

不同循环饥饿投喂模式对尼罗罗非鱼补偿生长的影响

李建¹, 王琨^{1,2}, 陈建春¹, 叶继丹^{1,2*}

(1.集美大学水产学院,厦门市饲料检测与安全评价重点实验室,福建 厦门 361021;

2.集美大学农业部东海海水健康养殖重点实验室,福建 厦门 361021)

摘要: 为了探讨尼罗罗非鱼对不同循环饥饿投喂模式的补偿生长效应,本实验分别采用每天投喂(S0)及饥饿1 d+投喂3 d(S1F3)、饥饿1 d+投喂5 d(S1F5)、饥饿1 d+投喂7 d(S1F7)、饥饿2 d+投喂3 d(S2F3)、饥饿2 d+投喂5 d(S2F5)和饥饿2 d+投喂7 d(S2F7)6种不同的循环投喂模式,用含33%蛋白质和8%脂肪的饲料饲养尼罗罗非鱼(均重13.50 g),饲养期为43 d。结果显示,S0组的增重率(806.74%)最高,与S1F3、S1F5和S1F7组差异不显著,但分别比S2F3、S2F5和S2F7组显著提高40.3%、33.6%和10.4%;S0组的特定生长率最低(5.36%),显著低于其他各组;与对照组相比,采用循环投喂模式没有改善饲料转化率和蛋白质效率,但却能明显提高日摄食率;各实验处理组肝体比、脏体比、肥满度、鱼体灰分含量、肌肉RNA/DNA比值及血清总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇和尿素氮含量与对照组差异不显著;S1F3、S1F5和S1F7组鱼体蛋白质和脂肪含量、血清甘油三酯含量及血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性与S0组差异不显著,但S2F3、S2F5和S2F7组鱼体蛋白质和脂肪含量及血清甘油三酯含量显著低于S0组,血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性显著高于S0组。研究表明,尼罗罗非鱼在S1F3、S1F5和S1F7模式下获得了完全补偿生长,而在S2F3、S2F5和S2F7模式下仅获得了部分补偿生长,且均是通过提高恢复投喂期间的摄食量来实现补偿生长。在获得完全补偿生长的3组中,S1F3组的实际投喂天数最短,仅为33 d,比每天投喂模式缩短了23.3%,因此在本实验条件下,饥饿1 d+投喂3 d是最佳的循环饥饿投喂模式。

关键词: 尼罗罗非鱼;投喂模式;补偿生长;鱼体成分;生化指标

中图分类号: S 963

文献标志码: A

鱼类经常因为季节、气温和水质等自然环境因素的变化而面临食物短缺问题^[1-2],在人工养殖过程中也可能因为饲料投喂不足或抢食不均而遭受饥饿胁迫^[2-4]。处于饥饿胁迫的鱼类在恢复食物供给后会出现一段快速生长期,其生长速度快于同期非饥饿的鱼类,这一现象称为鱼类的补偿生长^[5-6]。目前大多数研究者通常采用“饥饿再恢复投喂”的单一饥饿模式或“饥饿—投喂—再饥饿—再投喂”的循环饥饿模式来研究鱼类的补偿生长效应^[6]。研究结果表明,补偿生长在促进生长、提高饲料效率和降低劳动力成本等方面

有积极作用^[7-9],甚至能通过减少氮排放,在某种程度上降低水体污染^[10]。此外,在继饥饿后的恢复生长阶段,鱼体沉积营养物质的时间和顺序有所不同^[11-12],因此可基于补偿生长规律来调控鱼体营养再分配。然而,鱼类补偿生长的程度因其种类、生长阶段、饲料组成、饥饿和恢复投喂时间的不同而存在很大差异^[13-15],如出现超补偿生长、完全补偿生长、部分补偿生长和不能补偿生长等现象。鱼类的补偿生长机理比较复杂,目前仍不十分清楚。一般来讲,摄食率增加、饲料转化率提高、蛋白质合成加快以及能量储备增加是其主

收稿日期:2014-01-05 修回日期:2014-03-24

资助项目:国家自然科学基金(31372546);福建省自然科学基金(2012J01141);集美大学创新团队项目(2011A001)

通信作者:叶继丹,E-mail:yjdwk@sina.com

要的生理机制^[16-17]。一些研究还表明,鱼类对饥饿的耐受力有一定限度,在这个限度内,鱼体可通过加快生长速度和提高饲料利用率等来实现补偿生长,一旦超过这个限度,则会因摄食量不足或鱼体生理机能下降,出现消化功能衰竭等现象,从而丧失补偿生长能力^[18-20]。

在研究鱼类补偿生长时,由于不同研究者采用的饥饿和恢复投喂时间长短不一,导致实验结果差异较大,也不便于比较和分析^[6]。因此,需要进一步研究上述相关因素对鱼类补偿生长的影响,以解决其补偿生长效果的不确定性问题。相比于单期饥饿模式,循环饥饿可能是获得理想补偿生长效果更佳的一种方式^[1],其优点是缩短了饥饿时间,可减轻饲养人员的劳动强度,降低人工成本。本实验探讨了不同循环饥饿投喂模式对尼罗罗非鱼补偿生长的影响,旨在为建立一种减轻劳动力强度、降低养殖成本的投喂策略提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

