

doi: 10.7541/2022.2020.164

饲料能量密度和投喂水平对吉富罗非鱼生长和健康的影响

刘伟 蒋明 吴凡 田娟 陆星 喻丽娟 文华

(中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 武汉 430223)

摘要: 为探讨饲料能量密度(DED)和投喂水平(DFR)对鱼类生长和健康的影响, 本试验采用2×2双因子设计, 设置2个DED(对照组和高糖高脂组)和2个DFR(1倍和1.2倍表观饱食投喂对照组饲料的能量水平), 研究DED和DFR对吉富罗非鱼[*Oreochromis niloticus*, (14.59±0.06) g]生长性能、饲料利用、体成分、血液学指标和抵抗无乳链球菌(*Streptococcus agalactiae*)感染能力的影响。试验以40d为1个周期, 持续2个周期(周期 I 和周期 II)。研究结果发现, DED和DFR均未影响试验鱼的饲料效率($P>0.05$)。DED未影响试验鱼的生长($P>0.05$)。高DFR提升了试验鱼的末重($P<0.05$), 但降低了周期 II 的蛋白质沉积率($P<0.05$)。DED和DFR均未影响试验鱼的肥满度($P>0.05$)。在周期 I, 高DED仅增加了试验鱼的脏体比($P<0.05$); 但在周期 II, DED和DFR对试验鱼的肠体比和脏体比也产生了显著影响($P<0.05$)。在周期 I, 高DED引起了去内脏全鱼、内脏团粗脂肪含量显著升高($P<0.05$), 高DFR引起了肝脏粗脂肪含量显著升高($P<0.05$); 而在周期 II, 高DED和DFR均引起了去内脏全鱼、肝脏和肌肉粗脂肪含量显著升高($P<0.05$)。在试验期内, 高DED和DFR显著升高了试验鱼的血清甘油三酯、丙二醛含量($P<0.05$)和周期 I 的血细胞比容($P<0.05$), 降低了周期 II 的白细胞计数($P<0.05$); 高DED升高了试验鱼的血清碱性磷酸酶活性和周期 II 的血清胆固醇水平($P<0.05$), 降低了周期 I 的过氧化氢酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性($P<0.05$); 高DFR显著升高周期 I 试验鱼的血糖水平($P<0.05$)。无乳链球菌感染试验发现, 在周期 I, DED和DFR对试验鱼的成活率无显著影响($P>0.05$); 可在周期 II, 高DFR造成试验鱼成活率显著降低($P<0.05$)。以上结果表明, 高DFR能提高罗非鱼的生长速度, 但是会增加鱼体的脂肪沉积, 降低鱼体健康水平; 高DED更易于鱼体脂肪沉积, 不利于鱼体健康。

关键词: 饲料能量密度; 投喂量; 罗非鱼; 生长; 体成分; 血液学; 抗病力

中图分类号: S965.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2022)01-0058-11



能量是重要的营养指标, 是确定营养素精准供给的基础。能量供给水平与动物的生产性能和品质有密切关系。一般来说, 动物摄取能量越多, 日增重越快, 胴体脂肪含量也越多^[1]。然而, 在人类或其他哺乳动物中, 摄入过高能量会引起体脂肪异常沉积, 进一步导致胰岛素抵抗和脂代谢紊乱等具“代谢综合征”的症状^[2, 3], 也会引发炎症反应^[4], 造成免疫抑制^[5], 甚至引起癌症等其他严重疾病^[6]。

鱼类的高能量摄入通常受到饲料能量密度或(和)投喂水平的影响^[7]。饲料能量密度取决于饲料中三大主要营养物质—蛋白质、脂肪和碳水化

物(平均总能分别为23.6、39.5和17.2 kJ/g)^[8]的组成。近年来, 为节约蛋白质, 饲料中脂肪和可消化碳水化合物水平有增加的趋势, 导致饲料能量密度提高^[9]; 而在养殖过程中, 为追求鱼类快速增加体重, 饲料投喂水平过高的现象时有发生, 这均意味着鱼类摄入高能量的可能性变大。与人或其他哺乳动物类似, 高能量摄入也会引起鱼体脂肪异常沉积^[7], 并进一步造成鱼类免疫力降低^[10]和抗氧化能力减弱^[11]等影响。

然而, 研究发现, 在等能投喂时, 高脂饲料(脂肪水平达到最适生长需要量的2倍)导致鱼体脂肪

收稿日期: 2020-07-23; 修订日期: 2021-08-12

基金项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费(2018JBF05); 国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-46); 国家自然科学基金(31602178)资助[Supported by the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2018JBF05); the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-46); the National Natural Science Foundation of China (31602178)]

作者简介: 刘伟(1982—), 男, 博士; 主要从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: liuweiyf@yfi.ac.cn

通信作者: 文华, 研究员; E-mail: wenhua.hb@163.com

沉积超过20%, 但并未发现石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)免疫指标受到显著的影响^[12]; 而另一些研究表明, 在不等能投喂时, 伴随高脂^[13, 14]和高糖^[15]所引起的高能摄入会导致试验鱼的抗氧化能力降低、免疫力受损和抗病力下降等问题。这些结果似乎表明与能量密度相比, 摄入能量水平是影响鱼类健康的主要原因。因此, 有必要厘清饲料能量密度和投喂水平对鱼类生长和健康的影响。

罗非鱼是一种全球性的重要淡水经济鱼类, 其产量居世界淡水鱼第二位^[16], 也是我国重要的出口水产品, 自2005年以来, 其养殖产量均维持在 100×10^7 kg以上, 位居世界第一^[17]。在罗非鱼的养殖过程中, 经常会发现易受病害侵袭的鱼具有可能与高能摄入相关的腹腔和肝脏等部位脂肪异常沉积的表征。因此, 本研究以国内主养罗非鱼品系-吉富罗非鱼(GIFT, *Oreochromis niloticus*)为研究对象, 通过控制饲料能量密度和投喂水平, 饲养吉富罗非鱼, 研究不同时期其生长性能、体成分、血液学指标和抗无乳链球菌(*Streptococcus agalactiae*)感染能力的变化, 探讨摄入饲料能量的密度和水平对罗非鱼生长和健康的影响, 为鱼类的科学投喂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

以罗非鱼营养需要^[18]为依据, 以酪蛋白、明胶、糊精和大豆油等为原料, 配制成蛋白质水平为35%、脂肪水平为6%和糖水平为30%的对照组饲料; 另以同样原料, 配制成蛋白质水平为35%、脂肪水平为10%和糖水平为48%的高糖高脂饲料(配方见表1)。各原料粉碎过60目筛, 称重后混匀, 少量的组分(<5%)采用逐级扩大法混合, 用饲料机制成直径为2 mm, 长约3 mm的圆柱形颗粒, 100—105℃干燥10min(带式干燥机, DW型, 常州苏正干燥设备有限公司), 恢复室温后置于-20℃冰柜中冷藏备用。

1.2 试验鱼

试验用鱼来源于湖北英山罗非鱼原良种场。运回后, 暂养在循环水养殖系统中。先用商品料喂养, 使试验鱼恢复体质并适应养殖环境。正式试验前用对照组饲料暂养2周, 使试验鱼适应试验饲料, 每天投喂1次。

1.3 试验饲料能量表观消化率的测定(预试验)

选择规格整齐, 表观健康的罗非鱼, 分养于6个养殖桶中(有效容积450 L), 随机分为2组, 每桶放鱼60尾, 试验鱼的平均体重(5.28 ± 0.08) g, 分别投喂

表1 试验饲料配方和营养成分

Tab. 1 Formulation and composition of the experimental diets (%)

