

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18264

高水平烟酸对吉富罗非鱼脂代谢和体脂沉积的影响

刘伟, 文华, 陆星, 蒋明, 吴凡, 田娟, 喻丽娟

农业农村部淡水生物多样性保护与利用重点开放实验室, 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北 武汉 430223

摘要: 为探讨高水平烟酸对鱼类脂代谢和体脂沉积的影响, 本研究以吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)为研究对象, 设计了 2 个实验。在实验 I 中, 为确定烟酸是否具有改善血脂作用及其适宜水平, 首先通过高糖高脂饲料喂养初始体重(15.28 ± 0.23) g 的实验鱼 40 d, 建立高血脂模型, 随后改投添加 500 mg/kg、1000 mg/kg、2000 mg/kg 烟酸的饲料。结果发现添加 500~2000 mg/kg 的烟酸, 均有降低实验鱼血清胆固醇和甘油三酯水平的作用, 但以 1000~2000 mg/kg 的效果较为显著。在实验 II 中, 采用 2×2 双因素实验设计, 研究了 2 种饲料类型(对照组和高糖高脂饲料)和 2 个烟酸水平(100 mg/kg 和 1000 mg/kg)对初始体重(24.45 ± 0.07) g 实验鱼生长、饲料利用、血脂水平和体成分的影响。养殖 8 周。结果发现, 饲料类型或烟酸水平未对实验鱼的末体重、增重率、特定生长率、肥满度、脏体比和肠脂比, 以及全鱼粗脂肪、粗蛋白、水分和灰分含量等生长性能指标产生显著影响($P > 0.05$); 对饲料粗蛋白和粗脂肪的表观消化率、饲料系数、摄食率等饲料利用指标也未产生显著影响($P > 0.05$)。与投喂对照组饲料的相比, 投喂高糖高脂饲料的实验鱼对饲料干物质和总能的表观消化率, 及其血清胆固醇、甘油三酯和游离脂肪酸水平, 肝脏、内脏、腹肌的粗脂肪含量显著升高($P < 0.05$); 而投喂高水平烟酸实验鱼的血清低密度脂蛋白、胆固醇和游离脂肪酸水平, 肝脏粗脂肪含量则显著降低($P < 0.05$)。饲料类型和烟酸水平仅对实验鱼血清的高密度脂蛋白和胆固醇水平存在显著的交互作用($P < 0.05$)。结果表明, 饲料中添加 1000 mg/kg 烟酸不会影响吉富罗非鱼的生长性能和饲料利用, 并具有降低血脂水平和肝脏脂肪含量的作用。

关键词: 罗非鱼; 烟酸; 脂代谢; 体脂沉积

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)03-0473-11

烟酸是一种结构最简单、理化性质最稳定的 B 族维生素。它作为烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NAD)和烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADP)的辅酶, 参与生物体内 300 多种氧化还原反应, 对动物脂类、碳水化合物、蛋白质等代谢有重要影响^[1-2]。对人类而言, 烟酸具有两面性, 当摄入低水平(mg 级)时被作为维生素使用; 当摄入高水平(g 级)时, 具有调节脂代谢的作用, 能有效升高血浆高密度脂蛋白(HDL)水平, 并能有效降低高脂血病人血浆中的胆固醇(CHOL)、甘油三酯(TG)、低密度脂蛋白(LDL)和极低密度脂蛋白(VLDL)水平^[3], 也

会显著降低非酒精性脂肪肝(NAFLD)的脂含量^[4], 这在鼠^[5]、兔^[6]等恒温动物中也有类似发现。

有关烟酸对鱼类的影响研究, 主要集中在其作为维生素的营养需要量方面。以最大生长为判断依据, 不同鱼类烟酸的需要量为 1~200 mg/kg^[7]。在这些研究中可以发现, 不同水平的烟酸会对不同种类和规格实验鱼的脂存储或血脂水平产生影响^[8-10]。对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)的研究发现, 在半纯化饲料中添加 10 mg/kg 烟酸, 即可增加草鱼的体脂含量; 添加 20 mg/kg 烟酸, 可以提高草鱼血清中 HDL 和 LDL 的水平^[11]。对罗非

收稿日期: 2018-08-03; 修订日期: 2018-10-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31602178); 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-46); 中国水产科学研究院基
本科研业务费资助项目(2018JBF05)

作者简介: 刘伟(1982-), 男, 博士, 副研究员, 从事水产动物营养与饲料研究. E-mail: liuwei@yfi.ac.cn

通信作者: 文华, 研究员, 博士生导师, 从事水产动物营养与饲料研究. E-mail: wenhua.hb@163.com

鱼(*Oreochromis niloticus*)成鱼(220~550 g)的研究发现,在半纯化饲料中添加 40 mg/kg 的烟酸可以提高体脂含量;当添加量为 20~160 mg/kg 时,随添加量的增加,血清 HDL 和 CHOL 水平逐渐升高,当添加量达到 320 mg/kg 时,二者又有所降低^[12];对于体重 80~370 g 的罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的研究则未发现烟酸有影响全鱼脂肪含量的作用,但随烟酸添加量的增加,血清 HDL 水平有逐渐升高的趋势^[13]。然而,高水平烟酸对鱼类脂代谢的影响尚未见报道。

鱼体脂肪异常沉积是养殖生产中经常遇到的问题。摄入的能量过多或营养不平衡是造成此问题的主要原因之一^[14]。目前,尚未可知高水平烟酸是否会对此问题产生改善作用。因此,本研究以吉富罗非鱼(genetically improved farmed tilapia, GIFT, *Oreochromis niluticus*)为研究对象,探讨高水平烟酸对其生长、饲料利用、血液生化指标和体成分的影响,以期烟酸在鱼类饲料中的合理使用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼

实验鱼为来自湖北省罗非鱼原良种场的吉富罗非鱼。运回后放养于循环水养殖系统中,正式实验前用对照组饲料暂养 2 周,使实验鱼适应养殖系统和实验饲料。

1.2 高水平烟酸对罗非鱼血清胆固醇和甘油三酯含量影响的研究(实验 I)

