

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.00338

饲料脂肪水平对吉富罗非鱼体脂沉积及脂肪酸组成的影响

韩光明^{1,2}, 王爱民^{1,2}, 徐跑², 吕富¹, 封功能¹, 於叶兵¹, 杨文平¹

1. 盐城工学院海洋技术系, 江苏省沿海池塘养殖生态重点实验室, 江苏 盐城 224051;

2. 南京农业大学 无锡渔业学院, 农业部淡水鱼类遗传育种和养殖生物学重点开放实验室, 江苏 无锡 214081

摘要: 研究了饲料脂肪水平对吉富罗非鱼(Genetic Improvement of Farmed Tilapia, GIFT)的部分形体指标、肌肉肝脏及腹腔脂肪组织的脂肪沉积及脂肪酸组成的影响, 同时探讨了鱼体对饲料脂肪酸的吸收利用能力。实验设置饲料脂肪水平分别为 1.73%、3.71%、5.69%、7.67%、9.64%、16.55% 共 6 个梯度组, 每组 3 个重复, 饲养 90 d。结果显示: 5.69%、7.67% 及 9.64% 脂肪组吉富罗非鱼肥满度较高; 1.73% 和 16.55% 脂肪组的肝体指数显著高于其他实验组($P < 0.05$); 除了 1.73% 脂肪组, 其他各组中饲料脂肪水平越高, 鱼体的脏体指数越高。7.67% 脂肪组吉富罗非鱼肌肉脂肪含量显著高于 3.71% 组($P < 0.05$), 同时显著低于 16.55% 组($P < 0.05$), 但是其肝脏中脂肪含量与其他各组差异均不显著($P > 0.05$); 饲料脂肪水平越高, 鱼体的脂肪含量越高, 同时不饱和脂肪酸在总脂肪酸中的比例越高。结果表明, 饲料脂肪水平影响吉富罗非鱼的部分形体指标, 尤其对肝脏形态的影响较为明显。饲料中过多的脂肪容易在肌肉和肝脏组织中沉积, 同时鱼体的脂肪含量和脂肪酸组成能够反映饲料的脂肪水平和脂肪酸组成。本研究旨在为饲料脂肪水平的合理设置及脂肪营养对脂肪代谢的调控提供参考。[中国水产科学, 2011, 18(2): 338–349]

关键词: 吉富罗非鱼; 体脂沉积; 脂肪酸组成; 饲料脂肪水平

中图分类号: S96

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2011)02-0338-12

饲料脂肪营养是影响鱼体组织发育的因素之一, 饲料中的脂肪水平直接影响鱼体脂肪含量, 鱼体脂肪酸组成有接近于饲料中脂肪酸组成的倾向, 而不同组织的脂肪含量及脂肪酸与饲料脂肪水平及脂肪酸的相关度有一定的差异^[1]。饲料中脂肪水平不合理会造成鱼类体内脂肪蓄积, 当饲料提供的脂肪大于鱼体的需求时, 会对鱼体的增重产生负作用^[2-5]。研究饲料脂肪水平对鱼类形体及脂肪沉积的影响, 可以更加清楚鱼体对脂肪的适宜需求量, 探讨饲料的脂肪酸组成对鱼体的影响可以进一步揭示脂肪营养对鱼类脂肪代谢的调控作用。

吉富罗非鱼是遗传性状改良后的尼罗罗非鱼(Genetic Improvement of Farmed Tilapia, *Oreochromis niloticus*)。经过多年选育的吉富品系罗非

鱼具有生长速度快、鱼体高、背厚、出肉率高、遗传性状稳定等优点^[6], 现已成为中国一个新的养殖品种, 但对吉富罗非鱼的营养需求的研究尚少, 因此, 本研究探讨了饲料脂肪营养对吉富罗非鱼部分形体指标、脂肪沉积及脂肪酸组成的影响, 着重分析了吉富罗非鱼肌肉、肝脏及腹腔脂肪含量和脂肪酸组成与饲料脂肪水平关系, 探讨了鱼体对脂肪的利用能力及体脂沉积的规律, 为饲料脂肪水平的合理设置及脂肪营养对脂肪代谢的调控提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验鱼种

实验鱼采自中国水产科学研究院淡水渔业研

收稿日期: 2010-01-26; 修订日期: 2010-04-21.

基金项目: 农业部水生动物遗传育种和养殖生物学重点开放实验室重点开放课题(BZ2007-06) 江苏省 2008 年度省高校自然科学基金基础研究项目(08KJD240003).

作者简介: 韩光明(1985-), 男, 硕士, 研究方向水产动物营养与生化. E-mail: gmhan2006@126.com

通讯作者: 王爱民, 副教授. E-mail: bluesewam@ycit.cn

究中心种苗基地同一批孵化鱼苗, 经过 5%食盐
水消毒后, 用普通商品饲料驯养 20 d, 备用。驯化
结束后, 选择健康无伤病的 630 尾驯养后的吉富罗
非鱼幼鱼, 体质量(2.63 ± 0.16) g, 体长为(4.36 ± 0.11)
cm。随机分配到 18 个水族箱中, 每个水族箱 35 尾,
然后将 18 个水族箱随机分为 6 个组, 每组 3 个重复,
分别投喂不同脂肪水平的实验饲料, 饲养 90 d。

1.2 实验饲料

参照 SC/T 1025-2004 罗非鱼配合饲料水产
行业标准设计配方(表 1), 以优质进口鱼粉、豆粕
为蛋白源, 优质鱼油(国产鱼油)为脂肪源, 饲料
原料均过 60 目筛, 鱼油的添加水平分别为 0%、
2%、4%、6%、8%和 15%, 饲料脂肪添加水平分
别为 1.73%、3.71%、5.69%、7.67%、9.64%和
16.55%。配制成 6 组实验饲料, 经充分混合后加

工成颗粒饲料, 晾干并保存于冰箱中备用。

1.3 饲养管理

实验采用循环流水饲养系统养殖(水族箱尺
寸: 100 cm×80 cm×60 cm), 每 5 天换水 1 次, 新加
入水量为总水量的 40%。每天投饲 3 次, 时间分
别为 6:30、13:30、18:30, 投饲率为 10%~15%, 投
喂之前吸除粪便。实验用水为曝气后的自来水,
水温 22~27℃, pH 6.8~8.0, 溶解氧>5mg/L。

1.4 样品采集

饲养实验结束时, 停止投喂 48 h 后, 对每尾
鱼进行称重, 并测量体长。每一水族箱随机取 9
尾进行解剖, 取出内脏称重, 然后将肝脏分离出
来称重。分离出背部肌肉、肝脏、腹腔脂肪组织
样品, 放入-70~-80℃超低温冰箱中, 待做脂肪
酸分析。

表 1 实验饲料配方及营养成分含量
Tab. 1 Feed Formulation and nutrient levels of trial diets

原料 raw material	脂肪水平 lipid level					
	1.73 %	3.71 %	5.69 %	7.67 %	9.64 %	16.55 %
鱼粉 fish meal	8	8	8	8	8	8
豆粕 soybean meal	25	25	25	25	25	25
花生粕 peanut meal	10	10	10	10	10	10
菜粕 rapeseed meal	18	18	18	18	18	18
鱼油 fish oil	0	2	4	6	8	15
玉米淀粉 corn starch ¹⁾	20	18	16	14	12	5
次粉 wheat-middlings	14	14	14	14	14	14
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
食盐 salt	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
氯化胆碱 choline chloride	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
预混料 feed premix ²⁾	3	3	3	3	3	3
总量 total quantity	100	100	100	100	100	100
主要营养成分/% main nutrients						
粗蛋白 crude protein	30.44	30.43	30.42	30.41	30.4	30.36
粗脂肪 crude fat	1.73	3.71	5.69	7.67	9.64	16.55
磷 phosphorus	1.08	1.12	1.16	1.29	1.25	1.26

注: 1) 玉米淀粉成分参照 GB-T 8885-2008 一级品标准。
2) 预混料为每 kg 饲料提供维生素和微量元素: VE 60 mg; VK 5 mg; VA 15 000 IU; VD₃ 3 000 IU; VB₁ 15 mg; VB₂ 30 mg; VB₆ 15 mg; VB₁₂ 0.5 mg; 烟酸 175 mg; 叶酸 5 mg; 肌醇 1 000 mg; 生物素 2.5 mg; 泛酸钙 50 mg; 铁 25 mg; 铜 3 mg; 锰 15 mg; 碘 0.6 mg; 镁 0.7 g。
Note: 1) Corn starch ingredient refers GB-T 8885-2008 standard of first rank standard.
2) The premix provides vitamin and mineral for a kilogram of diet: VE 60 mg ; VK 5 mg ; VA 15000 IU ; VD₃ 3000 IU ; VB₁ 15 mg ; VB₂ 30 mg ; VB₆ 15 mg ; VB₁₂ 0.5 mg ; Nicotinic acid 175 mg ; Folic acid 5 mg ; Inositol 1 000 mg ; Biotin 2.5 mg ; Pantothenic acid 50 mg ; Fe 25 mg ; Cu 3 mg ; Mn 15 mg ; I 0.6 mg ; Mg 0.7 g.