原料成分 Ingredient	饲料Diet	
	对照Control	高糖高脂High carbohydrate-high lipid
酪蛋白Casein	31.00	31.00
明胶Gelatin	7.00	7.00
糊精Dextrin	32.00	42.00
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	16.65	0.65
大豆油Soybean oil	3.00	6.00
玉米油Corn oil	3.00	6.00
维生素预混料Vitamin premix	1.00	1.00
矿物质预混料Mineral premix	1.00	1.00
磷酸二氢钙Monocalcium phosphate	2.00	2.00
氯化胆碱Choline chloride	0.25	0.25
牛磺酸Taurine	1.00	1.00
沸石粉Zeolite powder	1.90	1.90
二氧化钛Titanium dioxide	0.20	0.20
成分分析Proximate composition (dry matter, %)		
粗蛋白Crude protein	34.29	34.69
粗脂肪Crude lipid	6.26	12.63
灰分Ash	4.61	4.64
总能Total energy (kJ/g)	21.94	23.92
可消化能Digestible energy (kJ/g)	17.26	20.76

注: *维生素预混料由下列成分组成(g/kg预混料): 硫胺素盐酸盐. 5; 核黄素. 5; 泛酸钙. 10; D-生物素. 0.003; 盐酸吡哆醇. 4; 叶酸. 1.5; 肌醇. 200; L-维生素C-2-磷酸镁. 3.95; 烟酸. 6.05; α -维生素E醋酸酯. 50; 维生素K₃. 4; 视黄醇乙酸酯. 0.4; 维生素D₃. 160000 IU; 添加微晶纤维素至1 kg; *矿物质预混料由下列成分组成(g/kg预混料): 磷酸二氢钙. 135; 乳酸钙. 327; 硫酸亚铁. 2.125; 硫酸镁. 137; 磷酸二氢钠. 87.2; 氯化钠. 43.5; 氯化铝. 0.15; 碘酸钾. 0.125; 氯化钾. 75; 氯化铜. 0.1; 硫酸锰. 0.8; 氯化钴. 1; 硫酸锌. 3; 添加微晶纤维素至1 kg

Note: *Vitamin premix consists of the following ingredients (g/kg premix): thiamine hydrochloride. 5; riboflavin. 5; calcium pantothenate. 10; d-biotin. 0.003; pyridoxine hydrochloride. 4; folic acid. 1.5; inositol. 200; magnesium L-vitamin C-2-phosphate. 3.95; niacin. 6.05; vitamin E acetate. 50; vitamin K₃. 4; retinol acetate. 0.4; vitamin D₃. 160000 IU; add microcrystalline cellulose to 1 kg; *Mineral premix consists of the following ingredients (g/kg premix): calcium dihydrogen phosphate. 135; calcium lactate. 327; ferrous sulfate. 2.125; magnesium sulfate. 137; sodium dihydrogen phosphate. 87.2; sodium chloride. 43.5; aluminium chloride. 0.15; potassium iodate. 0.125; potassium chloride. 75; copper chloride. 0.1; manganese sulfate. 0.8; cobalt chloride. 1; zinc sulfate. 3; add microcrystalline cellulose to 1 kg

1.1中的2种试验饲料。每天表观饱食投喂3次(8:30、12:30和16:30), 并记录投喂量。养殖期间水温保持在(30±0.5)℃, 溶氧>5 mg/L, 氨氮<0.5 mg/L, pH为6.5—7.3, 亚硝酸盐<0.1 mg/L。试验期间所有

养殖桶连续充气。光照为自然光。在喂养2周后,开始收集粪便。结果发现,试验鱼对对照饲料的能量表观消化率为78.67%,对高糖高脂饲料的能量表观消化率为86.77%。

能量表观消化率的计算公式如下:

$$\text{能量表观消化率(ADCE, \%)} = 100 \times [1 - (N_f/N_d) \times (M_d/M_f)]$$

式中, M_d 为饲料中标记物含量(%), M_f 为粪便中标记物含量(%), N_d 为饲料中营养成分的含量(%), N_f 为粪便中营养成分的含量(%)。

1.4 试验设计和养殖管理

采用2×2双因子试验设计,设置2种饲料能量密度和2种投喂水平。试验饲料采用上述1.1中配制的2种饲料。以投喂对照饲料,15min表观饱食的量,作为正常投喂水平,设置高投喂水平的能量为正常投喂水平的1.2倍,以1.3预试验中取得的2种饲料的能量表观消化率为参考系数,得出每组的投喂量。高能量密度饲料投喂量计算公式如下:

$$\text{投喂量(DFR, g)} = a \times m \times (100 - M_c) \times \text{ADC}_c / \text{ADC}_h / (100 - M_h)$$

式中, a 为投喂水平的转换系数1或1.2, m 为试验鱼15min表观饱食对照饲料量(g), M_c 和 M_h 分别为对照组和高糖高脂饲料水分(%), ADC_c 和 ADC_h 为对照饲料和高糖高脂饲料能量表观消化率(%)。

选取体质健壮、规格整齐的720尾试验鱼,放入1套循环水养殖系统的12个桶(有效容积450 L)中,每桶放鱼60尾,初始体重为(14.59±0.06) g。分别以对照组饲料或高糖高脂饲料,并按照2种投喂水平饲养,共分为4组,即投喂对照组饲料+正常投喂水平的C组,投喂对照组饲料+高投喂水平的DC组,投喂高糖高脂饲料+正常投喂水平的HCL组,以及投喂高糖高脂饲料+高投喂水平的DHCL组。每组3个平行,每天投喂3次,高投喂水平组投喂时间延长至30min。其余同1.3预试验。

1.5 样品采集及检测方法

试验分为2个周期,每个周期40d。在每个周期结束后,所有试验鱼禁食24h,麻醉(MS-222, 100 mg/L)后,对每桶试验鱼进行记数和称体重,用于计算成活率、增重率和特定生长率,并根据总饲料投喂量计算饲料效率。每桶随机取鱼3尾,测量体长和体重,用于计算肥满度;随后于尾静脉取血,其中0.5 mL放于肝素钠抗凝管中,用于测定血液生理学指标,剩余的血液放入2 mL聚乙烯离心管中,4℃冰箱内静置2h,以3000 r/min的转速离心15min,得到空腹血清,保存于-20℃冰箱中,用于测定血清生化 and 抗氧化指标;而后取内脏和肝脏并称量,测量肠

道长度,用于计算肝体比、脏体比和肠体比;最后取背肌(背鳍下方侧线以上),用于测定常规成分。另取全鱼3尾,取肝脏和内脏,并保留肝脏、内脏团和去内脏全鱼,用于测定常规成分。

原计划在周期I取样后,每桶随机留取试验鱼30尾,用于周期II的试验。但是,在周期II的养殖试验进行至2周时,因操作失误导致试验鱼逃逸,造成生长和饲料利用数据难以准确统计。因此,计数并称量后,根据称重数据,每桶留取大小均匀的试验鱼17尾,并重新以此时为周期II的开始。

采用直接干燥法测定水分含量(GB/T 5009.3-2003)、凯氏定氮法测定粗蛋白质含量(GB/T 5009.5-2003)、索氏抽提法测定粗脂肪含量(GB/T 5009.6-2003)和灼烧称重法测定灰分含量(GB/T 5009.4-2003)。能量的测定使用量热仪(SDACM4000,湖南三德科技股份有限公司)测定。饲料和粪便中二氧化钛的测定参照Richter等^[19]。血液中的红细胞和白细胞数量采用细胞计数板法,血红蛋白采用沙利氏比色法测定,血细胞比容采用离心法测定(2000×g, 10min),血清生化指标全自动生化分析仪(CHEMIX-800,日本希森美康株式会社)测定。血清抗氧化指标采用商用试剂盒测定,购自南京建成生物工程研究所,按照其提供的方法检测。其余各指标的计算公式如下:

$$\text{增重率(WGR, \%)} = (W_f - W_i) / W_i \times 100$$

$$\text{特定生长率(SGR, \% / d)} = (\ln W_f - \ln W_i) / t \times 100$$

$$\text{饲料效率(FE)} = (W_f - W_i + W_d) / W_A$$

$$\text{成活率(SR, \%)} = N_f / N_i \times 100$$

$$\text{肥满度(CF, g / cm}^3\text{)} = W / L^3 \times 100$$

$$\text{肝体比(HSI)} = W_h / W \times 100$$

$$\text{脏体比(VSI)} = W_v / W \times 100$$

$$\text{肠体比(IST)} = L_i / L \times 100$$

$$\text{蛋白质沉积率(PRE, \%)} = [W_a \times W_p - (W_f - W_i + W_d) \times F_p] \times 100 / (W_a \times W_p)$$