1.2.1 实验饲料 以酪蛋白、明胶、糊精、大豆油、玉米油、维生素预混料(不含烟酸类)和矿物质预混料等为原料,配制蛋白质水平为 35%,脂肪水平为 6%,糖水平为 35%的基础饲料;另用相同原料,配制成蛋白质水平为 35%,脂肪水平为 10%,糖水平为 48%的高糖高脂饲料。饲料配方见表 1。根据以往研究报道,罗非鱼类最大生长所需烟酸的水平为 20~120 mg/kg^[12-13, 15]。据此,在基础饲料中添加 100 mg/kg 烟酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)制成对照组饲料(C),高糖

表 1 实验 I 饲料配方
Tab. 1 Composition of the experimental diets of experiment I

原料 ingredient	对照组 control	处理组 1 treatment 1	处理组 2 treatment 2	处理组 3 treatment 3	高糖高脂组 high carbohydrate and high fat
酪蛋白 casein	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
明胶 gelatin	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
糊精 dextrin	32.00	32.00	32.00	32.00	42.00
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	14.74	14.70	14.65	14.55	0.74
烟酸 niacin	0.01	0.05	0.10	0.20	0.01
大豆油 soy oil	3.00	3.00	3.00	3.00	5.00
玉米油 corn oil	3.00	3.00	3.00	3.00	5.00
维生素预混料 vitamin premix	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
矿物质预混料 mineral premix	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
磷酸二氢钙 monocalcium phosphate	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
氯化胆碱 choline chloride	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
沸石粉 zeolite	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
饲料营养成分(% , 干物质) proximate composition (% , dry matter)					
粗蛋白 crude protein	36.25	36.50	36.53	36.62	36.47
粗脂肪 ether extract	6.69	6.35	6.42	6.43	10.01
灰分 crude ash	5.64	5.68	5.51	5.70	5.73
烟酸含量/(mg/kg) niacin content	103	517	1012	2061	109

注: 根据 Shiau 等^[16]配制维生素预混料和无机盐预混料, 维生素预混料不含烟酸。
Note: The vitamin premix and mineral premix were according to Shiau et al^[16]; vitamin premix does not contain niacin.

高脂饲料中烟酸的添加为 100 mg/kg。另分别在基础饲料中添加 500 mg/kg (C500)、1000 mg/kg (C1000)和 2000 mg/kg (C2000)的烟酸制成 3 种处理组饲料。共计配制 5 种实验饲料。各原料粉碎过 60 目筛,称重后混匀,少量的组分采用逐级扩大法混合,用饲料机挤压成直径为 2 mm 颗粒,在带式干燥机(DW 型,常州苏正干燥设备有限公司)中,干燥温度 95~100℃,干燥时间 10 min,恢复室温后置于-20℃冰柜中冷藏备用。

1.2.2 实验设计和养殖管理 选取体质健壮、规格整齐的 360 尾初始体重(15.28±0.23) g 的实验鱼,放入同一循环系统的 18 个养殖桶(有效容积 450 L)中,每桶放鱼 20 尾。随机分为 2 组。其中,第 1 组设置 3 个养殖桶,投喂对照组饲料 C;第 2 组设置 15 个桶,投喂高糖高脂饲料。每天投喂 3 次,表观饱食投喂。投喂时间分别为 8:30、12:30 和 16:30。

养殖 40 d 时,取实验鱼血清,立即测定 CHOL 和 TG 含量。待证实投喂高糖高脂饲料实验鱼的血清 CHOL 和 TG 含量显著高于对照组($P<0.05$)后,第 1 组继续投喂饲料 C,将第 2 组的 15 个养殖桶随机分为 5 组,每组设置 3 个养殖桶,分别投喂饲料 C、C500、C1000、C2000 和高糖高脂饲料。饲养方法如上所述。养殖期间采用自然光照,水流 2 L/min,水温 28~29℃,溶解氧>5 mg/L,氨氮浓度<0.5 mg/L, pH 为 6.8~7.3。

1.3 高水平烟酸对罗非鱼生长、饲料利用和脂肪积累的影响研究(实验 II)

1.3.1 实验设计和实验饲料 根据在实验 I 的结果,采用 2×2 双因素实验设计,设置对照组饲料和高糖高脂饲料 2 种类型的饲料,烟酸的添加水平分别为 100 mg/kg 和 1000 mg/kg,共计配制 4 种饲料(表 2)。

1.3.2 养殖管理 选取 276 尾体质健壮、规格整齐的初始体重(24.45±0.07) g 的实验鱼,放入 1 套循环系统的 12 个养殖桶(有效容积 450 L)中,每桶放鱼 23 尾,随机分为 4 个处理,每个处理 3 个养殖桶,每个处理投喂 1 种饲料。养殖方法和条件如 1.2。养殖周期 8 周。

表 2 实验 II 的饲料配方与营养成分
Tab. 2 Composition of the experimental diets of experiment II %

原料 ingredient	C100	C1000	HCL100	HCL1000
酪蛋白 casein	32.00	32.00	32.00	32.00
明胶 gelatin	8.00	8.00	8.00	8.00
糊精 dextrin	32.00	32.00	42.00	42.00
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	14.64	14.55	0.64	0.55
烟酸 niacin	0.01	0.10	0.01	0.10
大豆油 soy oil	3.00	3.00	5.00	5.00
玉米油 corn oil	3.00	3.00	5.00	5.00
维生素预混料 vitamin premix	1.00	1.00	1.00	1.00
矿物质预混料 mineral premix	2.00	2.00	2.00	2.00
磷酸二氢钙 monocalcium phosphate	2.00	2.00	2.00	2.00
氯化胆碱 choline chloride	0.25	0.25	0.25	0.25
沸石粉 zeolite	2.00	2.00	2.00	2.00
二氧化钛 titanium dioxide	0.10	0.10	0.10	0.10
饲料营养成分(% , 干物质) proximate composition (% , dry matter)				
粗蛋白 crude protein	36.25	36.99	36.47	36.60
粗脂肪 crude lipid	6.69	6.24	10.01	10.06
灰分 crude ash	5.64	5.96	5.73	5.76
烟酸含量/(mg/kg) niacin content	103	1123	109	1077

注: 根据 Shiau 等^[16]配制维生素预混料和无机盐预混料, 维生素预混料不添加烟酸。

Note: The vitamin premix and mineral premix were according to Shiau et al^[16], vitamin premix does not include niacin.