根据尼罗罗非鱼的营养需要,以鱼粉和豆粕作为蛋白源,以鱼油、大豆油和磷脂作为脂肪源,以微晶纤维素作为填充剂,配制粗蛋白质水平为33%、粗脂肪水平为8%的实验饲料(表1)。根据饲料配方将所有原料用粉碎机粉碎后,98%以上过60目筛网,然后用双螺杆制粒机(CD4×1TS多功能催化剂成型机)制成直径为2.5 mm的硬颗粒饲料,自然风干后于-20℃冰箱保存备用。实验所用鱼苗购自当地一家水产养殖场,运至养殖实验室后先放入2%的食盐水中浸泡30 min,然后放入3个有循环水过滤装置的FRP桶(600 L)中暂养,15 d后,选取规格相近的鱼随机分配到21个有循环水装置的玻璃水族箱(150 L)中,每箱20尾。

1.2 饲养管理

本实验采用饥饿1和2 d的循环饥饿投喂模式,即每饥饿1或2 d后再分别恢复投喂3、5和7 d。以饥饿1 d+投喂3 d(S1F3)、饥饿1 d+投喂5 d(S1F5)、饥饿1 d+投喂7 d(S1F7)、饥饿2 d+投喂3 d(S2F3)、饥饿2 d+投喂5 d(S2F5)和饥饿2 d+投喂7 d(S2F7)6种不同的循环投喂模式作为实验处理组,以每天投喂(S0)作为对照

组,每种投喂模式设置3个重复组。饲养过程中每箱鱼按各自的投喂模式进行投喂,分别在每天8:00、13:00和18:00给鱼投喂饲料至表现饱食(饥饿期内不投喂)。每次喂料半小时后用虹吸法收集剩余饲料,同时清除粪便,然后换水1/4~1/3。饲养期间水温27.5~31.8℃,溶氧量4.7~5.3 mg/L,硝酸氮含量0~0.25 mg/L,pH值6.72~7.83,养殖实验期43 d。

表1 饲料配方及营养组成
Tab.1 Formulation and composition of experimental diets

原料 ingredients	含量 content
鱼粉 ¹ fish meal	27.00
豆粕 ² soyabean meal	21.00
面粉 ² wheat flour	36.00
鱼油/豆油 ² fish/soybean oil(1:1)	3.60
大豆卵磷脂 ² soybean lecithin	2.00
微晶纤维素 ³ crystalline cellulose	8.40
多种维生素 ⁴ vitamin premix	0.20
多种矿物质 ⁴ mineral premix	0.15
磷酸二氢钙 calcium dihydrogen phosphate	1.50
氯化胆碱 choline chloride	0.13
维生素 C vitamin C	0.02
合计 total	100.00
营养成分 nutrient level	
干物质 dry matter	91.19
粗蛋白质 crude protein	32.86
粗脂肪 crude lipid	8.11
灰分 ash	5.77

注:1.由秘鲁 Tecnológica de Alimentos S. A 公司提供。2.由厦门百穗行科技股份有限公司提供。3.由安徽山河药用辅料股份有限公司提供。4.由烟台海康生物技术有限公司提供

Notes: 1. Obtained from Tecnológica de Alimentos S. A, Peru. 2. Obtained from Baisuihang Technology Co., Ltd, Xiamen, China. 3. Obtained from Shanhe Pharmaceutical Co., Ltd, Anhui, China. 4. Obtained from Haikang Biotechnology Co., Ltd, Yantai, China

1.3 样品采集与测定

养殖实验结束后,记录各水族箱鱼数,并称活体质量。先依次从每个水族箱随机抽取3尾鱼,用丁香酚麻醉后测量每尾鱼的体长和体质量,然后用2 mL一次性无菌注射器从尾静脉取血。全血样本以6 000 r/min离心10 min后收集血清,然后将这3尾鱼的血清合并为一个样本保存于-80℃冰箱中,待测生化指标。抽血后将鱼解剖,取出内脏和肝脏并称量,然后从鱼背部侧取肌肉,肌肉样本保存于-80℃冰箱中,待测RNA/

DNA 比值。最后依次从每个水族箱随机抽取 3 尾鱼合并,作为一个全鱼样本,并保存于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中,待测鱼体成分。

饲料和全鱼中的水分采用 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 常压干燥法测定,粗蛋白采用 Foss 全自动凯氏定氮仪测定,粗脂肪采用索氏抽提法测定,灰分采用 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 马弗炉灼烧法测定。

谷丙转氨酶(GPT)、谷草转氨酶(GOT)和尿素氮(BUN)均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定。甘油三酯(TG)、总胆固醇(CHO)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)均采用北京北化康泰临床试剂有限公司生产的试剂盒测定。肌肉中 RNA 和 DNA 采用宝生物工程(大连)有限公司生产的试剂盒提取,然后用 Nanodrop 紫外分光光度计测定其含量。