1.5 形体指标计算

本实验计算的形体指标有: 肥满度(condition factor, %)、脏体指数(viscerosomatic index, %)、肝体指数(hepatosomatic index, %), 具体的计算公式如下:

$$\text{肥满度 CF} = 100 \times W / L^3$$

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

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

式中: W 为体质量, W_v 为内脏质量, W_h 为肝脏质量, 以上均为湿重(g); L 为体长(cm)。

1.6 脂肪含量测定方法

取新鲜样品 1g, 低温真空干燥 12 h, 干燥温度为 36℃。干燥完成后, 将组织磨碎, 用索氏抽提法提取脂肪: 提取剂为沸程 30~60℃ 乙醚; 提取时间 6 h; 水浴温度控制在 70℃ 左右; 提取剂约 8 min 回流 1 次; 提取完成后, 得到橙黄色黏稠状鱼油, 然后计算样品中脂肪含量。

1.7 脂肪酸组成测定方法

分析样品中脂肪提取参照 Folch 方法^[7]。油脂的皂化及甲酯化方法参照 Christie 方法^[8]略有改进。样品皂化甲酯化后, 直接上气相色谱—质谱仪进行分析。气相色谱—质谱分析条件如下:

分析仪器: Thermo Quest Trace GC/MS; 色谱柱: SUPELCO GC/MS 毛细柱, 30 m×0.25 mm×0.25 μm; 气相色谱操作条件: 气化室温度 250℃; 传输线温度 280℃; 色谱柱升温程序: 初温 50℃, 以 10℃/min 升至 280℃ 并保持 10 min; 进样方式: 分流进样, 分流比为 10:1; 进样量: 1 μL; 质谱: EI 离子源, 信增器电压: 1 200 V。离子源温度: 230℃。四极杆温度: 150℃, 全扫描(SCAN)质量范围: 45~500 mau; 检索 NIST 质谱图库, 比较样品质谱图与图库中标准质谱图。就可以确定样品中脂肪酸种类, 各脂肪酸相对含量的确定采用面积归一化法计算。

1.8 数据统计与分析

原始数据经 Excel 2007 初步整理后, 用 SAS 9.0 中的单因子方差分析(One-Way ANOVA)进行 LSD 法多重比较, 显著水平为 $P < 0.05$ 。数据用平均值±标准误($\bar{x} \pm \text{SE}$)形式表示。

2 结果与分析

2.1 吉富罗非鱼形体指标

吉富罗非鱼肥满度随着饲料脂肪水平提高呈抛物线的变化, 5.69%组、7.67%组和 9.64%组的肥满度值较高, 这个 3 个组之间差异不显著($P > 0.05$), 但是显著高于其他组($P < 0.05$)(图 1)。1.73%和 16.55%组的肝体指数显著高于其他组($P < 0.05$), 1.73%与 16.55%组之间差异不显著($P > 0.05$), 其他 4 个组之间差异不显著($P > 0.05$)(图 2)。除去 1.73%

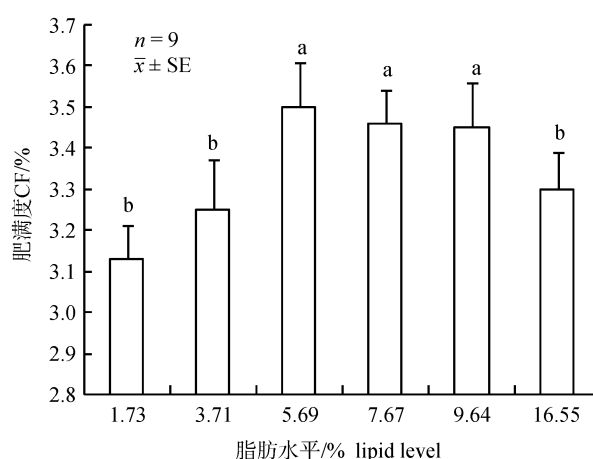


图 1 吉富罗非鱼肥满度与饲料脂肪水平的关系
柱上不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 1 Relationship between condition factor and dietary lipid levels of GIFT
Mean values with different superscript letter were significantly different ($P < 0.05$).

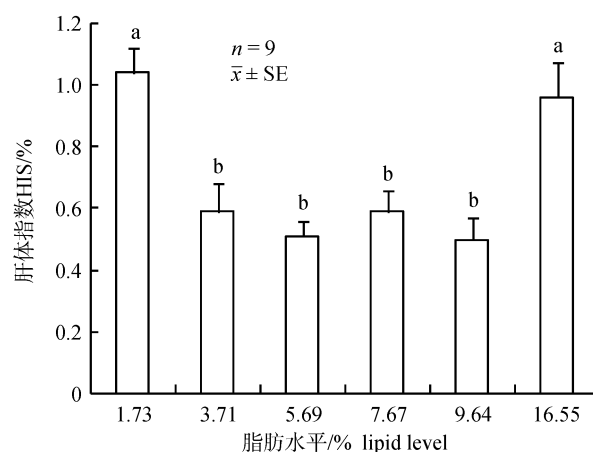


图 2 吉富罗非鱼肝体指数与饲料脂肪水平的关系
柱上不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 2 Relationship between hepatosomatic index and dietary lipid levels of GIFT
Mean values with different superscript letter were significantly different ($P < 0.05$).

组, 其他组中饲料脂肪水平越高, 鱼体的脏体指数越高, 1.73%组脏体指数高于 3.71%组且低于 7.67%、9.64%及 16.55%组, 差异均显著($P<0.05$) (图 3)。

2.2 吉富罗非鱼肌肉、肝脏及腹腔脂肪组织的脂肪含量

从表 2 可知, 吉富罗非鱼鱼体组织中脂肪含量由高到低依次为: 腹腔脂肪、肝脏、肌肉。吉富罗非鱼腹腔脂肪组织的脂肪含量稳定, 各个组之间差异不显著($P>0.05$); 肌肉和肝脏组织的脂

肪含量易受饲料脂肪水平的影响, 饲料中脂肪水平提高, 肌肉和肝脏中脂肪含量随之增加。7.67%组吉富罗非鱼肌肉中脂肪含量显著高于 3.71%组($P<0.05$), 同时显著低于 16.55%组($P<0.05$)。但是其肝脏中脂肪含量与其他各组差异均不显著($P>0.05$)。

2.3 饲料及粪便中脂肪酸组成

实验饲料的脂肪源为鱼油, 各组饲料中的脂肪酸组成比例随饲料脂肪水平提高而逐渐接近鱼油(表 3)。鱼油中脂肪组成比例从大到小顺序为 MUFA (单不饱和脂肪酸)、SFA (饱和脂肪酸)、PUFA (多不饱和脂肪酸), 鱼油中 $\sum n-3$ PUFA 比例较高, 而基础饲料原料中的 $\sum n-6$ PUFA 较高, 因此随着鱼油添加量增加饲料中 $\sum n-3/\sum n-6$ 系数是逐渐递增的, 同时总 PUFA 比例基本不变, 占总脂肪酸的 29.49%~32.00%。另外, 鱼油中的 $C_{14:0}$ (肉豆蔻酸)、 $C_{15:0}$ (十五烷酸)及 $C_{16:n-9}$ (棕榈油酸)组成比例高于 1.73%组饲料, $C_{18:n-9}$ (油酸)和 $C_{20:n-9}$ (蓖麻油酸)低于 1.73%组饲料。