1.4 样品采集

1.4.1 实验 I 的样品采集 饲养 40 d 后, 饥饿 15 h。投喂对照组饲料的第 1 组, 每桶随机捞取 3 条; 投喂高糖高脂饲料的第 2 组, 每桶随机捞取 1 条, 麻醉后(MS-222, 100 mg/kg), 用 1 mL 注射器于尾静脉取血约 0.3 mL。所有被取血的鱼, 待消毒后均放回原桶。第 45 天、50 天、60 天和 80 天分别再次取血, 取样前均饥饿 15 h。样品在 4℃冰箱内静置 2 h, 以 3000 r/min 的转速离心 15 min, 得到空腹血清。每尾鱼为 1 个样品, 用于测定 CHOL 和 TG 含量。

1.4.2 实验 II 的样品采集 饲养 4 周后, 于每晚排便高峰期(20:00), 用捞网收取并挑选形状完整的粪便。收集 3 d, 冷冻干燥后放入-20℃冰箱, 以备测定干物质、粗蛋白、粗脂肪和总能的表观消

化率。

养殖实验结束后, 禁食 15 h, 麻醉(MS-222, 100 mg/L)后, 对每桶实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, 并根据饲料投喂量计算饲料系数和摄食率。每桶随机取鱼 3 尾, 测量体长和体重, 用于计算肥满度; 于尾静脉取血, 4℃冰箱内静置 2 h, 以 3000 r/min 的转速离心 15 min, 得到空腹血清, 保存于-20℃冰箱中, 用于测定血清生化指标; 随后取内脏称重, 分离肝脏和肠脂并称重, 用于计算肝体比、脏体比和肠脂比。

养殖实验结束后, 另每桶随机取鱼 3 尾, 分离并保留内脏、肝脏、背肌(背鳍下方, 侧线以上部位)、腹肌(侧线以下部位)、尾肌(臀鳍之后, 尾鳍之前部位), 用于测定粗脂肪含量。最后, 每桶随机取鱼 3 尾, 用于测定全鱼常规营养成分。

1.5 样品检测和指标的计算方法

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/T5009.5-2003); 索氏抽提法测定粗脂肪含量(GB/T 5009.6-2003); 灼烧称重法测定灰分含量(GB/T 5009.4-2003); 微生物法测定饲料中烟酸含量(GB 5009.89-2016)。使用量热仪(SDACM 4000, 湖南三德科技发展有限公司)测定饲料和粪便总能。血清中的 FFA 用二次抽提法测定^[17]; CHOL、TG、HDL 和 LDL 等指标采用全自动生化分析(SYSMIX-800)测定。

指标及计算公式如下:

增重率(weight gain, WG, %)=(W_1-W_0) $\times$ 100/ W_0

特定生长率(specific growth rate, SGR, %/d)=($\ln W_1-\ln W_0$) $\times$ 100/ t

饲料系数(feed conversion ratio, FCR)= $W_A/(W_f-W_i)$

肥满度(condition factor, CF, g/cm³)= $W\times 100/L^3$

肝体比(hepatosomatic index, HSI, %)= $W_H\times 100/W$

脏体比(viscerosomatic index, VSI, %)= $W_V\times 100/W$

肠脂比(mesenteric fat index, MFI, %)= $W_F\times 100/W$

摄食率[feed intake, FI, (%BW/d)]= $W_A\times 100/$

$[t\times(W_f-W_i)/2]$

式中, t 为实验天数, W_0 和 W_1 分别为实验鱼的初、末均体重(g), W_i 、 W_f 分别为实验鱼的初、末总体重(g), W 为鱼体重(g), L 为鱼体长(cm), W_A 为投喂饲料干物质重(g); W_H 、 W_V 和 W_F 分别为肝脏、内脏重和肠脂重(g)。

饲料的干物质表观消化率按式(1)计算,

$$ADC=100\times(1-M_d/M_f) \quad (1)$$

式中, ADC 表示总消化率(%); M_d 表示饲料中标记物含量(%); M_f 表示粪便中标记物含量(%)。

饲料中粗蛋白、粗脂肪和总能的表观消化率按式(2)计算,

$$ADC_d=100\times(1-N_f/N_d\times M_d/M_f) \quad (2)$$

式中, ADC_d 表示营养成分的表观消化率(%); M_d 表示饲料中标记物的含量(%); M_f 表示粪便中标记物的含量(%); N_d 表示饲料中营养成分的含量(%或 MJ/kg); N_f 表示粪便中营养成分的含量(%或 MJ/kg)。

1.6 数据分析

所有数据采用平均值 $\pm$ 标准误($\bar{x}\pm SE$)表示。采用 SPSS 22.0 软件对实验数据进行统计分析。对饲料类型和烟酸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。用 Levene 方法进行各处理组间的方差齐次性检测, 当方差不齐时, 进行反正弦或对数(lg)转换。用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验实验处理的影响。采用 Turkey 多重比较来检验实验处理均值间的差异显著性。所有分析取 $P<0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 血清胆固醇和甘油三酯(实验 I)

在实验 I 中, 经过 40 d 养殖, 投喂高糖高脂饲料实验鱼(HCC 组)的血清 CHOL 和 TG 水平显著高于对照组(CC 组) ($P<0.05$, 图 1 A), 并且这种差异在整个实验期间均存在($P<0.05$, 图 1 B, 图 1 C)。与持续投喂高糖高脂饲料(H 组)的实验鱼相比, 在改投对照组饲料后, HC 组实验鱼的血清 CHOL 水平在整个实验期内未出现显著差异($P>0.05$); 但是, 在更换饲料 5 d (养殖实验的 45 d) 时, HC1000 组实验鱼的 CHOL 水平显著降低($P<0.05$); 在更换饲料 10 d (养殖实验的 50 d) 时,