式中, t 为每个周期的天数(d), W_f 和 W_i 分别为每周周期试验鱼的初、末均体重(g), W_f 、 W_i 和 W_d 分别为每周周期试验鱼的初、末总体重和死亡鱼体重(g), W 为鱼体重(g), L 为鱼体长(cm), N_f 和 N_i 分别为每周周期结束后和开始时鱼的尾数; W_h 、 W_v 和 L_i 分别为肝脏重(g)、内脏团重(g)和肠道长度(cm), W_a 、 W_p 和 F_p 分别为投喂饲料总重(g)、饲料粗蛋白含量(%)和全鱼粗蛋白含量(%)。

1.6 攻毒试验

养殖周期I和周期II结束后,每桶取鱼10尾,进行无乳链球菌(*S. agalactiae*)攻毒试验。根据之前试验^[20],从腹鳍基部按照每尾0.1 mL (1.0×10^8 cfu/

mL) 注射病菌稀释液。注射24h后开始记录死亡数, 共计7d。攻毒期间, 记录死亡鱼的病症, 并取刚死亡鱼的肝脏, 进行划线培养, 进一步确定是否为注射菌造成的死亡。攻毒期间不投喂。

1.7 数据处理

所有数据采用平均值±标准误表示。用SPSS 22.0软件对试验数据进行统计分析。用Levene方法进行方差齐性检验, 当方差不齐时, 进行反正弦或对数(lg)转换。对饲料能量密度和投喂水平进行双因素方差分析(Two-way ANOVA), 检验2个因子间的相互作用。当主因素或相互作用显著时, 用单因素方差分析(One-way ANOVA)中S-N-K法检验各试验组间的差异。所有分析取 $P<0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 生长性能和饲料利用

由表2可见, 在养殖周期 I 和周期 II 结束后, 试验鱼的成活率均高于95%, 并未受到饲料能量密度和投喂水平的影响($P>0.05$)。双因素方差分析发现, 饲料能量密度和投喂水平对试验鱼的生长性能和饲料利用无显著交互作用($P>0.05$); 在试验期内, 未发现饲料能量密度影响试验鱼的生长性能和饲

料利用效率($P>0.05$), 但饲料投喂水平显著影响试验鱼的末体重($P<0.05$)。S-N-K法检验发现, 在周期 I, 摄入同一饲料能量密度, 高投喂水平显著提高了试验鱼的末体重、增重率和特定生长率($P<0.05$); 在周期 II, DC组的蛋白质沉积率显著低于C组($P<0.05$)。

2.2 形体指标

由表3可见, 双因素方差分析发现, 在试验期内, 肥满度未受饲料能量密度或投喂水平的影响($P>0.05$)。在周期 I, 仅高能量密度饲料提高了试验鱼的脏体比($P<0.05$); 可是, 在周期 II, 试验鱼的肠体比、脏体比同时受到饲料能量密度和投喂水平的影响($P<0.05$), 而试验鱼的肝体比受到投喂水平的影响($P<0.05$)。S-N-K法检验发现, 在周期 I, DHCL组的脏体比显著高于C和DC组($P<0.05$), 但与HCL组的差异不显著($P>0.05$); 在周期 II, DC组试验鱼的肠体比最高, 显著高于C组和HCL组($P<0.05$); DHCL组的脏体比和肝体比最高, 且均显著高于C组和HCL组($P<0.05$)。

2.3 体成分

在周期 I (表4), 双因素方差分析发现, 饲料能量密度和投喂水平并未对去内脏全鱼、肝脏、内脏团和肌肉的常规营养成分产生显著的交互作用

表2 饲料能量密度和投喂水平对试验鱼生长和饲料利用效率的影响

Tab. 2 Effects of dietary energy density and feed ration on grow performance and feed utilization of GIFT ($n=3$)

指标Index		组别Group				双因素方差分析Two way ANOVA		
		C	DC	HCL	DHCL	能量密度 Energy density	投喂量 Feed ration	交互作用 Interaction
周期 I Period I	初始平均体重 W_i (g)	14.77±0.05	14.51±0.14	14.66±0.09	14.43±0.07			
	末平均体重 W_f (g)	40.84±1.20 ^a	46.39±0.99 ^b	40.64±1.94 ^a	47.82±1.19 ^b	0.597	0.000	0.490
	成活率SR (%)	98.99±1.11	96.67±3.33	96.11±0.56	95.56±1.11	0.327	0.477	0.667
	特定生长率 SGR (%/d)	3.39±0.10 ^a	3.87±0.10 ^b	3.40±0.11 ^a	3.99±0.08 ^b	0.533	0.001	0.595
	增重率WGR (%)	176.56±8.22 ^a	219.98±9.38 ^b	177.43±9.36 ^a	231.49±8.05 ^b	0.500	0.001	0.561
	饲料效率FE	1.02±0.03	1.01±0.05	1.02±0.06	1.08±0.05	0.529	0.594	0.436
	蛋白质沉积率 PRE (%)	49.49±1.16	49.27±3.04	49.80±3.21	51.53±1.42	0.605	0.760	0.695
周期 II Period II	初始平均体重 W_i (g)	62.41±0.73 ^a	73.25±0.51 ^b	62.57±0.62 ^a	73.29±1.43 ^b	0.916	0.000	0.949
	末平均体重 W_f (g)	121.10±1.82 ^a	141.68±2.19 ^b	121.12±3.37 ^a	135.21±2.12 ^b	0.224	0.000	0.221
	成活率SR (%)	100	100	100	100			
	特定生长率 SGR (%)	1.66±0.02	1.65±0.04	1.65±0.08	1.53±0.09	0.971	0.479	0.893
	增重率WGR (%)	84.95±5.36	90.88±6.16	93.39±6.77	104.46±6.49	0.372	0.364	0.427
	饲料效率FE	0.80±0.02	0.78±0.03	0.81±0.05	0.77±0.04	0.397	0.372	0.433
	蛋白质沉积率 PRE (%)	35.97±3.04 ^b	27.78±0.38 ^a	34.79±1.03 ^{ab}	31.87±1.74 ^{ab}	0.523	0.034	0.261

注: 表格中同行平均数上标不同表示差异显著($P<0.05$); 下同

Note: The mean values in the same row with different letters are significantly different ($P<0.05$). The same applies below

($P>0.05$)。可是, 高能量密度饲料不仅引起去内脏全鱼、内脏团粗脂肪水平的显著升高($P<0.05$), 水分含量的显著降低($P<0.05$), 而且也引起了去内脏全鱼粗灰分和肝脏的水分含量的显著减少($P<0.05$); 而高投喂水平仅造成肝脏脂肪水平升高($P<0.05$)。S-N-K法检验发现, 在去内脏全鱼的成分中, HCL与DHCL组的水分显著低于其他2组($P<0.05$), 粗脂肪含量则相反; DHCL组的灰分含量显著低于DC组的($P<0.05$)。在内脏团的成分中, 仅发现HCL与DHCL组的粗脂肪含量显著高于其他2组($P<0.05$)。

在周期 II (表 5), 双因素方差分析发现, 饲料能

量密度和投喂水平对肝脏粗脂肪含量有显著的交互作用($P<0.05$); 高能量密度饲料摄入引起去内脏全鱼、内脏团的水分含量降低($P<0.05$), 导致去内脏全鱼、肝脏和肌肉的粗脂肪含量升高($P<0.05$), 但也提高了肌肉的粗蛋白含量($P<0.05$); 而高投喂水平引起了去内脏全鱼的水分含量下降($P<0.05$), 去内脏全鱼、肝脏、内脏团和肌肉的粗脂肪含量升高($P<0.05$)。S-N-K法检验发现, 在去内脏全鱼中, C组的水分含量显著高于其他组($P<0.05$), 而DHCL组的水分含量显著低于其他组($P<0.05$), 摄食高糖高脂饲料的2组粗脂肪含量显著高于摄食对