本次实验还尝试性地检测了粪便中的脂肪酸组成(表 4)。由于粪便中的脂肪含量较低, 因此只检测到了含量较高的脂肪酸种类。实验发现, 部分饱和脂肪酸、 $C_{18:2n-6}$ (亚油酸)及 $n-9$ MUFA 未被吸收利用而随粪便排出体外。随饲料脂肪水平提高, 粪便中饱和脂肪酸比例成上升趋势, $n-9$ MUFA 呈下降趋势, 其中 16.55%组中 SFA 比例约为 1.73%组的 2 倍。粪便中 $n-3$ PUFA 几乎没有, 但是检测到 $C_{18:2n-6}$ 脂肪酸, 其比例占粪便中脂肪酸的 1%~7.11%, 且随着饲料脂肪水平提高呈下降趋势。在粪便的 SFA 中, $C_{16:0}$ 比例高于其他 SFA, 在 MUFA 中, $C_{18:n-9}$ 比例高于其他 $n-9$ MUFA, $C_{16:0}$ 与 $C_{18:n-9}$ 呈现此消彼长的关系, 直接影响到 SFA 与 $\sum n-9$ 的比例关系。

2.4 吉富罗非鱼肌肉、肝脏及腹腔脂肪组织的脂肪酸组成

吉富罗非鱼肌肉中脂肪酸组成与饲料中脂肪酸显著相关, 肌肉脂肪酸组成反映了饲料的脂肪酸组成(表 5)。饲料脂肪水平越高, 肌肉中 SFA 的比例越低, 其随着各组饲料脂肪水平的提高, $C_{16:0}$ 和 $C_{18:0}$ 比例下降, 但 $C_{14:0}$ 却是上升的趋势,

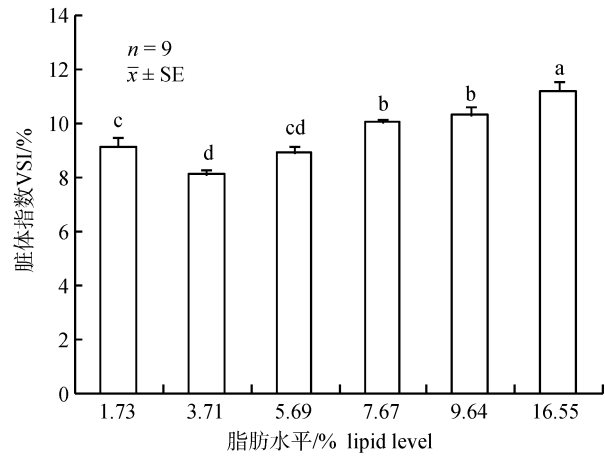


图 3 吉富罗非鱼脏体指数与饲料脂肪水平的关系
柱上不同字母表示组间差异显著($P<0.05$).
Fig. 3 Relationship between viscerosomatic index and dietary lipid levels of GIFT
Mean values with different superscript letter were significantly different ($P<0.05$).

表 2 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼组织脂肪含量的影响
Tab. 2 Effects of dietary lipid levels on tissue lipid content of GIFT

脂肪水平/% lipid level	$n=9; \bar{x} \pm SE; \%$ 湿重 Wet		
	肌肉 muscle	肝脏 liver	腹腔脂肪 fat of perito- neal cavity
1.73	2.53±0.34 ^{bc}	7.38±1.20 ^c	74.12±1.75
3.71	2.29±0.17 ^c	7.90±0.89 ^{bc}	81.96±6.2
5.69	2.56±0.26 ^{bc}	9.80±0.98 ^{abc}	82.79±4.11
7.67	3.28±0.27 ^b	9.96±0.06 ^{abc}	83.04±1.61
9.64	3.89±0.21 ^{ab}	10.64±0.92 ^{ab}	78.80±2.38
16.55	4.27±0.29 ^a	12.73±1.27 ^a	80.31±2.64

注: 同列标不同字母的各项差异显著($P<0.05$).
Note: Mean values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表 3 不同脂肪添加组鱼油及饲料脂肪酸组成
Tab. 3 Fish oil and dietary fatty acid profiles

脂肪酸 fatty acid	鱼油 fish oil(n=3)	脂肪水平 lipid level (n=1)					
		1.73 %	3.71 %	5.69 %	7.67 %	9.64 %	16.55 %
C _{14:0}	6.04±0.06	1.74	4.48	4.80	5.83	5.23	6.13
C _{15:0}	1.21±0.07	0.43	0.83	0.91	0.99	0.93	1.08
C _{16:0}	16.87±1.62	17.92	17.34	15.34	18.19	16.39	16.97
C _{17:0}	1.18±0.11	0.44	0.69	0.75	0.78	0.78	0.84
C _{18:0}	4.26±0.14	4.69	4.11	3.97	3.86	3.64	3.57
C _{20:0}	0.53±0.06	0.57	0.48	0.51	0.43	0.44	0.42
C _{22:0}	0.13±0.02	0.46	0.27	0.27	0.18	0.18	0.15
SFA	32.10±1.80	27.65	30.07	28.42	32.18	29.44	31.14
C _{14:n-3}	0.10±0.04	0.10	0.09	0.07	0.07	0.07	0.09
C _{16:3n-3}	0.73±0.15	0.09	0.51	0.60	0.67	0.71	0.82
C _{20:4n-3}	0.65±0.02	0.56	0.6	0.58	0.60	0.58	0.58
C _{20:5n-3}	11.94±1.37	2.84	8.32	10.10	10.19	11.55	12.08
C _{22:6n-3}	10.42±0.49	3.83	7.86	9.35	8.50	10.24	10.26
Σn-3	23.83±2.08	7.42	17.38	20.70	20.03	23.15	23.83
C _{18:2n-6}	2.45±0.33	24.11	13.32	10.67	8.69	7.22	5.09
C _{20:4n-6}	0.63±0.05	0.55	0.65	0.70	0.64	0.68	0.66
Σn-6	3.07±0.39	24.66	13.97	11.37	9.33	7.90	5.75
C _{16:n-9}	8.84±0.57	5.06	7.25	7.52	8.12	7.66	8.46
C _{18:n-9}	18.15±0.63	26.60	20.95	19.49	19.88	19.33	18.22
C _{20:n-9}	5.30±0.56	1.60	3.31	3.94	3.62	3.99	4.14
C _{22:n-9}	5.51±0.42	4.12	4.7	5.54	4.57	5.48	5.25
Σn-9	39.02±2.53	37.71	36.88	37.30	36.90	37.27	36.96
Σn-3/Σn-6	7.89±1.37	0.30	1.24	1.82	2.15	2.93	4.14
MUFA	39.12±1.08	37.81	36.97	37.37	36.97	37.34	37.05
PUFA	26.80±1.76	31.98	31.26	32.0	29.29	30.98	29.49

注: 1) SFA 还包含 C_{12:0}、C_{13:0}、12-甲基十三烷酸、4,8,12-三甲基十三烷酸、12-甲基十四烷酸、2-己基-环丙烷辛酸、2-辛基-环丙烷辛酸、C_{19:0}、C_{23:0}、C_{24:0}; 2) Σn-9 还包含 7-甲基-十六烷-9-烯酸、C_{24:n-9}。
Note: 1) SFA also including C_{12:0}, C_{13:0}, 12-methyl-tridecylic acid, C_{14:0}, 4,8,12-trimethyl- tridecylic acid, 12- methyl- myristic acid, C_{15:0}, 2-hexyl-cyclopropaneoctanoic acid, C_{17:0}, C_{18:0}, 2-octyl -cyclopropaneoctanoic acid, C_{19:0}, C_{20:0}, C_{22:0}, C_{23:0}, C_{24:0}. 2) Σn-9 also including 7-methyl-9-hexadecanoic acid, C_{24:n-9}.