1.4 计算公式

各组鱼的增重率(WGR)、特定生长率(SGR)、日摄食率(DFI)、饲料效率(FE)、蛋白质效率(PER)、肥满度(CF)、肝体比(HSI)和脏体比(VSI)分别按以下公式计算:

$$\text{增重率}(\text{weight gain rate, WGR, \%}) = 100 \times (W_t - W_0) / W_0$$

$$\text{特定生长率}(\text{specific growth rate, SGR, \% / d}) = 100 \times (\ln W_t - \ln W_0) / t$$

$$\text{日摄食率}(\text{daily feeding intake, DFI, \% / d}) = 100 \times W_f / (W_t / 2 + W_0 / 2) / t$$

$$\text{饲料效率}(\text{feed efficiency, FE, \%}) = 100 \times (W_t - W_0) / W_f$$

$$\text{蛋白质效率}(\text{protein efficiency ratio, PER}) = (W_t - W_0) / (W_f \times 32.86\%)$$

$$\text{肥满度}(\text{condition factor, CF}) = 100 \times W_b / L^3$$

$$\text{肝体比}(\text{hepatosomatic index, HSI, \%}) = 100 \times W_h / W_b$$

$$\text{脏体比}(\text{viscerasomatic index, VSI, \%}) = 100 \times W_v / W_b$$

式中, W_0 为初始体质量(g), W_t 为末体质量(g), W_f 为摄食饲料总量(g), W_b 为样品鱼体质量(g), W_h 为样品鱼肝脏重(g), W_v 为样品鱼内脏重(g), L 为样品鱼体长(cm), t 为实际投喂天数(d),32.86% 为饲料中粗蛋白质含量。

1.5 数据统计与分析

所有实验数据均以平均值 \pm 标准差(mean \pm

SD)表示,采用 SPSS 17.0 统计软件进行单因素方差分析,若存在显著差异,则用 Student-Newman-Keuls 法进行多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 生长性能

本实验各组罗非鱼的成活率均为 100%,且各组的初均重无显著差异($P > 0.05$)。S0 组的 WGR 最高,为 806.74%,分别比 S2F3、S2F5 和 S2F7 组显著高 40.3%、33.6% 和 10.4% ($P < 0.05$),但与 S1F3、S1F5 和 S1F7 组差异不显著($P > 0.05$)。S0 组的 SGR 最低,为 5.36%,显著低于其他组($P < 0.05$)。对于饥饿 1 d 的循环投喂模式,罗非鱼的 WGR 不受恢复投喂天数影响($P > 0.05$),但 SGR 却随着恢复投喂天数的延长呈显著降低趋势($P < 0.05$);对于饥饿 2 d 的循环投喂模式,罗非鱼的 WGR 随着恢复投喂天数的延长而显著升高($P < 0.05$),但 SGR 却呈显著下降趋势($P < 0.05$)。各循环投喂组 FE、PER、HSI、VSI 和 CF 与 S0 组均无显著差异($P > 0.05$),但采用饥饿 2 d 的循环投喂模式时,罗非鱼的 HSI 和 VSI 较饥饿 1 d 的处理组有所提高。S1F3、S1F5 和 S1F7 组的 FI 与 S0 组差异不显著($P > 0.05$),但 S2F3、S2F5 和 S2F7 组的 FI 分别比 S0 组显著低 28.2%、26.5% 和 9.9% ($P < 0.05$)。与 S0 组相比,各处理组 DFI 均显著提高了 13.4%~48.3% (表 2)。

2.2 鱼体成分

S1F3、S1F5 和 S1F7 组鱼体水分、蛋白质和脂肪含量与 S0 组均无显著差异($P > 0.05$);S2F3、S2F5 和 S2F7 组鱼体水分含量显著高于 S0 组($P < 0.05$),但鱼体蛋白质和脂肪含量显著低于 S0 及 S1F3、S1F5 和 S1F7 组。对于饥饿 1 d 的循环投喂模式,延长恢复投喂天数不影响鱼体蛋白质和脂肪含量($P > 0.05$);对于饥饿 2 d 的循环投喂模式,延长恢复投喂天数能显著增加鱼体蛋白质和脂肪含量($P < 0.05$)。各组鱼体灰分含量及肌肉 RNA/DNA 比值差异不显著(表 3)。

2.3 血清生化指标

不同循环投喂模式对罗非鱼血清 CHO、HDL-C、LDL-C 和 BUN 含量均无显著影响($P > 0.05$)。S0 组血清 TG 含量在所有组中最高,但该组血清 GPT 活性在所有组中最低。S1F3、S1F5

和 S1F7 组血清 TG 含量及 GPT 和 GOT 活性与 S2F7 组血清 TG 含量显著低于 S0 组,但 GPT 和 S0 组均无显著差异 ($P > 0.05$)。S2F3、S2F5 和 GOT 活性显著高于 S0 组(表 4)。

表 2 不同循环饥饿投喂模式对生长的影响

Tab. 2 Effect of different cyclic starvation and refeeding regimes on the growth performance