表 3 饲料能量密度和投喂水平对试验鱼形体指标的影响

Tab. 3 Effects of dietary energy density and feed ration on physical parameters of GIFT ($n=3$)

指标Index		组别Group				双因素方差分析Two way ANOVA		
		C	DC	HCL	DHCL	能量密度 Energy density	投喂水平 Feed ration	交互作用 Interaction
周期 I Period I	肠体比 ISI	7.41±0.31	8.40±0.47	7.54±0.29	7.69±0.40	0.461	0.165	0.299
	肥满度 CF (g/cm^3)	3.43±0.01	3.51±0.05	3.58±0.08	3.58±0.08	0.105	0.520	0.530
	脏体比 VSI	9.49±0.40 ^a	9.66±0.16 ^a	10.14±0.19 ^{ab}	10.89±0.08 ^b	0.004	0.092	0.258
	肝体比 HSI	1.94±0.21	1.84±0.03	1.84±0.25	1.86±0.03	0.815	0.801	0.711
周期 II Period II	肠体比 ISI	7.89±0.26 ^a	9.60±0.21 ^b	7.91±0.43 ^a	8.20±0.27 ^{ab}	0.038	0.029	0.100
	肥满度 CF (g/cm^3)	4.34±0.11	4.30±0.25	4.44±0.13	4.38±0.13	0.937	0.752	0.964
	脏体比 VSI	10.33±0.19 ^a	13.68±0.14 ^c	12.05±0.35 ^b	15.08±0.26 ^d	0.000	0.000	0.543
	肝体比 HSI	1.80±0.18 ^a	3.69±0.09 ^b	2.46±0.30 ^a	3.95±0.37 ^b	0.112	0.000	0.471

表 4 饲料能量密度和投喂水平对周期 I 试验鱼体成分的影响 ($n=3$, %湿重)

Tab. 4 Effects of dietary energy density and feed ration on body composition of GIFT in period I ($n=3$, % wet weight)

指标Index		组别Group				双因素方差分析Two way ANOVA		
		C	DC	HCL	DHCL	能量密度 Energy density	投喂量 Feed ration	交互作用 Interaction
去内脏全鱼 The eviscerated whole fish	水分Moisture	72.36±0.19 ^b	72.12±0.50 ^b	70.06±0.28 ^a	70.33±0.22 ^a	0.000	0.963	0.438
	粗脂肪Crude lipid	6.62±0.35 ^a	6.44±0.54 ^a	8.43±0.32 ^b	8.66±0.10 ^b	0.001	0.956	0.583
	粗蛋白Crude protein	16.24±0.14	16.40±0.15	16.56±0.25	16.35±0.38	0.596	0.932	0.476
	灰分Ash	4.35±0.11 ^{ab}	4.53±0.17 ^b	4.14±0.11 ^{ab}	3.98±0.07 ^a	0.014	0.907	0.199
内脏团 Visceral mass*	肝脏Liver							
	水分Moisture	68.70±0.70	68.61±0.53	66.79±0.58	65.82±0.78	0.009	0.459	0.531
	粗脂肪Crude lipid	9.98±0.91	13.74±0.07	11.94±0.37	13.47±1.40	0.351	0.015	0.229
	粗蛋白Crude protein	12.93±0.47	12.76±0.70	11.78±0.83	12.13±0.36	0.191	0.886	0.684
	水分Moisture	74.26±1.88	74.17±2.71	68.07±2.54	66.05±2.41	0.018	0.673	0.700
	粗脂肪Crude lipid	8.87±0.06 ^a	9.08±0.50 ^a	17.82±1.57 ^b	19.84±1.88 ^b	0.000	0.398	0.493
	粗蛋白Crude protein	8.36±0.17	8.28±0.35	8.08±0.21	8.56±0.30	0.999	0.471	0.320
	肌肉Muscle							
	水分Moisture	77.66±0.31	77.09±0.45	77.05±0.32	76.69±0.59	0.277	0.322	0.814
	粗脂肪Crude lipid	0.94±0.10	1.06±0.31	1.13±0.11	1.19±0.18	0.501	0.597	0.818
	粗蛋白Crude protein	17.48±0.20	17.72±0.21	18.20±0.69	18.44±0.51	0.154	0.620	0.999

注: *内脏团不包含肝脏; 下同

Note: *Visceral masses do not contain the liver. The same applied below

照组的($P<0.05$); 在肝脏中, DHCL组粗脂肪含量显著高于其他3组($P<0.05$); 在内脏团中, 摄食高糖高脂饲料的2组水分含量显著低于摄食对照组的($P<0.05$), DC组和DHCL组的粗脂肪含量显著高于其他2组($P<0.05$); 在肌肉中, C组的粗脂肪含量显著低于其他组($P<0.05$), HCL组和DHCL组的粗蛋白含量显著高于其他2组($P<0.05$)。

2.4 血液学指标

由表6可见, 在试验鱼的血液生理指标中, 双因素方差分析发现, 饲料能量密度和投喂水平仅对周期II试验鱼的白细胞计数(WBC)有显著的交互作用($P<0.05$); 饲料能量密度或投喂水平对周期I试验鱼的血细胞比容(HCT)和试验周期II的WBC有显著的影响($P<0.05$)。S-N-K法检验仅发现, 周期

II DHCL组的WBC显著低于其他3组($P<0.05$)。

由表7可见, 周期I试验鱼的血清生化指标中, 双因素方差分析发现, 饲料能量密度和投喂水平对乳酸脱氢酶(LD)有显著的交互作用($P<0.05$)。高能量密度饲料摄入造成试验鱼的血清碱性磷酸酶(ALP)和乳酸脱氢酶(LD)活性, 及甘油三酯(TGK)含量升高($P<0.05$); 而高投喂水平造成LD活性、TGK和血糖(GLU)含量升高($P<0.05$)。S-N-K法检验发现, C组血清的LD显著低于其他3组($P<0.05$), DHCL组血清的TGK含量与DC组的差异不显著($P>0.05$), 但显著高于其他2组($P<0.05$)。

由表8可见, 周期II试验鱼的血清生化指标中, 经双因素方差分析发现, 饲料能量密度和投喂水平对试验鱼血清的LD活性和白蛋白(ALB)含量有显

表5 饲料能量密度和投喂水平对周期II试验鱼体成分的影响 ($n=3$, %湿重)

Tab. 5 Effects of dietary energy density and feed ration on body composition of GIFT in period II ($n=3$, % wet weight)

指标Index		组别Group				双因素方差分析Two way ANOVA		
		C	DC	HCL	DHCL	能量密度 Energy density	投喂量 Feed ration	交互作用 Interaction
去内脏全鱼 The eviscerated whole fish	水分Moisture	69.04±0.20 ^c	67.69±0.55 ^b	67.96±0.09 ^b	66.13±0.19 ^a	0.003	0.001	0.469
	粗脂肪Crude lipid	8.64±0.16 ^a	9.99±0.18 ^a	11.49±0.24 ^b	12.00±0.40 ^b	0.000	0.008	0.148
	粗蛋白Crude protein	17.55±0.35	16.69±0.58	16.77±0.21	16.72±0.46	0.461	0.314	0.366
	灰分Ash	4.57±0.09	4.31±0.01	4.63±0.09	4.58±0.21	0.317	0.244	0.411
内脏团 Visceral mass*	肝脏Liver							
	水分Moisture	69.36±2.92	67.47±0.70	64.78±0.02	65.02±1.26	0.228	0.626	0.531
	粗脂肪Crude lipid	13.97±0.27 ^a	15.11±0.26 ^a	14.93±0.57 ^a	18.51±0.13 ^b	0.000	0.000	0.008
	粗蛋白Crude protein	14.84±0.68	13.94±0.89	13.26±0.78	11.78±0.70	0.107	0.159	0.717
	水分Moisture	65.75±4.43 ^a	67.54±2.54 ^a	47.04±3.12 ^b	43.36±2.87 ^b	0.001	0.783	0.434
	粗脂肪Crude lipid	19.05±0.64 ^a	25.11±1.55 ^b	20.36±0.17 ^a	27.64±1.24 ^b	0.131	0.000	0.606
	粗蛋白Crude protein	6.99±0.43	6.26±0.23	5.32±0.38	5.78±0.45	0.071	0.730	0.157
	肌肉Muscle							
	水分Moisture	77.38±0.37	77.13±0.27	76.87±0.27	76.20±0.15	0.077	0.139	0.468
	粗脂肪Crude lipid	0.77±0.18 ^a	1.63±0.15 ^b	1.40±0.07 ^b	1.82±0.07 ^b	0.013	0.001	0.126
	粗蛋白Crude protein	18.46±0.35 ^a	18.21±0.05 ^a	19.73±0.37 ^b	20.66±0.40 ^b	0.002	0.327	0.106