这一变化趋势与各组饲料中该脂肪酸的变化趋势一致。饲料脂肪水平提高, 肌肉中 C_{16:0}、C_{18:0}、C_{18:2n-6} 及 C_{18:n-9} 比例随之下降, 同时 C_{14:0}、C_{17:0}、C_{20:5n-3}、C_{22:6n-3} 及 C_{20:n-9} 比例上升, 与饲料中对应的脂肪酸的变化规律相关性很高。随饲料脂肪水平提高, 肌肉中Σn-3/Σn-6 系数显著升高($P<0.05$), 其变化范围是 0.90%~4.02%, 总 PUFA 也显著升高($P<0.05$), 范围在 17.86%~30.01%之间。

吉富罗非鱼肝脏中脂肪酸组成同样与饲料脂肪酸组成具有较高的相关性, 但对比肌肉来讲,

其相关性没有肌肉高(表 6)。随着饲料脂肪水平提高, 肝脏中 SFA 出现下降趋势, n-3 PUFA 呈现上升趋势, 这与饲料中的脂肪酸变化规律相同, 但肝脏中 n-9 MUFA 比例受饲料影响较小。肝脏中发现一种 C_{20:3n-7} 脂肪酸, 变化范围为 0.89%~2.25%, 随饲料脂肪水平提高而上升($P<0.05$); 肝脏中 C_{20:0} 随饲料脂肪水平上升呈现显著上升($P<0.05$), 与饲料中 C_{20:0} 比例变化不一致。1.73%、3.71%及 5.69%三组之间Σn-3 差异不显著($P>0.05$), 7.67%、9.64%和 16.55%组显著高于 3.71%组

表 4 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼粪便脂肪酸组成的影响
Tab. 4 Effects of dietary lipid levels on faeces fatty acid profiles of GIFT

n=1; $\bar{x} \pm \text{SE}$; % area

脂肪酸 fatty acid	脂肪水平 lipid level					
	1.73%	3.71 %	5.69 %	7.67 %	9.64 %	16.55 %
C _{14:0}	2.73	2.64	5.44	6.33	7.6	11.44
C _{16:0}	24.24	26.64	38.21	40.47	43.45	49.35
C _{18:0}	6.26	6.15	5.39	5.88	7.75	7.04
SFA	35.35	36.97	50.59	53.04	60.81	69.96
C _{18:2n-6}	7.11	8.71	4.90	2.26	2.45	1
C _{16:n-9}	5.38	3.73	4.01	6.43	4.33	4.85
C _{18:n-9}	34.08	32.33	27.46	24.86	20.25	15.62
C _{20:n-9}	6.8	5.33	3.03	4.22	3.13	2.21
C _{22:n-9}	6.92	7.93	2.97	4.91	3.99	2.73
Σn-9	53.33	49.38	37.56	40.42	31.7	25.41

注: 同列标不同字母的各项差异显著($P<0.05$). SFA 还包含脂肪酸: C_{15:0}、C_{17:0}、C_{20:0}、C_{22:0}、C_{24:0}; Σn-9 还包含脂肪酸: C_{24:n-9}.
Note: Mean values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$). SFA also including fatty acid: C_{15:0}, C_{17:0}, C_{20:0}, C_{22:0}, C_{24:0}. Σn-9 also including fatty acid: C_{24:n-9}.

表 5 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼肌肉脂肪酸组成的影响
Tab. 5 Effects of dietary lipid levels on muscle fatty acid profiles of GIFT

n=3; $\bar{x} \pm \text{SE}$; % area

脂肪酸 fatty acid	脂肪水平 lipid level					
	1.73 %	3.71 %	5.69 %	7.67 %	9.64 %	16.55 %
C _{14:0}	3.41±0.19 ^c	3.56±0.25 ^c	3.89±0.38 ^{bc}	4.45±0.53 ^{ab}	4.53±0.46 ^{ab}	4.71±0.28 ^a
C _{15:0}	0.25±0.20 ^d	0.33±0.08 ^d	0.57±0.06 ^c	0.80±0.04 ^{ab}	0.66±0.02 ^{bc}	0.90±0.06 ^a
C _{16:0}	27.11±1.29 ^a	27.12±2.97 ^a	23.72±1.75 ^b	22.19±0.51 ^{bc}	22.68±1.41 ^{bc}	20.28±1.10 ^c
C _{17:0}	0.29±0.25 ^{cd}	0.27±0.13 ^d	0.48±0.06 ^{bc}	0.73±0.10 ^a	0.53±0.08 ^{abc}	0.70±0.12 ^{ab}
C _{18:0}	7.04±0.05 ^a	6.41±0.01 ^b	6.38±0.28 ^b	5.14±0.52 ^c	5.72±0.30 ^c	4.34±0.55 ^d
C _{20:0}	0.11±0.10 ^{bc}	0.06±0.06 ^c	0.17±0.05 ^{abc}	0.24±0.03 ^a	0.16±0.07 ^{abc}	0.20±0.03 ^{ab}
C _{22:0}	0.02±0.02 ^{ab}	0.01±0.00 ^b	0.03±0.01 ^{ab}	0.04±0.02 ^a	0.02±0.01 ^{ab}	0.02±0.01 ^{ab}
SFA ¹⁾	38.69±0.58 ^a	38.04±2.96 ^a	35.92±2.01 ^{ab}	34.74±0.74 ^{bc}	34.94±1.20 ^{bc}	32.25±1.35 ^c
C _{14:n-3}	0.13±0.00	0.14±0.02	0.14±0.05	0.17±0.04	0.18±0.08	0.14±0.03
C _{16:3n-3}	0.05±0.07 ^d	0.09±0.06 ^d	0.22±0.04 ^d	0.35±0.05 ^b	0.30±0.07 ^{bc}	0.45±0.05 ^a
C _{20:4n-3}	0.63±0.24 ^d	0.80±0.12 ^d	1.32±0.04 ^c	1.70±0.10 ^b	1.45±0.08 ^{bc}	2.12±0.08 ^a
C _{20:5n-3}	2.08±0.84 ^d	4.39±1.05 ^c	4.76±0.45 ^{bc}	5.86±0.25 ^{bc}	5.97±0.15 ^{ab}	8.07±0.36 ^a
C _{22:6n-3}	5.50±1.49 ^b	12.66±5.05 ^a	11.11±1.32 ^a	11.28±1.64 ^a	13.00±1.18 ^a	14.16±0.17 ^a
Σn-3	8.40±2.86 ^c	18.10±7.16 ^b	17.54±1.76 ^b	19.36±1.87 ^{ab}	20.99±1.40 ^{ab}	24.94±0.71 ^a
C _{18:2n-6}	8.52±0.74 ^a	7.18±0.23 ^b	7.15±0.08 ^b	7.14±0.34 ^b	5.56±0.41 ^c	5.38±0.23 ^c
C _{18:3n-6}	0.13±0.10	0.11±0.17	0.07±0.03	0.08±0.01	0.04±0.03	0.02±0.03
C _{20:4n-6}	0.94±0.18 ^{ab}	1.27±0.51 ^a	0.74±0.17 ^b	0.48±0.42 ^b	0.72±0.15 ^b	0.82±0.06 ^{ab}
Σn-6	9.59±0.90 ^a	8.57±0.79 ^{ab}	7.96±0.19 ^b	7.71±0.74 ^b	6.30±0.30 ^c	6.21±0.19 ^c
C _{16:n-9}	7.20±0.28	6.70±2.18	6.30±0.50	7.66±0.68	7.01±0.71	7.69±0.33
C _{18:n-9}	33.45±2.61 ^a	26.16±1.76 ^b	27.94±0.20 ^b	25.88±1.77 ^b	25.77±0.81 ^b	22.62±0.29 ^c
C _{20:n-9}	2.15±0.62 ^{cd}	1.79±0.26 ^d	2.85±0.41 ^{bc}	3.25±0.35 ^{ab}	3.04±0.36 ^{ab}	3.61±0.19 ^a
C _{22:n-9}	0.46±0.59 ^c	0.55±0.18 ^c	1.33±0.30 ^{bc}	1.16±0.98 ^{bc}	1.76±0.28 ^{ab}	2.35±0.24 ^a
Σn-9 ²⁾	43.29±1.74 ^a	35.22±3.40 ^c	38.46±0.34 ^b	38.00±1.67 ^{bc}	37.62±1.00 ^{bc}	36.34±0.47 ^{bc}
Σn-3/Σn-6	0.90±0.40 ^d	2.17±0.98 ^c	2.20±0.17 ^c	2.54±0.50 ^{bc}	3.34±0.32 ^{ab}	4.02±0.12 ^a
MUFA	43.45±1.71 ^a	35.44±3.45 ^c	38.71±0.37 ^b	38.35±1.61 ^b	37.95±1.02 ^{bc}	36.73±0.51 ^{bc}
PUFA	17.86±1.97 ^c	26.52±6.41 ^{ab}	25.37±1.99 ^b	26.90±1.24 ^{ab}	27.11±1.42 ^{ab}	31.01±0.84 ^a

注: 同列标不同字母的各项差异显著($P<0.05$). SFA 还包含脂肪酸: C_{12:0}、C_{13:0}、12-甲基十三烷酸、4,8,12-三甲基十三烷酸、12-甲基十四烷酸、2-己基-环丙烷辛酸、2-辛基-环丙烷辛酸、C_{19:0}、C_{23:0}、C_{24:0}; Σn-9 还包含脂肪酸: 7-甲基-十六烷-9-烯酸、C_{24:n-9}.
Note: Mean values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$). SFA also including fatty acids: C_{12:0}, C_{13:0}, 12-methyl-tridecylic acid, C_{14:0}, 4,8,12-trimethyl-tridecylic acid, 12-methyl-myristic acid, C_{15:0}, 2-hexyl-cyclopropaneoctanoic acid, C_{17:0}, C_{18:0}, 2-octyl-cyclopropaneoctanoic acid, C_{19:0}, C_{20:0}, C_{22:0}, C_{23:0}, C_{24:0}. Σn-9 also including fatty acids: 7-methyl-9-hexadecanoic acid, C_{24:n-9}.