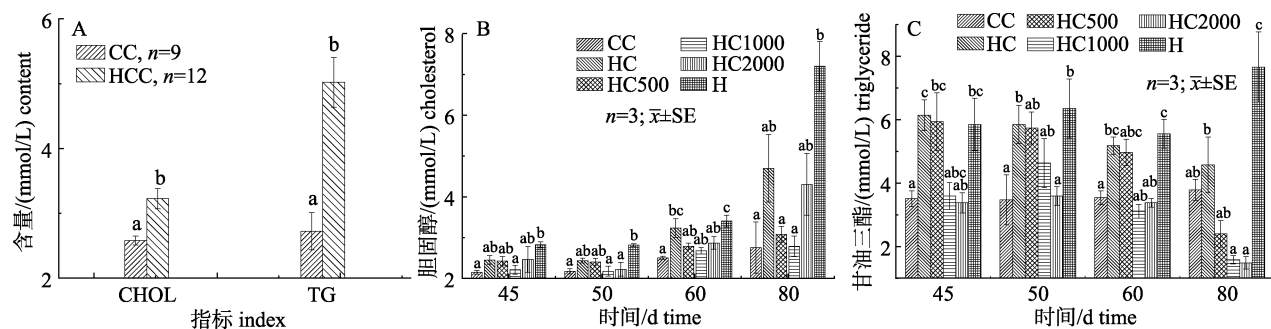


图 1 烟酸水平对吉富罗非鱼血清 CHOL 和 TG 含量变化的影响

A. 40 d 时实验鱼血清 CHOL 和 TG 含量; B. 更换饲料后实验鱼的血清 CHOL 水平; C. 更换饲料后实验鱼的血清 TG 水平. 在图 A 中, CC 代表投喂对照组饲料; HCC 代表投喂高糖高脂饲料. 在图 B、C 中, CC 代表持续投喂对照组饲料; HC、HC500、HC1000 和 HC2000 分别代表更换投喂对照组饲料、C500、C1000 和 C2000 饲料; H 代表持续投喂高糖高脂饲料. 同一时间柱形图上字母不同表示差异显著($P<0.05$).

Fig. 1 Effects of niacin levels on serum CHOL and TG levels of GIFT

A. The serum cholesterol and triglyceride levels of fish at 40 d; B. Serum cholesterol levels of fish after diets replacement; C. Serum triglyceride levels of fish after diets replacement. In Fig. 1 A, CC represents fish fed control diet and HCC represents fish fed diet containing high carbohydrate and high fat. In Fig. 1 B, C, CC represents fish fed control diet continually, HC, HC500, HC1000 and HC2000 represent fish fed control diet, and diet with niacin of 500 mg/kg, 1000 mg/kg and 2000 mg/kg; H represents fish fed diet with high carbohydrate and high fat continually. Different letters on the column indicate significant difference at the same sampling time ($P<0.05$).

HC2000 组实验鱼的 CHOL 显著降低($P<0.05$); 在更换饲料 20 d (养殖实验的 60 d)时, HC500 组实验鱼的 CHOL 也出现显著降低($P<0.05$, 图 1B)。

与 H 组的实验鱼相比, 在更换饲料 10 d (养殖实验的 50 d)时, HC2000 组的血清 TG 水平出现显著降低($P<0.05$); 更换饲料 20 d (养殖实验的 60 d)时, 投喂 HC1000 组的血清出现显著降低($P<0.05$), 而更换饲料 40 d (养殖实验的 80 d)时, 投喂 HC 和 HC500 组的血清亦发现显著降低($P<0.05$, 图 1C)。

2.2 生长和饲料利用(实验 II)

在实验 II 的养殖期间, 各养殖桶实验鱼的表现健康, 摄食活跃, 成活率 100%。饲养实验结束

后发现, 饲料类型、烟酸水平及二者的交互作用对实验鱼的末体重、特定生长率、增重率、饲料系数和摄食率无显著影响($P>0.05$), 且各处理组间亦未出现显著差异($P>0.05$, 表 3)。

由表 4 可见, 饲料类型、烟酸水平及二者的交互作用对实验鱼的粗蛋白和粗脂肪的表现消化率无显著影响($P>0.05$), 但饲料类型显著影响实验鱼的干物质和总能表观消化率($P<0.05$)。投喂高糖高脂饲料的实验鱼对饲料干物质和总能的表观消化率显著高于投喂对照组饲料的($P<0.05$), 尤其是投喂 HCL1000 饲料的实验鱼干物质表观消化率显著高于投喂 C100 和 C1000 饲料的($P<0.05$)。

表 3 饲料类型和烟酸水平对吉富罗非鱼生长和饲料利用的影响

Tab. 3 Effects of dietary types and niacin levels on growth and feed utilization in GIFT

组别 group	初体重/g initial body weight, W_0	末体重/g final body weight, W_1	增重率/% weight gain rate, WG	特定生长率/(%/d) SGR	饲料系数 FCR	摄食率/ [(%BW/d)] FI
C100	24.32±0.41	126.72±4.80	421.24±19.50	2.75±0.06	1.33±0.04	3.20±0.13
C1000	24.43±0.18	124.18±3.79	408.42±18.56	2.71±0.06	1.28±0.04	3.06±0.11
HCL100	24.42±0.19	129.11±1.84	428.69±6.24	2.78±0.02	1.32±0.01	3.19±0.03
HCL1000	24.64±0.15	130.58±2.52	430.17±13.50	2.78±0.04	1.29±0.02	3.13±0.03

双因素方差分析 two-way ANOVA

饲料 dietary	0.236	0.370	0.353	0.992	0.692
烟酸 niacin	0.880	0.722	0.712	0.215	0.299
交互作用 interaction	0.574	0.654	0.657	0.736	0.642

表 4 饲料类型和烟酸水平对吉富罗非鱼表观消化率的影响
Tab. 4 Effects of dietary types and niacin levels on apparent digestibility in GIFT

n=3; $\bar{x}\pm\text{SE}$				
组别 group	干物质/% dry matter	粗蛋白/% crude protein	粗脂肪/% crude lipid	总能 energy
C100	70.74±1.89 ^a	93.33±1.59	96.73±0.80	80.39±1.40 ^a
C1000	70.26±2.02 ^a	90.72±0.87	97.84±0.76	79.94±1.74 ^a
HCL100	77.35±1.27 ^{ab}	92.46±0.44	98.10±1.00	86.15±0.85 ^b
HCL1000	79.92±1.38 ^b	93.74±0.57	97.22±1.22	87.84±0.78 ^b
双因素方差分析 two-way ANOVA				
饲料 dietary	0.001	0.303	0.707	0.001
烟酸 niacin	0.548	0.515	0.910	0.634
交互作用 interaction	0.388	0.081	0.333	0.418

注：同列数据上标不同表示组间存在显著差异(P<0.05).
Note: Values in each column with different superscripts are significantly different (P<0.05).