处理组 treatments	S0	S1F3	S1F5	S1F7	S2F3	S2F5	S2F7	P-value
初均重/g IAW	13.43 ± 0.14	13.57 ± 0.20	13.57 ± 0.23	13.53 ± 0.03	13.45 ± 0.15	13.48 ± 0.16	13.67 ± 0.24	0.615
末均重/g FAW	121.80 ± 0.50 ^a	120.47 ± 0.50 ^a	119.30 ± 2.00 ^a	117.77 ± 1.79 ^a	90.80 ± 0.53 ^d	94.82 ± 0.75 ^c	113.50 ± 1.15 ^b	<0.001
增重率/% WGR	806.74 ± 6.75 ^a	788.08 ± 11.71 ^a	786.11 ± 6.52 ^a	770.15 ± 23.02 ^a	575.17 ± 10.85 ^d	603.66 ± 13.46 ^c	730.61 ± 12.65 ^b	<0.001
特定生长率/(%/d) SGR	5.36 ± 0.03 ^c	6.62 ± 0.04 ^b	6.00 ± 0.08 ^c	5.78 ± 0.01 ^d	7.00 ± 0.15 ^a	6.21 ± 0.16 ^c	6.11 ± 0.21 ^c	<0.001
饲料效率/% FE	97.87 ± 0.98	98.17 ± 0.55	99.43 ± 1.14	98.63 ± 1.31	97.30 ± 1.06	99.87 ± 0.25	99.07 ± 1.05	0.630
蛋白质效率 PER	2.97 ± 0.03	2.98 ± 0.02	3.01 ± 0.06	2.98 ± 0.04	2.96 ± 0.03	3.02 ± 0.01	3.01 ± 0.03	0.590
总摄食量/g FI	110.75 ± 0.90 ^a	108.90 ± 1.36 ^a	105.28 ± 1.48 ^a	107.93 ± 1.24 ^a	79.50 ± 1.21 ^c	81.45 ± 1.06 ^c	99.77 ± 1.09 ^b	<0.001
日摄食率/(%/d) DFI	3.81 ± 0.04 ^c	4.93 ± 0.02 ^b	4.40 ± 0.09 ^{cd}	4.32 ± 0.10 ^d	5.65 ± 0.07 ^a	4.85 ± 0.04 ^b	4.48 ± 0.04 ^c	<0.001
肝体比/% HSI	1.67 ± 0.10 ^{abc}	1.70 ± 0.33 ^{abc}	1.36 ± 0.10 ^{bc}	1.29 ± 0.12 ^c	1.87 ± 0.23 ^a	1.84 ± 0.10 ^a	1.78 ± 0.10 ^{ab}	0.005
脏体比/% VSI	8.57 ± 0.25 ^{ab}	8.45 ± 0.25 ^{ab}	7.81 ± 0.22 ^b	8.67 ± 0.21 ^{ab}	9.18 ± 0.69 ^a	9.04 ± 0.76 ^a	8.93 ± 0.27 ^a	0.038
肥满度 CF	3.52 ± 0.18	3.37 ± 0.07	3.33 ± 0.11	3.33 ± 0.08	3.45 ± 0.22	3.38 ± 0.14	3.44 ± 0.04	0.580
投喂天数 feed-allocated days	43	33	36	38	27	31	35	-

注:同一行数字上标字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$),下同

Notes: Values with different superscripts in each row indicate significant difference ($P < 0.05$). IAW. initial average weight; FAW. final average weight; WGR. weight gain rate; SGR. specific growth rate; FE. feed efficiency; PER. protein efficiency ratio; FI. feed intake; DFI. daily feeding intake; HSI. hepatosomatic index; VSI. viscerasomatic index; CF. condition factor, the same as the following

表 3 不同循环饥饿投喂模式对鱼体成分的影响

Tab. 3 Effect of different cyclic starvation and refeeding regimes on body composition

处理组 treatments	水分/% moisture	粗蛋白/% crude protein	粗脂肪/% crude lipid	灰分/% ash	肌肉 muscle RNA/DNA
S0	73.37 ± 0.27 ^c	14.77 ± 0.12 ^a	7.59 ± 0.09 ^a	3.65 ± 0.05	2.86 ± 0.13
S1F3	73.76 ± 0.21 ^{bc}	14.72 ± 0.08 ^a	7.62 ± 0.07 ^a	3.64 ± 0.07	2.89 ± 0.09
S1F5	73.44 ± 0.26 ^c	14.77 ± 0.24 ^a	7.64 ± 0.10 ^a	3.77 ± 0.08	2.86 ± 0.05
S1F7	73.10 ± 0.14 ^c	14.80 ± 0.09 ^a	7.67 ± 0.18 ^a	3.62 ± 0.06	2.88 ± 0.07
S2F3	75.15 ± 0.06 ^a	14.15 ± 0.13 ^d	6.73 ± 0.06 ^d	3.76 ± 0.10	2.72 ± 0.08
S2F5	74.33 ± 0.13 ^b	14.38 ± 0.26 ^c	6.95 ± 0.11 ^c	3.64 ± 0.14	2.77 ± 0.14
S2F7	73.91 ± 0.19 ^b	14.54 ± 0.18 ^b	7.17 ± 0.06 ^b	3.62 ± 0.13	2.81 ± 0.11
P-value	<0.001	<0.001	<0.001	0.531	0.584