表 6 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼肝脏脂肪酸组成的影响
Tab. 6 Effects of dietary lipid levels on liver fatty acid profiles of GIFT

$n=3$; $\bar{x} \pm \text{SE}$; % area

脂肪酸 fatty acid	脂肪水平 lipid level					
	1.73 %	3.71 %	5.69 %	7.67 %	9.64 %	16.55 %
C _{14:0}	2.92±0.59	3.54±0.45	3.57±0.19	3.04±0.31	3.17±0.17	3.56±0.58
C _{15:0}	0.46±0.16 ^b	0.45±0.13 ^b	0.59±0.14 ^{ab}	0.48±0.13 ^b	0.56±0.13 ^{ab}	0.78±0.04 ^a
C _{16:0}	23.08±1.59 ^a	23.03±2.15 ^a	19.33±2.29 ^b	18.79±1.8 ^b	16.38±1.11 ^b	12.95±0.74 ^c
C _{17:0}	0.80±0.28	0.73±0.22	0.88±0.12	0.78±0.13	0.81±0.13	1.00±0.17
C _{18:0}	8.99±0.83 ^a	9.50±0.87 ^a	8.35±1.45 ^{ab}	8.1±1.37 ^{ab}	6.59±1.09 ^{bc}	5.45±0.90 ^c
C _{20:0}	2.46±0.21 ^d	2.58±0.45 ^d	3.41±0.71 ^c	3.54±0.41 ^{bc}	4.23±0.42 ^b	5.23±0.06 ^a
C _{22:0}	0.46±0.11 ^d	0.58±0.32 ^{cd}	1.05±0.140 ^{bcd}	1.16±0.27 ^{bc}	1.41±0.14 ^b	2.36±0.79 ^a
SFA	40.08±1.82 ^{ab}	41.27±0.98 ^a	38.44±1.44 ^{bc}	37.04±0.92 ^c	34.64±1.21 ^d	33.15±1.10 ^d
C _{14:n-3}	0.39±0.48	0.11±0.01	0.10±0.01	0.10±0.02	0.09±0.02	0.05±0.02
C _{16:3n-3}	0.09±0.04 ^b	0.08±0.03 ^b	0.12±0.04 ^b	0.10±0.04 ^b	0.12±0.01 ^b	0.26±0.15 ^a
C _{20:4n-3}	0.79±0.27 ^a	0.64±0.04 ^{ab}	0.48±0.10 ^{bc}	0.46±0.09 ^{bc}	0.47±0.03 ^{bc}	0.29±0.04 ^c
C _{20:5n-3}	0.03±0.03 ^d	0.06±0.02 ^{cd}	0.12±0.02 ^c	0.12±0.05 ^c	0.19±0.04 ^b	0.34±0.04 ^a
C _{22:6n-3}	14.12±4.5 ^{bc}	11.53±1.69 ^c	13.67±2.70 ^{bc}	17.19±0.50 ^{ab}	17.14±1.28 ^{ab}	19.11±2.33 ^a
Σn-3	16.44±5.43 ^{bc}	13.00±1.69 ^c	15.11±2.87 ^{bc}	18.70±0.56 ^{ab}	18.82±1.34 ^{ab}	21.41±1.99 ^a
C _{18:2n-6}	4.41±0.54	4.75±0.74	4.66±0.26	4.04±0.8	3.82±0.62	4.44±0.41
C _{18:3n-6}	0.14±0.10	0.18±0.02	0.13±0.03	0.11±0.03	0.14±0.06	0.09±0.02
C _{20:4n-6}	0.08±0.05 ^b	0.12±0.01 ^{ab}	0.14±0.01 ^a	0.13±0.03 ^{ab}	0.14±0.03 ^a	0.15±0.02 ^a
Σn-6	4.63±0.64	5.04±0.74	4.93±0.28	4.28±0.83	4.10±0.70	4.67±0.41
C _{16:n-9}	5.56±0.9 ^b	6.31±0.23 ^{ab}	6.67±0.39 ^{ab}	5.87±0.64 ^{ab}	6.82±0.89 ^a	6.68±0.76 ^{ab}
C _{18:n-9}	29.44±4.33 ^a	31.32±1.55 ^a	30.47±4.17 ^a	29.22±1.23 ^a	29.05±2.65 ^a	23.30±1.54 ^b
C _{20:n-9}	0.47±0.14 ^c	0.41±0.10 ^c	0.54±0.10 ^{bc}	0.51±0.09 ^{bc}	0.65±0.02 ^b	1.13±0.07 ^a
C _{22:n-9}	1.88±0.67 ^{de}	1.50±0.30 ^e	2.36±0.25 ^{cd}	2.85±0.31 ^c	3.96±0.69 ^b	6.83±0.46 ^a
Σn-9	42.40±3.92	44.73±1.64	45.11±3.44	42.86±0.52	44.72±0.49	42.71±0.48
C _{20:3n-7}	1.02±0.36 ^b	0.89±0.18 ^b	1.14±0.30 ^b	1.16±0.21 ^b	1.48±0.29 ^{ab}	2.25±0.90 ^a
Σn-3/Σn-6	3.66±1.48 ^{abc}	2.61±0.46 ^c	3.05±0.43 ^{bc}	4.50±1.05 ^{ab}	4.64±0.52 ^a	4.62±0.75 ^a
MUFA	37.82±3.71	39.80±1.52	40.38±3.64	38.82±0.42	40.96±1.08	38.53±0.77
PUFA	22.10±5.45 ^{bc}	18.93±2.03 ^c	21.18±3.42 ^{bc}	24.14±0.94 ^{abc}	24.40±2.28 ^{ab}	28.33±1.22 ^a

注：同列标不同字母的各项差异显著($P<0.05$)。SFA 还包含脂肪酸：C_{12:0}、C_{13:0}、12-甲基十三烷酸、4,8,12-三甲基十三烷酸、12-甲基十四烷酸、2-己基-环丙烷辛酸、2-辛基-环丙烷辛酸、C_{19:0}、C_{23:0}、C_{24:0}；Σn-9 还包含脂肪酸：7-甲基-十六烷-9-烯酸、C_{24:n-9}。

Note: Mean values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$). SFA also including fatty acids: C_{12:0}, C_{13:0}, 12 - methyl - tridecylic acid, C_{14:0}, 4,8,12- trimethyl- tridecylic acid, 12 - methyl - myristic acid, C_{15:0}, 2 - hexyl - cyclopropaneoctanoic acid, C_{17:0}, C_{18:0}, 2 - octyl - cyclopropaneoctanoic acid, C_{19:0}, C_{20:0}, C_{22:0}, C_{23:0}, C_{24:0}. Σn-9 also including fatty acids: 7- methyl - 9 - hexadecanoic acid, C_{24:n-9}.