表6 饲料能量密度和投喂水平对试验鱼血液生理指标的影响

Tab. 6 Effects of dietary energy density and feed ration on blood physiological indices of GIFT ($n=3$)

指标Index		组别Group				双因素方差分析Two way ANOVA		
		C	DC	HCL	DHCL	能量密度 Energy density	投喂量 Feed ration	交互作用 Interaction
周期 I Period I	血红蛋白HB (g/L)	187.33±18.67	236.67±5.46	231.33±8.11	230.67±3.71	0.114	0.209	0.558
	红细胞数RBC ($\times 10^{12}$)	14.00±3.94	15.112±1.67	19.05±2.82	14.82±1.56	0.401	0.129	0.627
	白细胞数WBC ($\times 10^{10}$)	23.50±2.02	14.33±1.45	22.50±3.33	19.33±12.11	0.763	0.426	0.189
	血细胞比容HCT (%)	37.56±0.49	39.89±0.98	46.02±2.33	47.22±3.50	0.007	0.012	0.058
周期 II Period II	血红蛋白HB (g/L)	179.67±13.72	188.33±13.86	182.67±5.46	180.33±2.03	0.927	0.764	0.604
	红细胞数RBC ($\times 10^{12}$)	14.38±1.23	11.27±3.50	11.43±0.80	17.35±1.85	0.215	0.526	0.065
	白细胞数WBC ($\times 10^{10}$)	51.00±4.36 ^b	42.67±5.83 ^b	49.00±0.76 ^b	16.50±1.76 ^a	0.006	0.001	0.012
	血细胞比容HCT (%)	38.26±2.51	32.16±0.38	38.09±4.44	31.12±1.30	0.374	0.217	0.361

著的交互作用($P<0.05$); 高能量密度饲料摄入造成试验鱼的血清ALP和LD活性, TGK、胆固醇(TCHO)、ALB和GLU含量升高($P<0.05$); 高饲料投喂水平造成LD活性, TGK含量升高($P<0.05$)。S-N-K法检验发现, C组的血清LD活性显著低于其他组($P<0.05$), 而DHCL组的血清TGK含量显著高于其他组($P<0.05$); C组和DC组的血清TCHO含量显著低于HCL和DHCL组($P<0.05$); DC组的血清ALB含量最低, 显著低于C和DHCL组($P<0.05$); 而DHCL组GLU含量最高, 显著高于C组和DC组($P<0.05$)。

由表9可见, 在试验鱼的血清抗氧化指标中, 双因素方差分析发现, 饲料能量密度和投喂水平对周

期I试验鱼的血清超氧化物歧化酶(SOD)活性, 及周期II的血清谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性和总抗氧化能力(TAOC)有显著的交互作用($P<0.05$); 高能量密度饲料摄入造成周期I试验鱼的血清过氧化氢酶(CAT)和GSH-Px活性降低($P<0.05$), 周期II的血清丙二醛(MDA)含量升高($P<0.05$); 高饲料投喂水平造成周期II的血清MDA含量升高($P<0.05$)。S-N-K法检验发现, 在试验周期I, C组和DC组的CAT活性显著高于HCL和DHCL组的($P<0.05$), 而C组的GSH-Px活性显著高于其他3组($P<0.05$); 在周期II, C组血清的MDA含量显著低于其他3组($P<0.05$)。

表7 饲料能量密度和投喂水平对周期I试验鱼血液生化指标的影响

Tab. 7 Effects of dietary energy density and feed ration on blood biochemical indices of GIFT in period I ($n=3$)

指标Index	组别Group				双因素方差分析Two way ANOVA		
	C	DC	HCL	DHCL	能量密度 Energy density	投喂量 Feed ration	交互作用 Interaction
谷草转氨酶AST (U/L)	170.33±5.55	161.33±2.33	171.00±10.79	179.33±6.06	0.212	0.963	0.243
谷丙转氨酶ALT (U/L)	54.67±4.10	54.00±4.36	57.00±4.36	58.67±3.92	0.428	0.908	0.788
碱性磷酸酶ALP (U/L)	30.33±1.45	34.00±1.53	42.00±3.51	41.67±3.84	0.009	0.569	0.497
乳酸脱氢酶LD (U/L)	7.00±1.53 ^a	14.67±1.33 ^b	17.33±0.33 ^b	17.00±1.00 ^b	0.001	0.012	0.008
甘油三酯TGK (mmol/L)	4.03±0.24 ^a	5.44±0.35 ^{bc}	4.82±0.08 ^b	5.77±0.10 ^c	0.036	0.001	0.330
胆固醇TCHO (mmol/L)	4.62±0.24	5.17±0.34	4.92±0.32	5.55±0.03	0.238	0.056	0.889
高密度脂蛋白胆固醇 HDL (mmol/L)	1.33±0.09	1.40±0.09	1.43±0.18	1.55±0.05	0.306	0.403	0.850
低密度脂蛋白胆固醇LDL (mmol/L)	0.58±0.06	1.16±0.37	0.91±0.09	1.15±0.07	0.431	0.068	0.414
白蛋白ALB (g/L)	10.33±0.33	10.33±0.33	10.00±0.58	11.00±0.58	0.733	0.209	0.558
总蛋白TP (g/L)	40.33±1.20	41.67±0.33	38.00±3.21	39.50±1.23	0.291	0.129	0.627
尿素氮BUN (mmol/L)	0.56±0.04	0.68±0.04	0.69±0.07	0.53±0.07	0.887	0.426	0.189
血糖GLU (mmol/L)	7.84±0.87	8.11±0.49	7.44±0.78	8.57±0.22	0.968	0.012	0.058

表8 饲料能量密度和投喂水平对周期II试验鱼血清生化指标的影响

Tab. 8 Effects of dietary energy density and feed ration on serum biochemical indices of GIFT in period II ($n=3$)

指标Index	组别Group				双因素方差分析Two way ANOVA		
	C	DC	HCL	DHCL	能量密度 Energy density	投喂量 Feed ration	交互作用 Interaction
谷草转氨酶AST (U/L)	76.67±11.62	102.67±4.67	94.00±5.03	93.33±2.40	0.132	0.102	0.088
谷丙转氨酶ALT (U/L)	59.33±6.96	51.00±5.20	42.67±5.21	44.00±5.77	0.239	0.565	0.431
碱性磷酸酶ALP (U/L)	26.67±3.71	27.33±2.40	36.00±6.00	43.33±1.33	0.043	0.322	0.404
乳酸脱氢酶LD (U/L)	212.00±14.47 ^a	452.00±26.86 ^b	428.00±41.00 ^b	455.33±26.39 ^b	0.001	0.002	0.006
甘油三酯TGK (mmol/L)	2.91±0.49 ^a	4.65±0.22 ^b	5.49±0.39 ^b	6.76±0.04 ^c	0.000	0.002	0.498
胆固醇TCHO (mmol/L)	5.03±0.20 ^a	5.50±0.23 ^a	8.12±1.01 ^b	7.73±0.62 ^b	0.016	0.950	0.500
高密度脂蛋白胆固醇 HDL (mmol/L)	2.71±0.19	2.39±0.17	2.32±0.17	2.58±0.17	0.429	0.855	0.136
低密度脂蛋白胆固醇 LDL (mmol/L)	2.60±0.18	2.86±0.24	3.37±0.25	3.67±0.28	0.052	0.276	0.926
白蛋白ALB (g/L)	12.67±0.67 ^b	10.00±0.00 ^a	11.33±0.67 ^{ab}	12.67±0.67 ^b	0.032	0.282	0.009
总蛋白TP (g/L)	54.67±2.40	52.00±6.43	56.67±3.71	63.33±1.33	0.288	0.627	0.272
尿素氮BUN (mmol/L)	1.76±0.17	1.47±0.14	2.03±0.17	1.78±0.08	0.125	0.094	0.890
血糖GLU (mmol/L)	4.15±0.50 ^a	4.38±0.09 ^a	5.95±0.41 ^{ab}	6.91±0.63 ^b	0.008	0.225	0.445