注:同一列数字上标字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$),下同

Notes: Values with different superscripts in each column indicate significant difference ($P < 0.05$), the same as the following

表 4 不同循环饥饿投喂模式对血清生化指标的影响

Tab. 4 Effect of different cyclic starvation and refeeding regimes on blood serum biochemical indexes

处理组 treatments	TG/ (mmol/L)	CHO/ (mmol/L)	HDL-C/ (mmol/L)	LDL-C/ (mmol/L)	GPT/ (U/L)	GOT/ (U/L)	BUN/ (mmol/L)
S0	3.24 ± 0.17 ^a	4.38 ± 0.33	2.32 ± 0.14	2.06 ± 0.04	17.34 ± 0.61 ^d	73.74 ± 2.09 ^d	4.60 ± 0.35
S1F3	3.17 ± 0.11 ^a	4.36 ± 0.28	2.30 ± 0.09	2.06 ± 0.06	17.43 ± 0.28 ^d	72.53 ± 2.11 ^d	4.15 ± 0.04
S1F5	3.06 ± 0.17 ^a	4.52 ± 0.04	2.32 ± 0.36	2.03 ± 0.11	18.38 ± 0.93 ^{cd}	71.91 ± 0.54 ^d	4.42 ± 0.31
S1F7	2.98 ± 0.02 ^a	4.33 ± 0.19	2.24 ± 0.23	2.07 ± 0.05	18.11 ± 0.10 ^{cd}	71.89 ± 1.49 ^d	4.18 ± 0.29
S2F3	2.51 ± 0.14 ^b	4.36 ± 0.21	2.27 ± 0.17	1.99 ± 0.15	26.14 ± 1.69 ^a	83.15 ± 2.28 ^a	4.57 ± 0.26
S2F5	2.54 ± 0.27 ^b	4.38 ± 0.11	2.23 ± 0.09	2.10 ± 0.07	21.41 ± 0.85 ^b	79.89 ± 1.52 ^b	4.66 ± 0.16
S2F7	2.55 ± 0.10 ^b	4.52 ± 0.12	2.30 ± 0.12	2.06 ± 0.16	19.26 ± 1.37 ^c	77.55 ± 1.05 ^c	4.56 ± 0.37
P-value	<0.001	0.716	0.766	0.754	<0.001	<0.001	0.118

注: TG. 甘油三酯; CHO. 总胆固醇; HDL-C. 高密度脂蛋白胆固醇; LDL-C. 低密度脂蛋白胆固醇; GPT. 谷丙转氨酶; GOT. 谷草转氨酶; BUN. 尿素氮

Notes: TG. triglycerides; CHO. total cholesterol; HDL-C. high density lipoprotein cholesterol; LDL-C. low density lipoprotein cholesterol; GPT. glutamic-pyruvic transaminase; GOT. glutamic-oxalacetic transaminase; BUN. blood urea nitrogen

3 讨论

补偿生长是动物应对自然环境变化而采取的一种独特生存策略,这一现象在鱼类中广泛存在^[6]。大量研究表明,在单期或循环饥饿投喂模式下,许多鱼类都能表现出补偿生长效应^[21-22]。由于鱼类应对食物亏缺的适应能力有限,因此饥饿时间往往是影响补偿生长程度的关键因素^[23-25]。Abdel-Hakim等^[25]采用每周分别饥饿1、2和3d的循环投喂模式饲养罗非鱼,发现前两种投喂模式组获得了完全补偿生长,而3d的投喂模式组仅获得了部分补偿生长。Wang等^[14]采用更长饥饿时间的循环投喂模式时(饥饿1w+投喂2w、饥饿2w+投喂4w和饥饿4w+投喂8w),发现罗非鱼仅表现为部分补偿生长。这些结果表明,随着循环饥饿天数的增加,罗非鱼补偿生长的程度有所下降。与此结论一致,本实验采用的6种循环投喂模式中,罗非鱼的SGR较对照组均有明显提高,说明无论采用饥饿1d还是2d的循环投喂模式,罗非鱼均表现出补偿生长效应,只是其补偿生长程度有所不同。在饥饿1d的循环投喂模式下,罗非鱼获得了完全补偿生长,而在饥饿2d的循环投喂模式下,其仅表现为部分补偿生长。

一些研究认为,鱼类补偿生长的程度与其饲料效率增加有关^[25-26],但也有研究认为,补偿生长与饲料效率无关,而与摄食量增加有关,表现为摄食率提高^[10,23]。本实验中,无论采用何种循环投喂模式,罗非鱼的日摄食率都有大幅提高,但饲料转化率和蛋白质效率没有明显变化,说明其均是通过促进食欲并提高摄食量来实现补偿生长的。当采用饥饿1d的循环投喂模式时,罗非鱼的总摄食量达到对照组水平,从而获得了完全补偿生长;而在饥饿2d的循环投喂模式下,尽管其日摄食率也比对照组高,但总摄食量明显下降,因此仅获得了部分补偿生长。这说明在连续饥饿2d再恢复投喂的循环模式下,即使延长投喂时间,也不足以使罗非鱼摄取到足够饲料来满足生长所需。此外,有研究者认为鱼类在饥饿后出现摄食率增加,很可能与下丘脑分泌的一种食欲促进因子——神经肽Y的调节有关^[27],但具体调控机理目前尚不明确,有待进一步研究。