2.3 形体指标(实验 II)

饲料类型及与烟酸水平二者的交互作用对实验鱼的肥满度、肝体比、脏体比和肠脂比无显著影响(P>0.05, 表 5), 但是投喂高水平烟酸显著降低了实验鱼的肝体比(P<0.05)。

2.4 血清生化指标(实验 II)

饲料类型和烟酸水平对实验鱼血脂水平的影响见表 6。双因素方差分析结果发现, 投喂高糖高脂饲料的实验鱼的血清 CHOL、TG 和 FFA 水平显著升高(P<0.05), 而投喂高水平烟酸饲料则显著降低了实验鱼的血清 LDL、CHOL 和 FFA 水平(P<0.05), 饲料类型和烟酸水平对其血清的 HDL 和 CHOL 存在显著的交互作用(P<0.05)。

在各处理组间, 饲料中添加高水平的烟酸有降低血清 LDL、CHOL、TG 和 FFA 水平的趋势。其中, 投喂 HCL1000 的实验鱼血清 LDL 水平显

著低于投喂 C100 的(P<0.05); 投喂 HCL100 的实验鱼的 CHOL 和 TG 水平显著高于投喂 C100 和 C1000 饲料的(P<0.05), 投喂 C1000 的实验鱼血清 FFA 含量显著低于投喂 HCL 饲料的(P<0.05)。投喂 C1000 的实验鱼血清 HDL 含量最高, 显著高于投喂 C100 组的(P<0.05), 而与其他组差异不显著(P>0.05)。

2.5 体成分(实验 II)

饲料类型和烟酸水平对鱼体成分的影响见表 7 和表 8。由表 7 可见, 饲料类型、烟酸水平及二者的交互作用对实验鱼的全鱼粗脂肪、粗蛋白、水分和灰分含量无显著影响(P>0.05, 表 7)。

在各处理组间, 与投喂含 100 mg/kg 烟酸饲料的实验鱼相比, 投喂含 1000 mg/kg 烟酸的饲料有降低实验鱼肝脏粗脂肪含量, 而提高其内脏、尾肌、腹肌和背肌粗脂肪含量的趋势(表 8)。

表 5 饲料类型和烟酸水平对吉富罗非鱼形体指标的影响
Tab. 5 Effects of dietary types and niacin levels on morphology indexes in GIFT

n=3; $\bar{x}\pm\text{SE}$				
组别 group	肥满度/% CF	肝体比/% HSI	脏体比/% VSI	肠脂比/% MFI
C100	3.38±0.11	1.74±0.08	10.84±0.38	2.40±0.28
C1000	3.35±0.04	1.45±0.04	9.91±0.28	2.54±0.10
HCL100	3.35±0.07	1.69±0.06	11.04±0.51	3.13±0.28
HCL1000	3.44±0.04	1.64±0.10	10.32±0.45	2.55±0.19
双因素方差分析 two-way ANOVA				
饲料 dietary	0.780	0.396	0.478	0.148
烟酸 niacin	0.688	0.047	0.084	0.366
交互作用 interaction	0.433	0.137	0.806	0.149

表 6 饲料类型和烟酸水平对吉富罗非鱼血清生化指标的影响
Tab. 6 Effects of dietary types and niacin levels on serum biochemical indexes in GIFT

n=3; $\bar{x}\pm\text{SE}$					
组别 group	HDL/(mmol/L)	LDL/(mmol/L)	CHOL/(mmol/L)	TG/(mmol/L)	FFA/($\mu\text{Eq/L}$)
C100	1.99 $\pm$ 0.10 ^a	8.16 $\pm$ 0.58 ^b	5.04 $\pm$ 0.30 ^a	4.07 $\pm$ 0.18 ^a	187.01 $\pm$ 49.93 ^{ab}
C1000	2.67 $\pm$ 0.19 ^b	6.29 $\pm$ 0.74 ^{ab}	4.96 $\pm$ 0.34 ^a	3.87 $\pm$ 0.38 ^a	90.40 $\pm$ 22.00 ^a
HCL100	2.38 $\pm$ 0.13 ^{ab}	7.12 $\pm$ 0.52 ^{ab}	6.60 $\pm$ 0.24 ^b	7.18 $\pm$ 0.65 ^b	288.70 $\pm$ 22.36 ^b
HCL1000	2.07 $\pm$ 0.11 ^{ab}	4.37 $\pm$ 0.46 ^a	5.01 $\pm$ 0.05 ^a	6.09 $\pm$ 0.32 ^b	218.08 $\pm$ 12.73 ^{ab}
双因素方差分析 two-way ANOVA					
饲料 dietary	0.486	0.035	0.014	<0.001	0.005
烟酸 niacin	0.228	0.004	0.012	0.163	0.023
交互作用 interaction	0.007	0.470	0.019	0.317	0.674

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异(P<0.05).
Note: Values in each column with different superscripts are significantly different (P<0.05).

表 7 饲料类型和烟酸水平对吉富罗非鱼全鱼成分的影响
Tab. 7 Effects of dietary types and niacin levels on whole body composition in GIFT

n=3; $\bar{x}\pm\text{SE}$; %				
组别 group	粗脂肪 crude fat	粗蛋白 crude protein	水分 moisture	灰分 ash
C100	11.27 $\pm$ 0.75	17.46 $\pm$ 1.23	67.77 $\pm$ 2.69	4.55 $\pm$ 0.49
C1000	11.22 $\pm$ 0.39	16.57 $\pm$ 0.67	68.11 $\pm$ 0.83	4.15 $\pm$ 0.07
HCL100	12.94 $\pm$ 0.50	16.78 $\pm$ 0.12	66.99 $\pm$ 1.37	4.68 $\pm$ 0.19
HCL1000	12.63 $\pm$ 0.45	15.95 $\pm$ 2.08	68.86 $\pm$ 2.89	4.32 $\pm$ 0.55
双因素方差分析 two-way ANOVA				
饲料 dietary	0.124	0.618	0.995	0.705
烟酸 niacin	0.547	0.513	0.618	0.346
交互作用 interaction	0.371	0.981	0.730	0.959

