 时,科斯塔氏直线脂鲤具有最高的生长性能,同时拥有最高的摄食率、最低的饵料和最优质的养殖水质(氨氮、亚硝酸盐最低),此时可将饲料最大程度地利用,同时在最短时间内获得大规格鱼体,尽可能缩短繁育周期。同时高密度养殖时,可以通过增加日投喂量来提高科斯塔氏直线脂鲤的生长,尽管这会降低科斯塔氏直线脂鲤的生长速度及养殖成本,后续可就生产效益方面做深入研究。同时在对养殖密度与日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤 FCR 进行线性回归分析得到标准化回归系数分别:0.562 和 0.771,因此日投喂量与养殖密度对科斯塔氏直线脂鲤 FCR 的影响是正向的,其中日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤的 FCR 影响最大。日投喂量与养殖密度对科斯塔氏直线脂鲤的 FI 有相同的影响。而对养殖密度与日投喂量在科斯塔氏直线脂鲤养殖水质中进行线性回归分析,得到相反的结论,养殖密度对养殖水质影响更大。

4 结论

(1) 本研究中科斯塔氏直线脂鲤体长-体质量关系式为 $W=0.016 5L^{2.537 3}$ 。

(2) 养殖密度和日投喂量对科斯塔氏直线脂鲤的 *FI*、*FCR* 存在交互作用效应, 后续可就此效应做更深入的研究。

(3) 养殖密度为 $0.5 \text{ 条} \cdot \text{L}^{-1}$ 和日投喂量为体质量 3%, 为本研究得到的科斯塔氏直线脂鲤最优养殖密度和日投喂量。

参考文献:

- [1] 贺加贝, 胡丽萍, 曲忠, 等. 饵料种类、规格、投喂量和养殖密度对脉红螺存活及生长的影响 [J]. 水产学杂志, 2021, 34(6): 36–40, 48.
- [2] VAN DE NIEUWEGIESSEN P G, OLWO J, KHONG S, et al. Effects of age and stocking density on the welfare of African catfish, *Clarias gariepinus* Burchell[J]. Aquaculture, 2009, 288(1/2): 69–75.
- [3] JENSEN M A, CARTER C G, ADAMS L R, et al. Growth and biochemistry of the spiny lobster *Sagmariasus verreauxi* cultured at low and high density from hatch to puerulus[J]. Aquaculture, 2013, 376–379: 162–170.
- [4] SALAS-LEITON E, ANGUIS V, MARTÍN-ANTONIO B, et al. Effects of stocking density and feed ration on growth and gene expression in the Senegalese sole (*Solea senegalensis*): potential effects on the immune response[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2010, 28(2): 296–302.
- [5] 陈云飞, 彭慧珍, 刘庄鹏, 等. 投喂水平对黄鳝(*Monopterus albus*)生长、肠道消化酶活性及部分血清生理生化指标的影响 [J]. 渔业科学进展, 2017, 38(2): 114–120.
- [6] 万为民. 配合饲料投喂量和粒径对绿盘鲍稚鲍生长和存活的影响 [J]. 渔业现代化, 2022, 49(1): 30–37.
- [7] 黄辉, 蒋霞敏, 姜小敏, 等. 不同底质、饵料种类和日投饵量对管角螺幼螺生长的影响 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2012, 25(2): 29–32.
- [8] 孙国祥. 大西洋鲑工业化循环水养殖投喂策略研究 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014.
- [9] MACEDA-VEIGA A, DOMÍNGUEZ-DOMÍNGUEZ O, ESCRIBANO-ALACID J, et al. The aquarium hobby: can sinners become saints in freshwater fish conservation?[J]. Fish and Fisheries, 2016, 17(3): 860–874.
- [10] RAGHAVAN R, DAHANUKAR N, TLUSTY M F, et al. Uncovering an obscure trade: threatened freshwater fishes and the aquarium pet markets[J]. Biological Conservation, 2013, 164: 158–169.
- [11] GHAFARI FARSANI H, GERAMI M H, FARSANI M N, et al. Effect of different levels of essential oils (*Satureja hortensis*) in diet on improvement growth, blood biochemical and immunity of Angelfish (*Pterophyllum scalare* Schultze, 1823) [J]. Natural Product Research, 2018.DOI: 10.1080/14786419.2018.1434635.
- [12] EVERS H G, PINNEGAR J K, TAYLOR M I. Where are they all from?— Sources and sustainability in the ornamental freshwater fish trade[J]. Journal of Fish Biology, 2019, 94(6): 909–916.
- [13] RAMOS T P A, LUSTOSA-COSTA S Y, LIMA R M O, et al. First record of *Moenkhausia costae* (Steindachner 1907) in the Paraíba do Norte basin after the São Francisco River diversion[J]. Biota Neotropica, 2021, 21(2): e20201049.
- [14] KIMMERER W, AVENT S R, BOLLENS S M, et al. Variability in length-weight relationships used to estimate biomass of estuarine fish from survey data[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2005, 134(2): 481–495.
- [15] MOUTOPOULOS D K, STERGIUO K I. Length-weight and length-length relationships of fish species from the Aegean Sea (Greece)[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2002, 18(3): 200–203.
- [16] ANEESH KUMAR K V, THOMY R, DEEPA K P, et al. Length-weight relationship of six deep-sea fish species from the shelf regions of western Bay of Bengal and Andaman waters[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2016, 32(6): 1334–1336.
- [17] SANI R, GUPTA B K, SARKAR U K, et al. Length-weight relationships of 14 Indian freshwater fish species from the Betwa (Yamuna River tributary) and Gomti (*Ganga* River tributary) rivers[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2010, 26(3): 456–459.
- [18] 程文, 纪毓鹏, 薛莹, 等. 采样设计对估计矛尾虾虎鱼体长-体质量关系参数 *b* 的影响 [J]. 水产学报, 2022, 46(12): 2357–2365.