($P<0.05$)，肝脏中Σn-6 和Σn-9 比例在各个实验组差异均不显著($P>0.05$)。

由表 7 可知，在 3.71%组到 16.55%组之间，随着饲料脂肪水平提高，腹腔脂肪中 SFA 比例呈下降趋势，其中 3.71%组显著高于 16.55%组($P<0.05$)，1.73%与其他各组差异均不显著($P>0.05$)，Σn-3 比例呈上升趋势，且 3.71%和 5.69%组中 Σn-3 比例显著低于其他各组($P<0.05$)，1.73%与

7.67%、9.64%及 16.55%组差异不显著($P>0.05$)；5.69%与 7.67%组腹腔脂肪中Σn-6 比例显著高于其他组 ($P<0.05$)，其他组之间差异不显著 ($P>0.05$)。腹腔脂肪中Σn-9 比例没有显著变化 ($P>0.05$)。Σn-3/Σn-6 系数在 1.73%组中最高，1.73%组显著高于 3.71%、5.69%及 7.67%组 ($P<0.05$)。3.71%组中 MUFA 比例显著低于除 5.69%组之外的其他各组($P<0.05$)。

表 7 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼腹腔脂肪脂肪酸组成的影响
Tab. 7 Effects of dietary lipid levels on mesentery fatty acid profiles of GIFT

脂肪酸 fatty acid	脂肪水平 lipid level					
	1.73%	3.71 %	5.69 %	7.67 %	9.64 %	16.55 %
C _{14:0}	6.91±0.07 ^{bc}	6.77±0.15 ^c	7.11±0.09 ^{bc}	7.1±0.01 ^{bc}	7.21±0.12 ^{ab}	7.5±0.01 ^a
C _{15:0}	1.28±0.29	1.54±0.18	1.28±0.06	1.39±0.12	1.8±0.34	1.94±0.18
C _{16:0}	16.87±1.96	22.19±0.01	22.43±1.03	19.66±1.43	16.33±2.23	16.52±2.94
C _{17:0}	1.61±0.09	1.42±0.2	1.28±0.07	1.22±0.24	1.46±0.18	1.53±0.26
C _{18:0}	6.86±0.6 ^{ab}	10.93±0.14 ^a	7.18±0.80 ^{ab}	9.06±1.34 ^{ab}	5.89±1.49 ^b	6.00±0.82 ^b
C _{20:0}	0.64±0.09	0.66±0.09	0.45±0.04	0.63±0.04	0.59±0.04	0.56±0.02
C _{22:0}	0.16±0.05	0.2±0.05	0.13±0.02	0.17±0.02	0.13±0.02	0.12±0.00
SFA	37.93±1.37 ^{ab}	46.18±0.60 ^a	42.36±0.16 ^{ab}	42.31±0.49 ^{ab}	36.78±2.95 ^b	37.78±1.42 ^b
C _{14:n-3}	0.28±0.05	0.23±0.02	0.25±0.00	0.24±0.01	0.21±0.01	0.21±0.01
C _{16:3n-3}	0.24±0.03	0.2±0.02	0.13±0.02	0.41±0.14	0.27±0.08	0.21±0.06
C _{20:5n-3}	1.7±0.18 ^a	0.14±0.15 ^c	0.62±0.01 ^b	1.23±0.12 ^{ab}	1.61±0.43 ^{ab}	1.09±0.07 ^{ab}
C _{20:4n-3}	0.6±0.20	0.43±0.09	0.31±0.03	0.48±0.07	0.45±0.12	0.36±0.03
C _{22:6n-3}	1.56±0.52	0.29±0.2	0.56±0.03	1.07±0.03	1.38±0.20	0.87±0.04
Σn-3	4.77±0.94 ^a	1.57±0.39 ^b	2.29±0.12 ^b	3.83±0.12 ^a	4.52±0.94 ^a	3.26±0.26 ^a
C _{18:3n-6}	0.05±0	0.04±0.01	0.06±0.01	0.04±0.02	0.05±0.02	0.05±0.02
C _{18:2n-6}	2.63±0.57	3.73±0.43	4.81±0.09	4.77±0.25	3.38±0.15	2.82±0.21
C _{20:4n-6}	0.16±0.04	0.07±0.01	0.06±0.01	0.1±0.02	0.13±0.02	0.11±0.01
Σn-6	2.84±0.05 ^c	3.84±0.43 ^b	4.93±0.11 ^a	4.91±0.29 ^a	3.56±0.14 ^b	2.98±0.18 ^{bc}
C _{16:n-9}	11.74±0.51 ^{ab}	9.71±0.30 ^c	10.27±0.07 ^{bc}	11.17±0.01 ^{ab}	11.73±0.35 ^{ab}	11.84±0.27 ^a
C _{18:n-9}	29.22±1.11	27.8±0.32	29.27±0.73	25.4±0.48	28.91±0.37	28.39±0.04
C _{20:n-9}	6.54±0.33 ^a	4.62±0.03 ^b	4.32±0.03 ^b	6.4±0.30 ^a	6.93±0.03 ^a	6.98±0.36 ^a
C _{22:n-9}	4.37±1.03 ^{ab}	2.5±0.14 ^b	2.84±0.36 ^b	4.36±0.92 ^{ab}	5.62±1.01 ^{ab}	5.64±0.52 ^a
Σn-9	46.25±6.15	43.65±1.34	45.56±1.52	46.71±1.14	48.48±5.34	46.73±6.73
Σn-3/Σn-6	1.68±0.39 ^a	0.41±0.21 ^b	0.46±0.01 ^b	0.78±0.09 ^b	1.27±0.33 ^{ab}	1.09±0.02 ^{ab}
MUFA	52.68±0.46 ^a	45.22±0.81 ^c	47.33±0.08 ^{bc}	48.09±0.05 ^{ab}	54.04±1.50 ^a	53.67±1.08 ^a
PUFA	7.33±1.02 ^b	4.98±0.04 ^b	6.97±0.21 ^{ab}	8.5±0.17 ^a	7.87±0.78 ^{ab}	6.03±0.44 ^{ab}

注: 同列标不同字母的各项差异显著($P<0.05$). SFA 还包含脂肪酸: C_{12:0}、C_{13:0}、12-甲基十三烷酸、4,8,12-三甲基十三烷酸、12-甲基十四烷酸、2-己基-环丙烷辛酸、2-辛基-环丙烷辛酸、C_{19:0}、C_{23:0}、C_{24:0}; Σn-9 还包含脂肪酸: 7-甲基-十六烷-9-烯酸、C_{24:n-9}.

Note: Mean values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$). SFA also including fatty acids: C_{12:0}, C_{13:0}, 12 - methyl - tridecylic acid, C_{14:0}, 4,8,12- trimethyl- tridecylic acid, 12 - methyl - myristic acid, C_{15:0}, 2 - hexyl - cyclopropaneoctanoic acid, C_{17:0}, C_{18:0}, 2 - octyl - cyclopropaneoctanoic acid, C_{19:0}, C_{20:0}, C_{22:0}, C_{23:0}, C_{24:0}. Σn-9 also including fatty acids: 7- methyl - 9 - hexadecanoic acid, C_{24:n-9}.

3 讨论

3.1 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼形体指标的影响

本次实验发现, 1.73%组与 16.55%组中吉富罗非鱼肝脏占鱼体的质量分数比其他组高(图 2、图 3), 肝脏肿大, 但是 1.73%组鱼的肝脏呈现鲜红色而 16.55%组是青灰色, 说明 16.55%组肝脏已经出现病理上的变化。类似的研究结果有: Nanton 等^[9]研究发现鳊(*Melanogrammus aeglefinus*)饲料

中脂肪含量超过 14%时, 其肝体指数和肝脂含量显著升高; 冯健等^[10]对红姑鱼(*Sciaenops ocellatus*)的研究表明, 红姑鱼的各期生长率和存活率随着饲料脂肪含量增加而显著下降, 红姑鱼肝胰脏脂肪含量与饲料脂肪水平成正比, 各组红姑鱼均发生程度不同的营养性脂肪肝病, 其病变程度与饲料脂肪水平成正相关; 李坚明等^[11]研究认为奥尼罗非鱼幼鱼(*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)

饲料中脂肪添加量超过 4%时对其肝脏形态学与组织学有一定影响。因此,合理的脂肪营养是预防鱼类肝脏疾病的关键因素。通过本实验对吉富罗非鱼 4 个形体指标的测算得出,饲料脂肪水平为 7.67%和 9.64%的 2 组之间,鱼体的肥满度、肝体指数、脏体指数均无显著差异($P>0.05$),当饲料脂肪水平达到 16.55%时,鱼体肝体指数和脏体指数较高,这一变化可能是肝脏分解脂肪的代谢负担加重导致组织增大,同时也发现饲料脂肪水平为 1.73%的脂肪组中,鱼体的肝体指数也较高,其原因可能是饲料中的糖类转化成脂肪造成的,高糖低脂的饲料会加剧脂肪的生物合成,导致肝脏体积增大。