表 8 饲料类型和烟酸水平对吉富罗非鱼不同部位粗脂肪沉积的影响
Tab. 8 Effects of dietary types and niacin levels on lipid deposition in different tissues in GIFT

n=3; $\bar{x}\pm\text{SE}$; %					
组别 group	肝脏 liver	内脏 viscera	尾肌 tail muscle	腹肌 abdominal muscle	背肌 dorsal muscle
C100	6.56 $\pm$ 0.50 ^{ab}	24.63 $\pm$ 1.27 ^a	3.06 $\pm$ 0.12 ^a	9.32 $\pm$ 0.70 ^a	2.99 $\pm$ 0.22
C1000	4.89 $\pm$ 0.22 ^a	29.03 $\pm$ 1.78 ^{ab}	4.42 $\pm$ 0.26 ^{ab}	11.40 $\pm$ 0.63 ^{ab}	3.61 $\pm$ 0.24
HCL100	7.65 $\pm$ 0.65 ^b	31.34 $\pm$ 3.10 ^{ab}	3.44 $\pm$ 0.25 ^a	12.26 $\pm$ 0.83 ^{ab}	3.05 $\pm$ 0.29
HCL1000	6.61 $\pm$ 0.35 ^{ab}	35.52 $\pm$ 1.06 ^b	5.04 $\pm$ 0.48 ^b	12.50 $\pm$ 0.36 ^b	3.20 $\pm$ 0.33
双因素方差分析 two-way ANOVA					
饲料 dietary	0.015	0.010	0.141	0.015	0.544
烟酸 niacin	0.018	0.061	0.001	0.113	0.195
交互作用 interaction	0.510	0.957	0.711	0.196	0.417

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异(P<0.05).
Note: Values in each column with different superscripts are significantly different (P<0.05).

双因素方差分析结果显示, 未发现饲料类型与烟酸水平的交互作用对不同部位的粗脂肪含量有显著影响(P>0.05), 但投喂高糖高脂饲料显著提高了肝脏、内脏和腹肌的粗脂肪含量(P<0.05); 而投喂高水平烟酸饲料则显著降低了肝脏粗脂肪含量

(P<0.05), 提高了尾肌的脂肪含量(P<0.05)。

3 讨论

通常认为, 长时间的高脂高能饮食可导致动物血清 CHOL 和 TG 含量升高^[18], 在本实验中也

发现了同样的结果(图 1A)。在本实验中发现饲料中添加 500~2000 mg/kg 烟酸,可有效降低实验鱼的血清 CHOL 和 TG 水平,尤其在添加水平为 1000~2000 mg/kg 时,可以在更短的时间内降低这二者的含量,表明对于变温动物的罗非鱼,饲料中添加高水平烟酸也具有改善高血脂代谢的作用,这与高水平烟酸对恒温动物,如人^[19-20]、鼠^[21]、狗^[22]等的效果一致,这可能也表明了高水平烟酸调节血脂的作用在不同物种间广泛存在。

研究发现,保持罗非鱼类最大生长速度的饲料烟酸水平为 20~120 mg/kg^[12-13, 15],因此,根据本研究的结果可得出,改善吉富罗非鱼血脂水平所需要的饲料烟酸水平至少是需要量的 5 倍以上。而在对硬头鲮(*Salmo gairdneri*)^[23]、金头鲷(*Sparus aurata* L.)^[24]等鱼类的研究中发现,提高其免疫力所需的维生素 C 水平是维持生长的 5 倍以上,这进一步表明鱼类对非营养生理作用的维生素需求水平较高。

在本实验中,饲料中添加 1000 mg/kg 烟酸未影响实验鱼的生长、摄食和饲料利用,表明实验鱼对高水平烟酸有着良好的耐受性。这与实验鼠的研究结果一致,即摄入过量的烟酸(1 kg 体重每天的摄入量为 450 mg),鼠的生长和摄食也未发生显著变化^[25]。在本实验中实验鱼的摄食率约为 3%,由此计算可得,高水平烟酸的摄入量约为 30 mg/(kg·d),远低于鼠的摄入量^[25]。然而,高水平烟酸对动物可能产生如肝毒性^[26]等负面作用,这是否对鱼类也产生此种影响,则需要进一步研究。

在本实验中,饲料中干物质和能量的表观消化率受到饲料类型的影响,这可能与饲料中粗纤维含量不同(表 2)有关。因为尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)对粗纤维的消化利用率低^[27],并且也发现饲料中的高粗纤维含量会减少奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus*×*O. aureus*)对营养物质的利用^[28],本实验对照组饲料中添加纤维素的含量超过高糖高脂组 10%,从而引起了 GIFT 对其消化利用率的降低。

烟酸通过抑制脂肪组织水解,降低血清 FFA 水平^[29]。在本实验中,饲料中添加高水平烟酸降

低了实验鱼血清 FFA 的水平(表 6),在团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)中也发现了类似的现象^[30]。然而,人口服烟酸短期内会降低血清 FFA 水平,但随后会升高^[31],在鱼类中是否也存在这种现象,则需要进一步研究。同时,比较本实验各处理组间的结果发现,投喂高糖高脂饲料的实验鱼血清 TG 水平显著高于对照组的,这可能是高糖^[32]、高脂^[33]造成脂肪合成增加的原因。另外,在本实验中,比较各处理组间实验鱼的血脂水平发现,在同一饲料类型中,添加高水平烟酸提高了投喂对照组饲料组实验鱼的 HDL 水平,降低了高糖高脂组的 CHOL 含量。HDL 的作用在于 CHOL 逆转运,即可将其从周围组织(包括巨噬细胞和动脉粥样斑块)转运到肝脏进行再循环或以胆酸的形式排泄^[34],高水平烟酸也会促进体内 CHOL 逆转运^[35],从而降低了血清中 CHOL 水平。

在肝脏中,高水平烟酸会降低肝脏中脂肪合成关键酶——二酯酰甘油酰基转移酶 2(DGAT2)的活性,抑制甘油三酯的合成^[36],降低肝脂肪积累^[37-38]。在本实验中,高水平烟酸确实降低了实验鱼肝脏粗脂肪含量(表 8)。内脏是罗非鱼优先存储脂肪的组织^[39],而肌肉是鱼体最大组织,被认为是鱼类较重要的脂肪沉积部位^[40],本实验发现高水平烟酸有提高内脏、背肌和腹肌粗脂肪含量的趋势,并且显著提高尾肌粗脂肪含量(表 8)。这应该与在脂肪组织中烟酸具有抑制 TG 分解的作用^[20, 29],从而相对增加了脂肪的积累有关。