鱼类处于饥饿状态下会动用机体营养物质来维持生命活动,通常情况下糖类和脂肪首先被利

用。当恢复投喂时,机体的合成代谢随之增强,以弥补损耗的营养物质^[5,15,18]。Peres等^[5]采用单期饥饿投喂模式研究金头鲷(*Kareius bicoloratus*)的补偿生长时发现,在饥饿状态下其肝糖原和脂肪被大量消耗供能,HSI和VSI下降明显,但恢复投喂一段时间,其HSI和VSI又恢复至正常水平。在不同的循环饥饿投喂模式下,Nikki等^[28]发现虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的HSI和VSI没有明显变化。本实验中,尽管采用循环投喂模式没有显著影响罗非鱼的CF,但循环饥饿天数由1d增至2d时,其HSI和VSI出现不同程度的升高。这一现象与鲁雪报等^[22]对中华鲟(*Acipenser sinensis*)的研究结果类似,可能是由于饥饿2d对养分的消耗程度大,当再恢复投喂时,机体合成代谢随之增强,从而促进了养分在肝脏和内脏等组织中的沉积。此外,本实验还发现,采用饥饿1d的循环投喂模式不影响鱼体成分,但在饥饿2d的循环投喂模式下,鱼体蛋白质和脂肪含量却明显降低。出现这种现象的原因,很可能是鱼体营养物质沉积与鱼的摄食量有关。当采用饥饿2d的循环投喂模式时,罗非鱼的总摄食量明显减少,相应地,其鱼体蛋白质和脂肪的沉积量也明显下降。从血清生化指标来看,TG含量与鱼体脂肪含量的变化趋势一致,但GPT和GOT活性却与鱼体蛋白质含量的变化趋势相反,呈明显的升高。这说明循环饥饿天数由1d增至2d时,鱼体蛋白质代谢强度增加,但该代谢的增强并没有促进鱼体蛋白质的沉积。这一现象与养分优先在脏器中沉积,然后在其他组织如肌肉中沉积的顺序有关^[5,11-12]。另一方面,在饥饿2d的循环投喂模式下,罗非鱼血清GPT和GOT活性明显高于饥饿1d的循环投喂组,且HSI也有所增加,这提示较长时间的饥饿可能对肝功能产生一定负面影响。因此,肝功能的下降最终反映在鱼体蛋白质和脂肪沉积量的下降,同时,这也意味着罗非鱼的肌肉比例有所降低。

在补偿生长实验中,常用RNA/DNA比值来反映鱼体的营养状况。当鱼类处于饥饿状态时,鱼体RNA/DNA比值下降,但在恢复生长阶段,其RNA/DNA比值增加,并随恢复投喂时间的延长逐渐上升至正常水平^[13]。本实验结果表明,不同循环投喂模式对肌肉RNA/DNA比值没有明显影响,与此同时,各循环投喂组罗非鱼的HSI、

VSI 和 CF 也较对照组没有明显变化,这说明无论采用何种投喂模式,鱼体仍处于良好营养状况,尽管在饥饿 2 d 的循环投喂模式下,罗非鱼获得了较差的生长性能。

4 结论

以 WGR 和 SGR 为评价指标,尼罗罗非鱼在 S1F3、S1F5 和 S1F7 投喂模式下获得了完全补偿生长,而在 S2F3、S2F5 和 S2F7 投喂模式下仅获得了部分补偿生长。由此可见,尼罗罗非鱼的补偿生长效应受饥饿和恢复投喂天数的影响较大,过长的饥饿时间明显降低了其补偿生长程度,而过长的恢复投喂时间则会造成饲料和劳动力成本的浪费。因此,从补偿生长效果和实际投喂天数考量,饥饿 1 d + 投喂 3 d 是最佳的循环饥饿投喂模式。关于今后补偿生长的研究工作,作者建议在加强其生理机制研究的同时,应尤其注重结合生产实际,采用更加合理的实验方案,不断完善补偿生长技术,用以指导水产养殖生产。

参考文献:

- [1] Turano M J, Borski R J, Daniels H V. Effects of cyclic feeding on compensatory growth of hybrid striped bass (*Morone chrysops* × *M. saxatilis*) foodfish and water quality in production ponds [J]. *Aquaculture Research*, 2008, 39(14): 1514 - 1523.
- [2] Abolfathi M, Hajimoradloo A, Ghorbani R, et al. Compensatory growth in juvenile roach *Rutilus caspicus*: Effect of starvation and re-feeding on growth and digestive surface area [J]. *Journal of Fish Biology*, 2012, 81(6): 1880 - 1890.
- [3] Velázquez M, Zamora S, Martínez F J. Influence of environmental conditions on demand-feeding behavior of gilthead seabream (*Sparus aurata*) [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2004, 20(6): 536 - 541.
- [4] Bavčević L, Klanjšček T, Karamarko V, et al. Compensatory growth in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) compensates weight, but not length [J]. *Aquaculture*, 2010, 301(1-4): 57 - 63.
- [5] Peres H, Santos S, Oliva-Teles A. Lack of compensatory growth response in gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles following starvation and subsequent refeeding [J]. *Aquaculture*, 2011, 318(3): 384 - 388.
- [6] Ali M, Nicieza A, Wootton R J. Compensatory growth in fishes: A response to growth depression [J]. *Fish and Fisheries*, 2003, 4(2): 147 - 190.
- [7] Huang G, Wei L, Zhang X, et al. Compensatory growth of juvenile brown flounder *Paralichthys olivaceus* (Temminck & Schlegel) following thermal manipulation [J]. *Journal of Fish Biology*, 2008, 72(10): 2534 - 2542.
- [8] Eroldoğan O T, Ta bozan O, Tabakoğlu S. Effects of restricted feeding regimes on growth and feed utilization of juvenile gilthead sea bream, *Sparus aurata* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2008, 39(2): 267 - 274.
- [9] Maclean A, Metcalfe N B. Social status, access to food, and compensatory growth in juvenile Atlantic salmon [J]. *Journal of Fish Biology*, 2001, 58(5): 1331 - 1346.
- [10] Blanquet I, Oliva-Teles A. Effect of feed restriction on the growth performance of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) juveniles under commercial rearing conditions [J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41(8): 1255 - 1260.
- [11] Heide A, Foss A, Stefansson S O, et al. Compensatory growth and fillet crude composition in juvenile Atlantic halibut: Effects of short term starvation periods and subsequent feeding [J]. *Aquaculture*, 2006, 261(1): 109 - 117.
- [12] Turchini G M, Francis D S, De Silva S S. Finishing diets stimulate compensatory growth: Results of a study on Murray cod, *Maccullochella peelii peelii* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2007, 13(5): 351 - 360.
- [13] Gao L J, Chen L Q, Song B. Effect of starvation and compensatory growth on feeding, growth and body biochemical composition in *Acipenser schrenckii* juveniles [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(3): 279 - 284. [高露姣,陈立侨,宋兵.饥饿和补偿生长对史氏鲟幼鱼摄食、生长和体成分的影响.水产学报,2004,28(3):279-284.]
- [14] Wang Y, Li C, Qin J G, et al. Cyclical feed deprivation and refeeding fails to enhance compensatory growth in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L [J]. *Aquaculture Research*, 2009, 40(2): 204 - 210.
- [15] Fang J H, Tian X L, Jiang H B, et al. Effects of repetitive periods of fasting and satiation feeding on the growth, body composition, metabolism and energy budget of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(7): 1090 - 1097. [房景辉,田相利,姜海滨,等.

- 不同循环投喂模式对半滑舌鳎的生长、体成分组成、代谢和能量收支的影响. 水产学报, 2011, 35(7): 1090 - 1097.]
- [16] Ribeiro F F, Tsuzuki M Y. Compensatory growth responses in juvenile fat snook, *Centropomus parallelus* Poey, following food deprivation [J]. Aquaculture Research, 2010, 41(9): e226 - e233.
- [17] Tufan E O, Metin K, Barı S. Effects of starvation and re-alimentation periods on growth performance and hyperphagic response of *Sparus aurata* [J]. Aquaculture Research, 2006, 37(5): 535 - 537.
- [18] Gaylord T G, MacKenzie D S, Gatlinlii D M. Growth performance, body composition and plasma thyroid hormone status of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) in response to short-term feed deprivation and refeeding [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2001, 24(1): 73 - 79.
- [19] Cui Z H, Wang Y, Qin J G. Compensatory growth of group-held gibel carp, *Carassius auratus gibelio* (Bloch), following feed deprivation [J]. Aquaculture Research, 2006, 37(3): 313 - 318.
- [20] Bélanger F, Blier P U, Dutil J D. Digestive capacity and compensatory growth in Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2002, 26(2): 121 - 128.
- [21] Jiang H B, Jiang Z Q. The effects of the cyclic starvation-feeding on growth and food utilization in juvenile flounder *Paralichthys olivaceus* [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2007, 22(3): 231 - 234. [姜海波, 姜志强. 周期性饥饿一再投喂对牙鲆幼鱼生长和饲料利用的影响. 大连水产学院学报, 2007, 22(3): 231 - 234.]
- [22] Lu X B, Xiao H, Zhang D Z, et al. Compensatory growth and biochemical composition after experiencing cycles of feed deprivation and re-feeding in juvenile Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* [J]. Freshwater Fisheries, 2009, 39(3): 64 - 67. [鲁雪报, 肖慧, 张德志, 等. 中华鲟幼鱼循环饥饿后的补偿生长和体成分变化. 淡水渔业, 2009, 39(3): 64 - 67.]
- [23] Oh S Y, Noh C H, Kang R S, et al. Compensatory growth and body composition of juvenile black rockfish *Sebastes schlegeli* following feed deprivation [J]. Fisheries Science, 2008, 74(4): 846 - 852.
- [24] Ou Y J, Liu Z W. Starvation and compensatory growth in the young *Lutjanus sebae* [J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(3): 323 - 328. [区又君, 刘泽伟. 千年笛鲷幼鱼的饥饿和补偿生长. 水产学报, 2007, 31(3): 323 - 328.]
- [25] Abdel-Hakim N F, Abo State H A, Al-Azab A A, et al. Effect of feeding regimes on growth performance of juvenile hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*) [J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2009, 5(1): 49 - 54.
- [26] Ruan G L, Liu J F, Yang D Q. The effects of intermittent food-deprivation on growth, digestive enzyme activities and serum biochemical indices in the rice-field eel (*Monopterus albus*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(7): 1058 - 1065. [阮国良, 刘家芳, 杨代勤. 间歇性禁食对黄鳝生长、消化酶活性及血液生化指标的影响. 水产学报, 2013, 37(7): 1058 - 1065.]
- [27] Narnaware Y K, Peter R E. Influence of diet composition on food intake and neuropeptide Y (NPY) gene expression in goldfish brain [J]. Regulatory Peptides, 2002, 103(2): 75 - 83.
- [28] Nikki J, Pirhonen J, Jobling M, et al. Compensatory growth in juvenile rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), held individually [J]. Aquaculture, 2004, 235(1): 285 - 296.