- [19] 王普泽, 宋聃, 张尹哲, 等. 博斯腾湖鱼类资源组成、体长与体重关系及生长状况[J]. 生物资源, 2020, 42(2): 181–187.
- [20] JISR N, YOUNES G, SUKHN C, et al. Length-weight relationships and relative condition factor of fish inhabiting the marine area of the Eastern Mediterranean city, Tripoli-Lebanon[J]. Egyptian Journal of Aquatic Research, 2018, 44(4): 299–305.
- [21] SILEESH M, KURUP B M, KORATH A. Length at maturity and relationship between weight and total length of five deep-sea fishes from the, Andaman and Nicobar Islands of India, North-eastern Indian Ocean[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2020, 100(4): 639–644.
- [22] LÓPEZ-JIMÉNEZ D, ESPINOSA-CHAURAND L D, MAEDA-MARTÍNEZ A N, et al. Combined effect of temperature, salinity and dissolved oxygen on the survival of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry during transportation, at different densities and durations[J]. Aquaculture, 2024, 580: 740283.
- [23] SEYEDALHOSSEINI S H, SALATI A P, MOZANZADEH M T, et al. Effects of dietary seaweeds (*Gracilaria* spp. and *Sargassum* spp.) on growth, feed utilization, and resistance to acute hypoxia stress in juvenile Asian seabass (*Lates calcarifer*)[J]. Aquaculture Reports, 2023, 31: 101663.
- [24] LUPATSCH I, SANTOS G A, SCHRAMA J W, et al. Effect of stocking density and feeding level on energy expenditure and stress responsiveness in European Sea bass *Dicentrarchus labrax*[J]. Aquaculture, 2010, 298(3/4): 245–250.
- [25] DIAO W X, JIA R, HOU Y R, et al. Effects of stocking density on the growth performance, physiological parameters, antioxidant status and lipid metabolism of *Pelteobagrus fulvidraco* in the integrated rice-fish farming system[J]. Animals, 2023, 13(11): 1721.
- [26] 李大鹏, 庄平, 严安生, 等. 光照、水流和养殖密度对史氏鲟稚鱼摄食、行为和生长的影响[J]. 水产学报, 2004, 28(1): 54–61.
- [27] 石勇, 胡毅, 田芊芊, 等. 饲料中添加牛磺酸对不同养殖密度下青鱼幼鱼生长、免疫及抗胁迫能力的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(9): 4131–4143.
- [28] ŞENGÜL S, YAZIR D, ATASARAL Ş, et al. Growth modelling based on different feeding protocols of turbot (*Psetta maxima*)[J]. Aquaculture Research, 2022, 53(15): 5184–5194.
- [29] TIPPAYADARA N, DOOLGINDACHBAPORN S, SUKSRI A. Effects of feeding rates on growth performance, feed utilization and body composition of Asian red tail catfish (*Hemibagrus wyckioides*), cultured in northeast Thailand[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2016, 19(2): 57–64.
- [30] VALENTINE S, KWASEK K. Feeding rate and protein quality differentially affect growth and feeding efficiency response variables of zebrafish (*Danio rerio*)[J]. Zebrafish, 2022, 19(3): 94–103.
- [31] AUFFRET M, YERGEAU é, PILOTE A, et al. Impact of water quality on the bacterial populations and off-flavours in recirculating aquaculture systems[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2013, 84(2): 235–247.
- [32] 崔平, 强俊. pH与氨氮对黄颡鱼幼鱼生长与肝脏超氧化物歧化酶的影响[J]. 淡水渔业, 2018, 48(4): 39–44.

(责任编辑: 张秀梅)