综上所述,饲料中添加 500~2000 mg/kg 烟酸具有改善 GIFT 因高糖高脂饲料摄入导致的血清 CHOL 和 TG 水平升高的功效;添加 1000 mg/kg 烟酸不会影响 GIFT 的生长性能和饲料利用,并具有降低血脂、降低吉富罗非鱼肝脏脂肪含量的作用。

参考文献:

- [1] Hansen A C, Waagbø R, Hemre G I. New B vitamin recommendations in fish when fed plant-based diets[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2015, 21(5): 507-527.
- [2] Foster J W, Park Y K, Penfound T, et al. Regulation of NAD metabolism in *Salmonella typhimurium*: molecular sequence analysis of the bifunctional nadR regulator and the nadA-

- pnuC operon[J]. Journal of Bacteriology, 1990, 172(8): 4187-4196.
- [3] Mani P, Rohatgi A. Niacin therapy, HDL cholesterol, and cardiovascular disease: is the HDL hypothesis defunct?[J]. Current Atherosclerosis Reports, 2015, 17: 43.
- [4] Ganji S H, Tavintharan S, Zhu D M, et al. Niacin noncompetitively inhibits DGAT2 but not DGAT1 activity in HepG2 cells[J]. Journal of Lipid Research, 2004, 45(10): 1835-1845.
- [5] Ganji S H, Kashyap M L, Kamanna V S. Niacin inhibits fat accumulation and oxidative stress in human hepatocytes and regresses hepatic steatosis in experimental rat model[J]. Journal of Clinical Lipidology, 2014, 8(3): 349-350.
- [6] Liu L, Li C, Fu C, et al. Dietary niacin supplementation suppressed hepatic lipid accumulation in rabbits[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2016, 29(12): 1748-1755.
- [7] NRC. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp[M]. Washington, DC: National Academy Press, 2011: 192.
- [8] Mohamed J S, Ibrahim A. Quantifying the dietary niacin requirement of the Indian catfish, *Heteropneustes fossilis* (Bloch), fingerlings[J]. Aquaculture Research, 2001, 32(3): 157-162.
- [9] Ahmed I. Effect of dietary niacin on growth and body composition of two Indian major carps rohu, *Labeo rohita*, and mrigal, *Cirrhinus mrigala* (Hamilton), fingerlings based on dose-response study[J]. Aquaculture International, 2011, 19(3): 567-584.
- [10] Xiang Y, Zhou X Q, Feng L, et al. Dietary niacin requirement of juvenile jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2008, 20(5): 527-533. [向阳, 周小秋, 冯琳, 等. 幼建鲤的烟酸需要量[J]. 动物营养学报, 2008, 20(5): 527-533.]
- [11] Wu F, Jiang M, Zhao Z Y, et al. The dietary niacin requirement of juvenile *Ctenopharyngodon idellus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(1): 65-70. [吴凡, 蒋明, 赵智勇, 等. 草鱼幼鱼对烟酸的需要量[J]. 水产学报, 2008, 32(1): 65-70.]
- [12] Huang F, Wen H, Wu F, et al. The dietary niacin requirement of large GIFT tilapia[J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(2): 235-240. [黄凤, 文华, 吴凡, 等. 吉富罗非鱼成鱼对烟酸的需要量[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(2): 235-240.]
- [13] Jiang M, Huang F, Wen H, et al. Dietary niacin requirement of GIFT tilapia, *Oreochromis niloticus*, reared in freshwater[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2014, 45(3): 333-341.
- [14] 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.]
- [15] Shiau S Y, Suen G S. Estimation of the niacin requirements for tilapia fed diets containing glucose or dextrin[J]. Journal of Nutrition, 1992, 122(10): 2030-2036.
- [16] Shiau S Y, Yu Y P. Dietary supplementation of chitin and chitosan depresses growth in tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*[J]. Aquaculture, 1999, 179(1-4): 439-446.
- [17] Shanghai Medical Laboratory. Clinical Biochemistry Test (volume 1)[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1979: 168-170. [上海市医学化验所. 临床生化检验(上册)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979: 168-170.]
- [18] Yu H L, Bi Y X, Ma W W, et al. Long-term effects of high lipid and high energy diet on serum lipid, brain fatty acid composition, and memory and learning ability in mice[J]. International Journal of Developmental Neuroscience, 2010, 28(3): 271-276.
- [19] Grundy S M, Mok H Y, Zech L, et al. Influence of nicotinic acid on metabolism of cholesterol and triglycerides in man[J]. Journal of Lipid Research, 1981, 22(1): 24-36.
- [20] Lukasova M, Hanson J, Tunaru S, et al. Nicotinic acid (niacin): new lipid-independent mechanisms of action and therapeutic potentials[J]. Trends in Pharmacological Sciences, 2011, 32(12): 700-707.
- [21] Akpan E, Etim O, Bassey U, et al. The effects of nicotinic acid on lipid profile of albino wistar rats[J]. Journal of Physiology and Pharmacology Advances, 2014, 4(8): 401-406.
- [22] Le Bloc'h J, Leray V, Nazih H, et al. Nicotinic acid accelerates HDL cholesteryl ester turnover in obese insulin-resistant dogs[J]. PLoS ONE, 2015, 10(9): e0136934.
- [23] Navarre O, Halver J E. Disease resistance and humoral antibody production in rainbow trout fed high levels of vitamin C[J]. Aquaculture, 1989, 79(1-4): 207-221.
- [24] Ortu O J, Esteban M A, Meseguer J. Effect of high dietary intake of vitamin C on non-specific immune response of gilthead seabream (*Sparus aurata* L.)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 1999, 9(5): 429-443.
- [25] Fukuwatari T, Kurata K, Shibata K. Effects of excess nicotinic acid on growth and the urinary excretion of B-group vitamins and the metabolism of tryptophan in weaning rats[J]. Journal of the Food Hygienic Society of Japan, 2009, 50(2): 80-84.
- [26] Cooper D L, Murrell D E, Roane D S, et al. Effects of formulation design on niacin therapeutics: mechanism of action, metabolism, and drug delivery[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2015, 490(1): 55-64.