表 9 饲料能量密度和投喂水平对试验鱼血清抗氧化指标的影响

Tab. 9 Effects of dietary energy density and feed ration on serum antioxidant indices of GIFT ($n=3$)

指标Index		组别 Group				双因素方差分析Two way ANOVA		
		C	DC	HCL	DHCL	能量密度 Energy density	投喂量 Feed ration	交互作用 Interaction
周期 I Period I	SOD (U/mL)	47.93±0.95	51.81±7.92	44.91±4.75	55.08±4.41	0.981	0.053	0.048
	CAT (U/mL)	148.43±22.48 ^b	156.87±6.48 ^b	84.01±5.49 ^a	51.91±14.78 ^a	0.000	0.364	0.652
	GSH-Px (U/mL)	6.95±0.87 ^b	3.27±0.65 ^a	3.45±0.68 ^a	2.76±0.43 ^a	0.018	0.440	0.802
周期 II Period II	SOD (U/mL)	47.38±5.14	41.43±1.36	46.32±5.86	43.76±4.51	0.795	0.377	0.720
	GSH-Px (U/mL)	18.89±4.60	11.91±0.83	15.62±0.49	26.32±4.33	0.065	0.608	0.026
	CAT (U/mL)	22.76±1.49	20.83±2.47	26.12±3.53	18.86±2.61	0.315	0.118	0.339
	TAOC (U/mL)	6.49±0.84	3.51±0.54	3.99±0.73	4.80±0.68	0.073	0.163	0.028
	MDA (nmol/mL)	9.37±1.24 ^a	18.19±1.28 ^b	14.94±1.00 ^b	18.66±1.59 ^b	0.003	0.001	0.084

注: SOD. 超氧化物歧化酶; CAT. 过氧化氢酶; GSH-Px. 谷胱甘肽过氧化物酶; TAOC. 总抗氧化能力; MDA. 丙二醛; 表格中同行平均数上标不同表示差异显著($P<0.05$)

Note: SOD. superoxide dismutase; CAT. catalase; GSH-Px. glutathione peroxidase; TAOC. Total antioxidant capacity; MDA. malondialdehyde. The mean values in the same row with different letters are significantly different ($P<0.05$)

2.5 攻毒成活率

由图 1 可见, 在周期 I 结束后, 对试验鱼攻毒后未发现各组间的成活率有显著差异($P>0.05$), 且在攻毒 5d 以后发现鱼的活力较好, 未再发现死亡; 但是在周期 II 结束后, 攻毒第 5 天表现差异($P<0.05$), 且 DC 和 DHCL 组试验鱼的成活率显著低于 C 和 HCL 组的($P<0.05$), 但也在 5d 以后发现鱼的活力较好, 亦未再发现死亡。

3 讨论

3.1 饲料能量密度和投喂水平对吉富罗非鱼生长性能和饲料利用的影响

本试验结果发现, 等能摄入不同能量密度的饲料未影响试验鱼的生长, 但高投喂水平提高了试验鱼的体重生长速度(表 2), 表明罗非鱼的生长与能量摄入正相关^[21, 22], 这与高投喂水平增加了可利用代谢能^[10], 进而会增加试验鱼的体重有关。在本试验的周期 I, 未发现饲料效率和蛋白质沉积率受到影响, 而发现周期 II 的饲料效率和蛋白质沉积率均小于周期 I, 且高投喂水平造成蛋白质沉积率降低, 尤其是在投喂对照组饲料的 2 组间。这可能与试验鱼的规格变化有关, 因为鱼体越大用以维持自身的能量越多^[8], 而且大规格鱼的适宜投喂率有所降低, 导致高水平投喂的营养物质有所浪费^[23]。

高糖^[9]和高脂^[24]饲料更易造成动物体内脏脂肪沉积过多, 导致脏体比和肝体比升高^[25]。这在本试验中有所表现, 根据形体指标的变化(表 3), 在周期 I, 仅发现高能量密度饲料导致了试验鱼的脏体比升高, 结合周期 I 试验鱼的内脏成分可以看出(表 4), 这确实是脂肪积累的结果; 但肝体比未发生显著变化, 且肝脏粗脂肪含量也无差异(表 4), 这表明肝脏

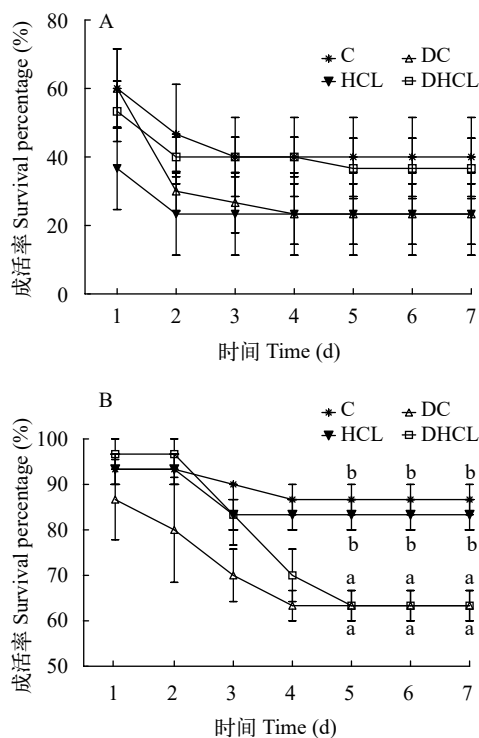


图 1 无乳链球菌攻毒中试验鱼的累计成活率

Fig. 1 Cumulative survival percentage of GIFT challenged by *S. agalactiae*

A. 周期 I 结束后攻毒结果; B. 周期 II 结束后攻毒结果; 同一时间点不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

A. challenge results after period I; B. challenge results after period II. Different lowercase letters at the same time point indicate significant differences ($P<0.05$)

合成转运脂肪的功能未受到影响, 使得脂肪优先沉积于内脏^[26]。在本试验中, 随着养殖时间的延长, 在周期 II 结束后, 除肥满度无显著差异外, 肠体比、脏体比和肝体比均出现了显著差异, 结合周期

II 试验鱼的体成分(表 5)可以看出, 脏体比和肝体比的升高是脂肪沉积的结果。然而, 一方面, 沉积在内脏的脂肪因不可食性, 造成能量浪费; 另一方面, 过多的脂肪沉积可能对鱼类的健康产生负面影响, 如小鼠等实验动物的研究发现, 脂肪组织会分泌炎症因子, 引起代谢性疾病及其并发症的风险加大^[27]。而在试验周期 II 结束后, 低能量密度饲料或高投喂水平引起肠体比升高, 这应该是肠道的适应性变化, 肠道长度增加可延长营养物质在消化道中的时间, 以提高饲料利用率^[28]。