Effect of different cyclic starvation and refeeding regimes on the compensatory growth of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)

LI Jian¹, WANG Kun^{1,2}, CHEN Jianchun¹, YE Jidan^{1,2*}

(1. Xiamen Key Laboratory for Feed Quality Testing and Safety Evaluation, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory of Healthy Mariculture for the East China Sea, Ministry of Agriculture, Xiamen 361021, China)

Abstract: A 43-day feeding trial was conducted to assess the compensatory growth response to different cyclic starvation and refeeding regimes in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed the diet containing 33% crude protein and 8% lipid. Seven feeding regimes were designed as follows: the control group of fish fed daily (S0, control), and other six groups that were subjected to 1 or 2 days of starvation followed by 3, 5 or 7 days of feeding to satiation, i. e. S1F3 (starved 1 d, then fed 3 d), S1F5 (starved 1 d, then fed 5 d), S1F7 (starved 1 d, then fed 7 d), S2F3 (starved 2 d, then fed 3 d), S2F5 (starved 2 d, then fed 5 d) and S2F7 (starved 2 d, then fed 7 d). Four hundred and twenty fish averaging 13.50 g were randomly distributed into twenty one 150-L-tanks (twenty fish per tank) and reared in circular flow-through fresh water. Each of the groups was allotted the diet three times a day for their respective refeeding days. The weight gain rate (806.74%) in group S0 was 40.3%, 33.6% and 10.4% higher than those in groups S2F3, S2F5 and S2F7 ($P < 0.05$), but was not different from those in groups S1F3, S1F5 and S1F7 ($P > 0.05$). The lowest specific growth rate (5.36%) was found in group S0, and was significantly lower than those in other groups ($P < 0.05$). Feed efficiency, protein efficiency ratio, hepatosomatic index, viscerasomatic index, and condition factor as well as whole-body ash content and muscle RNA/DNA ratio did not differ across treatments ($P > 0.05$), but the daily feed intake in groups subjected to any of the cyclic feeding regimes was significantly higher than that in group S0 ($P < 0.05$). The groups S2F3, S2F5 and S2F7 exhibited lower whole-body lipid and protein contents than group S0 ($P < 0.05$). However, groups S1F3, S1F5 and S1F7 did not show any difference in whole-body composition compared to group S0 ($P > 0.05$). In terms of blood biochemical components, total cholesterol, high density lipoprotein cholesterol, low density lipoprotein cholesterol and urea nitrogen contents did not differ across the treatments ($P > 0.05$). The value for triglycerides in group S0 was found the highest, and was higher than those in groups S2F3, S2F5 and S2F7 ($P < 0.05$). However, the value for glutamic-pyruvic transaminase was the lowest among treatments, and was lower than those in groups S2F3, S2F5 and S2F7 ($P < 0.05$). The serum activity of glutamic-oxalacetic transaminase in the control was similar to those in groups S1F3, S1F5 and S1F7, but lower than those in groups S2F3, S2F5 and S2F7 ($P < 0.05$). The results indicated that completely compensatory growth was observed in the tilapia subjected to 1 day of starvation followed by 3, 5 or 7 days of feeding to satiation, but partial compensation was found in the fish subjected to 2 days of starvation followed by 3, 5 or 7 days of feeding. Hyperphagia was triggered by the cyclic feeding regime, thus feed intake increased, resulting in growth compensation. Based upon the effect of compensation and actual days of feed intake, the cyclic feeding regime of S1F3 could be recommended for the tilapia rearing under the present experimental conditions.

Key words: *Oreochromis niloticus*; feeding regime; compensatory growth; body composition; biochemical indices

Corresponding author: YE Jidan. E-mail: yjdwk@sina.com