- [27] Anderson J, Jackson A J, Matty A J, et al. Effects of dietary carbohydrate and fibre on the tilapia *Oreochromis niloticus* (Linn.)[J]. *Aquaculture*, 1984, 37(4): 303-314.
- [28] Shiau S Y, Kwok C C, Chen C J, et al. Effects of dietary fibre on the intestinal absorption of dextrin, blood sugar level and growth of tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*[J]. *Journal of Fish Biology*, 2010, 34(6): 929-935.
- [29] Luring B, Taggart A K P, Tata J R, et al. Niacin lipid efficacy is independent of both the niacin receptor GPR109A and free fatty acid suppression[J]. *Science Translational Medicine*, 2012, 4(148): 148ra115.
- [30] Wang T J. Effect of niacin on dietary requirement and stress response ability of juvenile blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. [王天娇. 团头鲂幼鱼对烟酸的适宜需要量及调节抗应激能力的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.]
- [31] Carlson L A, Oro L. The effect of nicotinic acid on the plasma free fatty acid demonstration of a metabolic type of sympathicolysis[J]. *Acta Medica Scandinavica*, 1962, 172(6): 641-645.
- [32] Boonanuntanasarn S, Kumkhong S, Yoohat K, et al. Molecular responses of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to different levels of dietary carbohydrates[J]. *Aquaculture*, 2018, 482: 117-123.
- [33] Tian J, Wu F, Yang C G, et al. Dietary lipid levels impact lipoprotein lipase, hormone-sensitive lipase, and fatty acid synthetase gene expression in three tissues of adult GIFT strain of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2015, 41(1): 1-18.
- [34] Chen G L, Liu L W, Xie S, et al. High-density lipoprotein metabolism and its influence to coronary heart disease[J]. *Advances in Cardiovascular Diseases*, 2010, 31(3): 360-363. [陈国良, 刘立伟, 谢爽, 等. 高密度脂蛋白胆固醇代谢及其对冠心病影响的研究进展[J]. *心血管病学进展*, 2010, 31(3): 360-363.]
- [35] Zhao S P, Dong J, Ni Z L, et al. Promotion of cholesterol reverse transport in mice in vivo by niacin[J]. *Journal of Clinical Research*, 2008, 25(9): 1588-1590. [赵水平, 董静, 倪占玲, 等. 烟酸促进小鼠体内胆固醇逆转运[J]. *医学临床研究*, 2008, 25(9): 1588-1590.]
- [36] Kamanna V S, Ganji S H, Kashyap M L. Recent advances in niacin and lipid metabolism[J]. *Current Opinion in Lipidology*, 2013, 24(3): 239-245.
- [37] Chen J, Jiang Y A. Effects of niacin on lipid metabolism in rat model of non-alcoholic fatty liver disease[J]. *Journal of Clinical Hepatology*, 2015, 31(2): 261-265. [陈静, 江应安. 烟酸对非酒精性脂肪性肝病大鼠模型脂质代谢的影响[J]. *临床肝胆病杂志*, 2015, 31(2): 261-265.]
- [38] Ganji S H, Kashyap M L, Kamanna V S. Niacin inhibits fat accumulation, oxidative stress, and inflammatory cytokine IL-8 in cultured hepatocytes: Impact on non-alcoholic fatty liver disease[J]. *Metabolism*, 2015, 64(9): 982-990.
- [39] Wang Y W, Zhang J L, Jiao J G, et al. Physiological and metabolic differences between visceral and subcutaneous adipose tissues in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *American Journal of Physiology—Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 2017, 313(5): R608-R619.
- [40] Ding L Y, Zhang L M, Wang J Y, et al. Effect of dietary lipid level on the growth performance, feed utilization, body composition and blood chemistry of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*)[J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41(10): 1470-1478.

Effects of high levels of niacin on lipid metabolism and body fat deposition in genetically improved farmed tilapia, *Oreochromis niloticus*

LIU Wei, WEN Hua, LU Xing, JIANG Ming, WU Fan, TIAN Juan, YU Lijuan

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 high niacin levels on lipid metabolism and body fat deposition in fish, two experiments on genetically improved farmed tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*) were designed. In experiment I, to determine whether high niacin can decrease serum lipid content in fish and its appropriate level, a model of hyperlipidemia was established by first feeding GIFT (initial body weight: 15.28 ± 0.23 g) a high-carbohydrate and high-fat diet for 40 d; subsequently, these fish were fed diets containing 500 mg/kg, 1000 mg/kg, and 2000 mg/kg niacin. The results showed that the addition of 500–2000 mg/kg niacin in the diet could reduce fish serum cholesterol and triglyceride levels, and that 1000–2000 mg/kg niacin had more highly significant effects. In experimental II, a 2×2 factorial study was conducted to investigate the effects of two diet types (the control diet and high-carbohydrate and high-fat diet) and two niacin levels (100 mg/kg and 1000 mg/kg) on the growth, feed utilization, serum lipid level, and body composition of GIFT (initial body weight: 24.45 ± 0.07 g). The experiment lasted for 8 weeks. The results showed that neither of the diet types nor niacin levels had significant effects ($P > 0.05$) on the final mean weight, weight gain, specific growth rate, feed conversion ratio, feeding intake, condition factor, viscerosomatic index, mesenteric fat index, or the apparent digestibility of crude protein and crude fat, or crude fat, crude protein, moisture, and ash content of the whole fish. Apparent digestibility of dry matter and energy, and the levels of serum cholesterol, triglycerides and free fatty acid (FFA), and the crude fat contents of liver, viscera, and abdominal muscle of fish fed the high-carbohydrate and high-fat diet were significantly higher ($P < 0.05$) than those of the control group. The serum low density lipoprotein, cholesterol and FFA, and liver crude fat contents of fish fed the diets contain 1000 mg/kg niacin were significantly lower ($P < 0.05$) than those fed the diets containing 100 mg/kg niacin. There were significant interactions ($P < 0.05$) between dietary types and niacin levels on serum high density lipoprotein and cholesterol contents. These results indicated that the supplementation of 1000 mg/kg niacin in the diet would not affect the growth performance and feed utilization of GIFT. However, it could reduce the levels of serum lipids and liver fat content.

Key words: tilapia; niacin; lipid metabolism; body fat deposition

Corresponding author: WEN Hua. E-mail: wenhua.hb@163.com