3.2 饲料能量密度和投喂水平对吉富罗非鱼血液生化指标的影响

养殖鱼类的血液学特征可以表明其生理和健康状况^[29]。在本试验期间, 发现饲料能量密度和投喂水平引起了部分指标出现显著的差异。在血液生理指标中, 发现高能量密度饲料显著升高了周期 I 的 HCT, 因红细胞参数(HCT、RBC 和 HB)是“代谢综合征(MS)”的独立危险因素, 与 MS 间存在正相关性^[30], 这表明试验鱼的健康受到负面影响。可在周期 II, 各组间未发现红细胞参数出现显著差异, 这是否与试验鱼的适应性有关, 需要进一步研究; 但是, 机体中具免疫防卫作用的白细胞^[31], 其数量在 DHCL 组显著降低, 则说明此处理试验鱼的免疫机能受到抑制。

在血清生化指标中, 表示肝脏健康状态的敏感指标转氨酶(AST 和 ALT)^[32]活性未发生显著差异, 表明肝脏的健康状况尚未发生较大的改变; 而在周期 II, 高能量密度饲料或高投喂水平提高了与鱼体营养状况呈正相关的 ALB、TG 或 GLU 水平, 表明鱼体蛋白质、脂肪和碳水化合物的代谢增强^[33]。LD 的主要作用是催化丙酮酸和乳酸间的相互转化, 丙酮酸进入线粒体, 氧化脱羧形成乙酰辅酶 A(CoA)^[34], 高 LD 活性意味着 CoA 合成量增加, 而 CoA 是脂肪合成的起始^[34]。在 2 个周期的试验结束后, 均发现 C 组的 LD 和 TG 显著低于其他组, 同时结合鱼体成分来看, 这应该与脂肪合成代谢有关。

高能量密度饲料或高水平投喂, 会增加机体能量代谢负担^[35]。能量代谢过程中的副产物活性氧(ROS), 若产生过多会破坏细胞内的蛋白质、脂肪和核酸结构, 对细胞有害^[36]。SOD、CAT 和 GSH-Px 是抗氧化初级防御系统, 可清除 ROS^[37]。在本试验中, 仅发现高能量密度饲料导致了周期 I 试验鱼血清的 CAT 和 GSH-Px 活性的降低, 减弱了试验鱼的抗氧化能力; 而在周期 II, 这 3 种抗氧化酶的活性并无显著差异, 这可能与适应能力有关^[38]。但在周期 II 试验鱼的血清中, 发现高能量密度饲料或高投

喂水平导致脂质过氧化的典型指标 MDA^[39]含量显著升高, 而 MDA 可导致细胞膜脂质过氧化促使细胞损伤^[40]。

3.3 饲料能量密度和投喂水平对吉富罗非鱼攻毒成活率的影响

在本试验中, 周期 I 结束后的攻毒并未影响试验鱼成活率, 这可能与试验期较短有关。因动物本身的调节能力^[41], 试验鱼抵抗有害菌感染的能力尚未出现显著的差异, 类似的研究结果在杂交条纹鲈(*Morone saxatilis* ♂×*M. chrysops* ♀)^[42]也有所表现。但周期 II 结束后的攻毒发现, 在 2 种饲料能量密度下, 均是高投喂水平组的成活率显著下降, 这应该与高能量摄入降低了鱼类的免疫力有关^[10]。

综上所述, 在本试验条件下, 高投喂水平可提高罗非鱼的生长速度, 但是会增加鱼体的脂肪沉积, 降低对病菌的抵抗力, 对鱼体健康产生负面影响; 而高能量密度饲料更易于鱼体脂肪沉积, 减弱抗氧化能力, 不利于鱼体健康。

参考文献:

- [1] Liu Z H, Yang F Y, Kong L J, *et al.* Effects of dietary energy level on the content of intramuscular fat and mRNA expression for fatty acid synthase and hormone-sensitive lipase in growing-finishing pigs [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2007, **38**(9): 934-941. [刘作华, 杨飞云, 孔路军, 等. 日粮能量水平对生长育肥猪肌肉脂肪含量以及脂肪酸合成酶和激素敏感脂酶 mRNA 表达的影响 [J]. *畜牧兽医学报*, 2007, **38**(9): 934-941.]
- [2] Fuentes E, Fuentes F, Vilahur G, *et al.* Mechanisms of chronic state of inflammation as mediators that link obese adipose tissue and metabolic syndrome [J]. *Mediators of Inflammation*, 2013(2): 136584.
- [3] Xu C B. Metabolic syndrome [J]. *Section of Endocrinology Foreign Medical Sciences*, 2005, **25**(1): 3-6. [徐成斌. 代谢综合征 [J]. *国际内分泌代谢杂志*, 2005, **25**(1): 3-6.]
- [4] Stolarczyk E. Adipose tissue inflammation in obesity: a metabolic or immune response [J]? *Current Opinion in Pharmacology*, 2017(37): 35-40.
- [5] Nieman D C, Henson D A, Nehlsen-Cannarella S L, *et al.* Influence of obesity on immune function [J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 1999, **99**(3): 294-299.
- [6] Giovanni D P, Franco S. Obesity as a major risk factor for cancer [J]. *Journal of Obesity*, 2013(13): 291546.
- [7] Du Z Y. Causes of fatty liver in farmed fish: a review and new perspectives [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, **38**(9): 1628-1638. [杜震宇. 养殖鱼类脂肪肝成因及相关思考 [J]. *水产学报*, 2014, **38**(9): 1628-1638.]
- [8] National Research Council. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp [M]. Washington, DC: The National Academy Press, 2011: 36, 38.
- [9] Xie D, Yang L, Yu R, *et al.* Effects of dietary carbohydrate and lipid levels on growth and hepatic lipid de-