3.2 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼组织中脂肪含量的影响

脂肪营养的一个重要的生物功能是为鱼体提供能量,饲料中提供的脂肪过量,大量的脂肪能够在鱼体沉积成为体脂。一般而言鱼类肌肉组织,含有脂肪 1%~10%,除种类差别之外,同时受年龄、季节及营养状况等影响而变动^[12]。当饲料中脂肪含量增加,鱼体组织中的脂肪含量也随之增加而出现脂肪蓄积的情形^[3-5]。本次实验中,吉富罗非鱼肌肉脂肪含量范围为 2.29%~4.27%,肝脏为 7.38%~12.73%,腹腔脂肪组织为 74.12%~83.04%。其中肌肉和肝脏的脂肪含量均随饲料脂肪水平增加而升高,吉富罗非鱼肌肉和肝脏组织中脂肪含量与饲料脂肪水平显著相关^[13]。肝脏中脂肪的含量整体上高于肌肉,随着饲料脂肪水平改变,7.67%组吉富罗非鱼肌肉中脂肪含量显著高于 3.71%组($P<0.05$),但是其肝脏中脂肪含量与其他各组差异均不显著($P>0.05$),说明肝脏中脂肪含量变化比肌肉更稳定,这与肝脏和肌肉所具有的不同生理功能有关。腹腔脂肪组织中沉积了大量的脂肪,其受饲料脂肪水平的影响较小,饲料中的脂肪水平高低可能主要影响腹腔脂肪组织沉积的重量占鱼体的质量分数。以上说明,吉富罗非鱼肝脏和肌肉很容易蓄积脂肪,由于腹腔脂肪组织粘附在肠道上,分离较为困难,不容易精确称重,因此

没有计算其占鱼体的质量分数,腹腔脂肪组织的脂肪含量虽然稳定,但是其占鱼体的质量分数可能会随饲料脂肪水平增加而升高,有待改进实验技术进行验证。

3.4 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼体脂肪酸组成的影响

鱼体组织中脂肪酸组成受饲料中脂肪酸组成的影响很大^[14-15],组织中脂肪酸比例与饲料中脂肪酸比例呈线性关系^[16-17]。本次实验使用的脂肪源为鱼油,鱼油中 n-3 和 n-6 PUFA 的比例分别为 23.83%、3.07%,不含鱼油的 1.73%组基础饲料中的 n-3 和 n-6 PUFA 的比例分别为 7.42%、24.66%,随着饲料中鱼油添加量的增加,饲料中 n-3 和 n-6 PUFA 的比例出现变化,但总 PUFA 基本保持不变占总脂肪酸的 30%左右。饲料脂肪水平提高,吉富罗非鱼肌肉和肝脏中的总 PUFA 比例是增加的,主要是因为鱼油中含有大量的 n-3 PUFA,导致鱼体肌肉和肝脏中的 n-3 PUFA 比例增加。吉富罗非鱼体(包括肌肉、肝脏及腹腔脂肪组织)中主要的 SFA、MUFA、PUFA 分别是 $C_{16:0}$ 、 $C_{18:n-9}$ 、 $C_{18:2n-6}$ 和 $C_{22:6n-3}$,其比例的变化与饲料中脂肪酸比例一致,但它们在鱼体中的变化幅度明显小于饲料中的变化幅度,同样其他各种脂肪酸及脂肪酸大类也几乎都呈现这种现象,这说明吉富罗非鱼肌肉脂肪酸组成具有相对稳定性,这可能是由于鱼体脂肪为结构脂肪,其脂肪酸组成需要保持一定的稳定性,以维持机体结构的稳定性,在对溪红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)^[18]、银大麻哈鱼(*Oncorhynchus kisutch*)^[19]、金头鲷(*Sparus aurata*)^[20]的研究中也发现相似结果。

3.5 吉富罗非鱼对饲料中脂肪酸的吸收及转化能力

此次实验检测了吉富罗非鱼粪便中的脂肪酸组成,以往的研究者对鱼类粪便脂肪酸的分析较少,将吉富罗非鱼粪便中脂肪组成与饲料脂肪酸组成对比,目的是探讨鱼体对脂肪酸的吸收利用能力。实验发现,粪便中的脂肪酸与饲料对比, $C_{14:0}$ 的下降幅度大于 $C_{16:0}$ 和 $C_{18:0}$,但是仍然有一定比例的 $C_{14:0}$ 未被利用而排除体外,短链的 $C_{14:0}$

是否比较长链的 $C_{16:0}$ 和 $C_{18:0}$ 更容易被鱼体吸收,有待进一步的研究验证。吉富罗非鱼对 PUFA 的吸收能力较强,尤其对 $n-3$ PUFA 吸收较高,而对 $C_{18:2n-6}$ 的吸收利用有限,在其他的研究者的实验中也获得相似的结论^[21]。

鱼类脂质合成主要路径由细胞质内脂肪酸合成酶催化,脂肪酸合成酶主要产物为饱和脂肪酸 $C_{16:0}$ 和 $C_{18:0}$ ^[1]。 $n-3$ 、 $n-6$ 及 $n-9$ 等 3 种不饱和脂肪酸系列都采用类似的去饱和和增长碳链反应,形成同系列较长碳链及较高不饱和度的脂肪酸^[22]。通常尼罗罗非鱼鱼体中的 $C_{18:3n-3}$ 比例为 0.5% 左右^[23]。本实验使用的鱼油中,没有检测到 $C_{18:3n-3}$,却检测 0.73% 的 $C_{16:3n-3}$ 。在吉富罗非鱼的肝脏、肌肉及腹腔脂肪中均检测到 $C_{16:3n-3}$,其含量相对于添加的鱼油,其比例要低(表 3、表 5、表 7),进一步说明了饲料的脂肪酸组成与鱼体有较高的相关性^[14-15]。一般认为 $C_{18:3n-3}$ 、 $C_{20:5n-3}$ 、 $C_{22:6n-3}$ 及 $C_{18:2n-6}$ 是鱼类的必需脂肪酸(Essential fatty acid, EFA)^[24-25]。本实验各组不同脂肪水平的饲料中未检测出 $C_{18:3n-3}$,一方面可能是由于饲料中 $C_{18:3n-3}$ 过低,而鱼体自身合成 $C_{18:3n-3}$ 能力有限,导致鱼体中 $C_{18:3n-3}$ 比例过低而未被检测出来;另一方面,由于正常的罗非鱼鱼体中 $C_{18:3n-3}$ 比例为 0.5% 左右,在实验分析中,形成的色谱峰较低而容易被仪器误判为杂质。

本实验中,不添加鱼油的 1.73% 组中吉富罗非鱼肌肉的 $n-3$ PUFA 比例显著低于其他添加鱼油的各组,同时肝脏的 $n-3$ PUFA 比例却并不显著低于其他脂肪组,这反馈了一个信息, $n-3$ PUFA 作为淡水鱼的必需脂肪酸,其在肝脏中的含量是稳定的,而饲料提供充足的 $n-3$ PUFA 时, $n-3$ PUFA 又在肌肉中大量沉积。吉富罗非鱼肌肉中 $n-6$ PUFA 比例受显著饲料影响,同时肝脏的 $n-6$ PUFA 比例在各组中无显著变化, $n-6$ PUFA 虽然是淡水鱼类的必需脂肪酸之一,但是吉富罗非鱼肝脏中 $n-6$ PUFA 相对含量稳定,同时 $n-6$ PUFA 在肌肉中的沉积量也有限, $n-3$ PUFA 更容易在肌肉中沉积,这种差异与肌肉和肝脏具有不同的生物功能有关^[1,17]。鱼体腹腔脂肪组织中总 PUFA

含量较低,主要由 SFA 和 MUFA 组成,其脂肪酸变化仍然受饲料脂肪水平的影响,只是没有肌肉和肝脏中变化的明显。实验意外地发现,吉富罗非鱼肝脏中 $C_{20:0}$ 脂肪酸占总脂肪酸的比例随饲料脂肪水平提高而显著上升,变化范围为 2.46%~5.23%,而饲料、肌肉及腹腔脂肪中 $C_{20:0}$ 比例分别为: 0.42%~0.57%、0.06%~0.24%、0.45%~0.66%,肝脏中的 $C_{20:0}$ 的比例比饲料、肌肉及腹腔脂肪中的高出很多倍,而肌肉和腹腔脂肪中该脂肪酸比例与饲料相差较小,说明 $C_{20:0}$ 在肝脏的脂肪代谢中可能具有特定的作用,有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] Tocher D R, Bell J G, MacGlaughlin P, et al. Hepatocyte fatty acid desaturation and polyunsaturated fatty acid composition of liver in salmonids: effects of dietary vegetable oil[J]. *Comp Biochem Physiol*, 2001, 130B: 257-270.
- [2] Ellis S C, Reigh R C. Effects of dietary lipid and carbohydrate levels on growth and body composition of juvenile red drum, *Sciaenops ocellatus*[J]. *Aquaculture*, 1991, 97: 383-394.
- [3] Anne G, Valérie B, Geneviève C, et al. The combined effects of feeding time and dietary fat levels on feed intake, growth and body composition in rainbow trout[J]. *Aquat Living Res*, 2002, 1(4): 225-230.
- [4] Leigh A B, Shawn D C, James H T. Effect of Dietary Lipid Level and Protein Energy Ratio on Growth and Body Composition of Largemouth Bass, *Micropterus salmoides*[J]. *J World Aquac Soc*, 2005, 36(1): 129-134.
- [5] Barbara G H, Karl D S, Delbert M G, et al. Effects of dietary protein and lipid levels on growth, protein digestibility, feed utilization and body composition of Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. *Aquaculture*, 2008, 283(1-4): 156-162.
- [6] Dey M M, Gupta M V. Socioeconomics of disseminating genetically improved Nile tilapia in Asia: an introduction[J]. *Aquaculture Economic and Management*, 2000, 4(1/2): 5-11.
- [7] Folch M L, Stanley G H S. Simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues[J]. *Biol Chem*, 1957, 226: 497-509.
- [8] Christie W W. A simple procedure for rapid transmethylation of glycerolipids and cholesteryl esters[J]. *Lipid Res*, 1982, 23: 1072-1075.
- [9] Nanton D A, Lall S P, McNiven M A. Effects of dietary lipid

- level on liver and muscle lipid deposition in juvenile haddock, *Melanogrammus aeglefinus* L.[J]. Aquac Res, 2001, 32: 225–234.
- [10] 冯健. 4 种不同脂肪源对太平洋鲑生长和体组成的影响[J]. 水生生物学报, 2006, 30(3): 256–260.
- [11] 李坚明, 甘晖, 冯广朋, 等. 饲料脂肪含量与奥尼罗非鱼幼鱼肝脏形态结构特征的相关性[J]. 南方水产, 2008, 10: 37–43.
- [12] 须山三三三, 鸿巢章二. 水产食品学[M]. 上海: 上海科技出版社. 1992.
- [13] Fitzsimmons K, Dickenson G, Brand C, et al. Effects of reducing dietary lipid levels on growth and body composition of hybrid tilapia in an intensive recirculating-water system[J]. Progr Fish-Culturist, 1997, 59(4): 293–296.
- [14] Hillestad M, Johnsen F, Austreng E, et al. Long-term effects of dietary fat level and feeding rate on growth, feed utilisation and carcass quality of Atlantic salmon[J]. Aquac Nutr, 1998, 4: 89–97.
- [15] Torstensen B E, Froyland L, Lie O. Replacing dietary fish oil with increasing levels of rapeseed oil and olive oil - effects on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) tissue and lipoprotein lipid composition and lipogenic enzyme activities[J]. Aquac Nutr, 2004, 10: 175–192.
- [16] Bell J G, McEvoy J, Tocher D R, et al. Replacement of fish oil with rapeseed oil in diets of Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects tissue lipid compositions and hepatocyte fatty acid metabolism[J]. Nutrition, 2001, 131: 1535–1543.
- [17] Tocher D R. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish[J]. Rev Fish Sci, 2003, 11: 107–184.
- [18] Guillou A, Souey P, Kalil M, et al. Effects of dietary vegetable and marine lipid on growth, muscle fatty acid composition and organoleptic quality of flesh of brookcharr (*Salvelinus fontinalis*)[J]. Aquaculture, 1995, 136: 351–362.
- [19] Dosanjh B S, Higgs D A, Plotnikoff M D, et al. Efficacy of canola oil, pork lard and marine oil singly and in combination as supplemental dietary lipid sources for juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*)[J]. Aquaculture, 1984, 36: 333–345.
- [20] Montero D, Kalinowski T, Obach A, et al. Vegetable lipid sources for gilthead seabream (*Sparus aurata*): effects on fish health[J]. Aquaculture, 2003, 225: 353–370.
- [21] Sigurgisladottir S, Lall S P, Parrish C C, et al. Cholestane as a digestibility marker in the absorption of polyunsaturated fatty acid ethyl esters in Atlantic salmon[J]. Lipids, 1992, 27: 418–424.
- [22] Leonard A E, S L Pereiraa, H Sprecherb, et al. Elongation of long-chain fatty acids[J]. Progress in Lipid Research, 2004, 43: 36–54.
- [23] 胡述楫, 胡人卫. 罗非鱼鱼脂中脂肪酸的鉴定与评价[J]. 西南农业学报. 1997, 10(1): 115–118.
- [24] Mourente G J E, Good, F. G. Bell. Partial substitution of fish oil with rapeseed, linseed and olive oils in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.): effects on flesh fatty acid composition, plasma prostaglandins E_2 and $F_2\alpha$, immune function and effectiveness of a fish oil finishing diet[J]. Aquaculture Nutrition. 2005, 11: 25–40.
- [25] 李爱杰. 水产动物营养与饲料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

Effects of dietary lipid levels on fat deposition and fatty acid profiles of GIFT, *Oreochromis niloticus*

HAN Guangming^{1,2}, WANG Aimin^{1,2}, XU Pao², LV Fu¹, FENG Gongneng¹, YU Yebing¹, YANG Wenping¹

1. Department of Ocean Technology of Yancheng Institute of Technology, Key Laboratory of Aquaculture and Ecology of Coastal Pool of Jiangsu Province, Yancheng 224051, China;

2. Wuxi College of Fisheries of Nanjing Agriculture University, Key Open Laboratory for Genetic Breeding of Aquatic Animals and Aquaculture Biology Certificated by Ministry of Agriculture, Wuxi 214081, China

Abstract: The study mainly focused on the effects of dietary lipid levels on partial physique indices, the fat deposition and fatty acid profiles of muscle, liver and adipose tissue of peritoneal cavity in the juvenile fish of GIFT (Genetically Improved Farmed Tilapia, *Oreochromis niloticus*), and investigated its utilization capabilities of the fatty acid in diets. Triplicate groups of fish were fed for 90 days with the experimental diets formulated with increasing lipid levels (lipid levels group of 1.73%, 3.71%, 5.69%, 7.67%, 9.64% and 16.55%) using fish oil as the lipid source. Result showed condition factor of the fish in the 5.69%, 7.67% and 9.64% groups at higher values contrasted to other groups. The hepatosomatic index of the 1.73% and 16.55% group were significantly higher than those other groups ($P<0.05$). Fat content of muscle in 7.67% group were significantly higher than 3.71% group ($P<0.05$) and significantly lower than 16.55% group of the fish ($P<0.05$). It presented an uptrend on fat contents of muscle and liver and a little influence on fat contents of adipose tissue of peritoneal cavity when dietary lipid levels raising. The higher dietary lipid level, the more body fat deposition and the higher n-3 unsaturated fatty acids proportion of tissue total fatty acids. Results indicated that the partial fish physique indices were influenced by dietary lipid levels, especially hepatosomatic index. While the fish was fed an overabundance lipid diet, the fat was easy to be accumulated in the tissues of muscle and liver. The fat contents and fatty acid profiles of fish reflected the dietary lipid level and fatty acid profiles.[Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(2): 338–349]

Key words: GIFT; fat deposition; fatty acid profiles; dietary lipid level

Corresponding author: WANG Aimin. E-mail: blueseawam@ycit.cn