- position of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. *Aquaculture*, 2017, **479**(1): 696-703.
- [10] Alcorn S W, Pascho R J, Murray A L, *et al.* Effects of ration level on immune functions in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) [J]. *Aquaculture*, 2003, **217**(1): 529-545.
- [11] Li X F, Xu C, Tian H Y, *et al.* Feeding rates affect stress and non-specific immune responses of juvenile blunt snout bream *Megalobrama amblycephala* subjected to hypoxia [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, **49**(Supplement C): 298-305.
- [12] Lin Y H, Shiao S Y. Dietary lipid requirement of grouper, *Epinephelus malabaricus*, and effects on immune responses [J]. *Aquaculture*, 2003, **225**(1): 243-250.
- [13] Torfi Mozanzadeh M, Yavari V, Marammazi J G, *et al.* Optimal dietary carbohydrate-to-lipid ratios for silvery-black porgy (*Sparidentex hasta*) juveniles [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, **23**(3): 470-483.
- [14] Feng L, Ni P J, Jiang W D, *et al.* Decreased enteritis resistance ability by dietary low or excess levels of lipids through impairing the intestinal physical and immune barriers function of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, **67**(Supplement C): 493-512.
- [15] Wu C, Ye J, Gao J E, *et al.* The effects of dietary carbohydrate on the growth, antioxidant capacities, innate immune responses and pathogen resistance of juvenile Black carp *Mylopharyngodon piceus* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, **49**(Supplement C): 132-142.
- [16] Wang M, Lu M. Tilapia polyculture: a global review [J]. *Aquaculture Research*, 2016, **47**(8): 2363-2374.
- [17] Yuan Y, Yuan Y, Dai Y, *et al.* Technical efficiency of different farm sizes for tilapia farming in China [J]. *Aquaculture Research*, 2020, **51**(1): 307-315.
- [18] Ng W K, Romano N. A review of the nutrition and feeding management of farmed tilapia throughout the culture cycle [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2013, **5**(4): 220-254.
- [19] Richter H, Lückstädt C, Focken U, *et al.* Evacuation of pelleted feed and the suitability of titanium (IV) oxide as a feed marker for gut kinetics in Nile tilapia [J]. *Journal of Fish Biology*, 2003, **63**(5): 1080-1099.
- [20] Zhu C, Yu L, Liu W, *et al.* Dietary supplementation with *Bacillus subtilis* LT3-1 enhance the growth, immunity and disease resistance against *Streptococcus agalactiae* infection in genetically improved farmed tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, **25**(6): 1241-1249.
- [21] Schrama J W, Saravanan S, Geurden I, *et al.* Dietary nutrient composition affects digestible energy utilisation for growth: a study on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and a literature comparison across fish species [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2012, **108**(2): 277-289.
- [22] Xie S, Cui Y, Yang Y, *et al.* Effect of body size on growth and energy budget of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. *Aquaculture*, 1997, **157**(1): 25-34.
- [23] Yang S, Zhai S W, Shepherd B S, *et al.* Determination of optimal feeding rates for juvenile lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) fed a formulated dry diet [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, **25**(6): 1171-1182.
- [24] Li H Y, Wu L Y, Dong B, *et al.* Effects of dietary carbohydrate and lipid levels on growth performance and plasma metabolites in juvenile blunt snout bream [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(4): 756-763. [李红燕, 巫丽云, 董博, 等. 饲料糖和脂水平对团头鲂生长性能及血浆代谢物的影响 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(4): 756-763.]
- [25] Hillestad, Johnsen, Austreng, *et al.* Long-term effects of dietary fat level and feeding rate on growth, feed utilization and carcass quality of Atlantic salmon [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1998, **4**(2): 89-97.
- [26] Liu W, Wen H, Luo Z. Effect of dietary protein levels and feeding rates on the growth and health status of juvenile genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquaculture International*, 2018, **26**(1): 153-167.
- [27] Magnuson A M, Regan D P, Booth A D, *et al.* High-fat diet induced central adiposity (visceral fat) is associated with increased fibrosis and decreased immune cellularity of the mesenteric lymph node in mice [J]. *European Journal of Nutrition*, 2020, **59**(4): 1641-1654.
- [28] Zhang C X, Chen W, Huang Y Q, *et al.* Effect of feed restriction on harbord broilers' intestinal structure [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (Natural Sciences Edition), 2010, **32**(4): 677-682. [张彩霞, 陈文, 黄艳群, 等. 限饲对哈巴德肉鸡肠道结构的影响 [J]. 江西农业大学学报(自然科学版), 2010, **32**(4): 677-682.]
- [29] Fazio F. Fish hematology analysis as an important tool of aquaculture: A review [J]. *Aquaculture*, 2019(500): 237-242.
- [30] Kawamoto R, Tabara Y, Kohara K, *et al.* Hematological parameters are associated with metabolic syndrome in Japanese community-dwelling persons [J]. *Endocrine*, 2013, **43**(2): 334-341.
- [31] Bain B J. Structure and function of red and white blood cells [J]. *Medicine*, 2017, **45**(4): 187-193.
- [32] Jung K, Ohlrich B, Mildner D, *et al.* The apoenzyme of aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase in the serum of healthy persons and patients suffering from liver diseases [J]. *Clinica Chimica Acta*, 1978, **90**(2): 143-149.
- [33] Liu W, Wen H, Jiang M, *et al.* Effects of dietary protein level and feeding frequency on growth and some physiological-biochemical indexes of GIFT strain of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, **40**(5): 751-762. [刘伟, 文华, 蒋明, 等. 饲料蛋白质水平与投喂频率对吉富罗非鱼幼鱼生长及部分生理生化指标的影响 [J]. 水产学报, 2016, **40**(5): 751-762.]
- [34] Zhou S W. Animal Biochemistry [M]. The third edition. Beijing: China Agricultural Press, 1999: 80-129. [周顺伍. 动物生物化学 [M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 80-129.]
- [35] Xu C, Liu W B, Remø S C, *et al.* Feeding restriction alleviates high carbohydrate diet-induced oxidative stress and inflammation of *Megalobrama amblycephala* by activat-

- ing the AMPK-SIRT1 pathway [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019(92): 637-648.
- [36] Yang S, Lian G. ROS and diseases: role in metabolism and energy supply [J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2020, **467**(1): 1-12.
- [37] Li X Y, Liu Y D, Song L R, *et al.* Responses of antioxidant systems in the hepatocytes of common carp (*Cyprinus carpio* L.) to the toxicity of microcystin-LR [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, **27**(5): 472-475. [李效宇, 刘永定, 宋立荣, 等. 鲤肝细胞抗氧化系统对微囊藻毒素毒性的反应 [J]. *水生生物学报*, 2003, **27**(5): 472-475.]
- [38] Rodriguez-Dominguez A, Connell S D, Leung J Y S, *et al.* Adaptive responses of fishes to climate change: Feed-back between physiology and behaviour [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(692): 1242-1249.
- [39] Tsikas D. Assessment of lipid peroxidation by measuring malondialdehyde (MDA) and relatives in biological samples: Analytical and biological challenges [J]. *Analytical Biochemistry*, 2017(524): 13-30.
- [40] Yao S B, Ye Y T, Cai C F, *et al.* Damage of MDA on intestinal epithelial cells in vitro of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(1): 133-141. [姚仕彬, 叶元土, 蔡春芳, 等. 丙二醛对离体草鱼肠道黏膜细胞的损伤作用 [J]. *水生生物学报*, 2015, **39**(1): 133-141.]
- [41] Lu D X. Self-nutrition regulation function of animal body and its practical significance [J]. *Inner Mongolia Animal Husbandry Science*, 1995(1): 1-10. [卢德勋. 动物机体自我营养调控功能及其实践意义 [J]. *内蒙古畜牧科学*, 1995(1): 1-10.]
- [42] Corrales J, Noga E J. Effects of feeding rate on the expression of antimicrobial polypeptides and on susceptibility to *Ichthyophthirius multifiliis* in hybrid striped (sunshine) bass (*Morone saxatilis* ♂×*M. chrysops* ♀) [J]. *Aquaculture*, 2011, **318**(1): 109-121.

EFFECTS OF DIETARY ENERGY DENSITY AND FEED RATION ON GROWTH AND HEALTH IN GENETICALLY IMPROVED FARMED TILAPIA, *OREOCHROMIS NILOTICUS*

LIU Wei, JIANG Ming, WU Fan, TIAN Juan, LU Xing, YU Li-Juan and WEN Hua

(Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China)

Abstract: To investigate the effects of dietary energy density (DED) and dietary feed ration (DFR) on fish growth and health, a 2×2 factorial experiment was designed, including 2 DED (control diet and high carbohydrate and fat diet) and 2 DFR (1 and 1.2 times energy level of fish fed to control diet apparent satiation). To evaluate the effects of DED and DFR on growth performance, feed utilization, body composition, hematological indices and resistant to *Streptococcus agalactiae* infection of genetically improved farmed tilapia, *Oreochromis niloticus* (14.59±0.06) g, the study set 40d as a cycle for 2 cycles (period I and II). The results showed that DED and DFR did not affect the feed efficiency ($P>0.05$), and DED did not affect the fish growth performance ($P>0.05$). High DFR improved the final mean weight ($P<0.05$), but reduced protein retention during period II ($P<0.05$). DED and DFR had no impact on the conditional factor ($P>0.05$); in period I, high DED only induced the viscerasomatic index ($P<0.05$), but in period II, DED and DFR had significant effects on intestinal-somatic index and viscerasomatic index ($P<0.05$). High DED increased crude lipid content in the eviscerated whole fish and visceral mass ($P<0.05$); in period I, high DFR enhanced crude lipid content in the liver ($P<0.05$), and in period II, high DED and DFR induced crude lipid content in the eviscerated whole fish, liver, and muscle ($P<0.05$). High DED and DFR increased in the serum triglycerides and malondialdehyde content ($P<0.05$), and hematocrit in period I ($P<0.05$), but it decreased the white cell count in period II ($P<0.05$); high DED increased the serum alkaline phosphatase activity, and serum cholesterol (period II) ($P<0.05$), but decreased the catalase and glutathione peroxidase activity (period I) ($P<0.05$); high DFR increased the serum glucose levels ($P<0.05$). After infection with *S. Agalactiae*, DED and DFR did not affect the survival rate in period I ($P>0.05$); however, high DFR decreased the survival rate in period II ($P<0.05$). In conclusion, these results suggested that high DFR could improve the growth rate of tilapia, increase the fat deposition and reduce the health level of fish, and DED is more prone to fat deposition to impact fish health.

Key words: Dietary energy density; Feeding ration; Tilapia; Growth; Body composition; Hematology; Disease resistance