

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.14326

吉富罗非鱼与奥利亚罗非鱼完全双列杂交后代生长性能与肌肉营养成分的比较

强俊¹, 杨弘^{1,2}, 徐跑^{1,2}, 何杰¹, 马昕羽², 朱志祥¹, 李瑞伟³

1. 中国水产科学研究院 淡水渔业研究中心 农业部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081;

2. 南京农业大学 无锡渔业学院, 江苏 无锡 214182;

3. 茂名市茂南三高渔业发展有限公司, 广东 茂名 525024

摘要: 以吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)与奥利亚罗非鱼(*O. aureus*)为繁育亲本, 采用完全杂交进行配组, 分别对吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼纯繁与正反交后代生长性能和肌肉营养成分进行了比较, 并且研究了脂代谢相关基因 mRNA 水平与肌肉脂肪含量的相关性。将初始规格基本一致的 4 组 F₁ 罗非鱼饲养 100 d 后, 吉富罗非鱼纯繁组 F₁ 特定生长率最高($P<0.05$), 吉富罗非鱼奥利亚正反交组合无显著差异($P>0.05$), 奥利亚纯繁组 F₁ 特定生长率最低($P<0.05$)。同时, 奥利亚纯繁组 F₁ 的饲料转化率、肝体比与内脏比指数显著高于其他实验组($P<0.05$)。各实验组水分、灰分与粗蛋白含量间无显著差异($P>0.05$), 吉富纯繁组 F₁ 的粗脂肪含量显著高于其他组合($P<0.05$)。奥利亚纯繁组 F₁ 的必需氨基酸、呈味氨基酸与氨基酸总含量均显著低于其他实验组($P<0.05$), 4 组 F₁ 的肌肉必需氨基酸组成均符合 FAO/WHO 的标准。吉富纯繁组 F₁ 的饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸以及 n-6 多不饱和脂肪酸含量均显著高于正反交组合与奥利亚纯繁组 F₁ ($P<0.05$)。肌肉 *FAS*、*LPL*、*HSL* 和 *G6PD* mRNA 水平与脂肪含量的相关性分析表明, *FAS* 与 *G6PD* mRNA 水平与肌肉脂肪含量呈负相关, 相关系数(R^2)分别为 0.761 5($P<0.01$)和 0.538 7($P<0.05$); *LPL* 和 *HSL* mRNA 水平与肌肉脂肪含量呈正相关, 相关系数分别为 0.782 5($P<0.01$)和 0.562 4($P<0.05$)。研究结果表明, 奥利亚纯繁组 F₁ 的生长与肌肉营养成分明显劣于其他实验组, 证明杂交能够提高后代的生长性能, 改良肌肉品质, 增加选育的综合效果。同时, 吉富罗非鱼奥利亚正反交组合间 *LPL* 与 *G6PD* mRNA 水平间无显著差异($P>0.05$), 增加肌肉脂肪含量有助于提高 *LPL* 和 *HSL* mRNA 表达水平。

关键词: 罗非鱼; 肌肉营养成分; 脂肪酸; 氨基酸; 脂代谢酶

中图分类号: S961

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)04-0654-12

罗非鱼是中国南方各省重要的养殖经济鱼类之一, 具有出肉率高, 无肌间刺, 肌肉中含有多种丰富的人体必需氨基酸与多不饱和脂肪酸。这些优势造就了罗非鱼巨大的国际与国内市场需求。

吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)作为当前中国主推的养殖种类, 已在广东、广西、海南等省广泛养殖。然而, 近几年在养殖过程中突显出抗病能力较差的问题, 如何提高罗非鱼的抗病

力、同时保证其具有较高生长速度与出肉率成为当前研究的重点。杂交育种是实现这个目的的最有效也是最直接的方式。2012 年我们选择了一个遗传信息较为稳定、具有较高遗传潜力的吉富罗非鱼家系, 与抗逆和抗病性能较强的‘夏奥 1 号’奥利亚罗非鱼(*O. aureus*)(1983 年从美国奥本大学引进, 经过近 20 代的连续群体选育, 具有明显的抗病力与抗逆性方面的优势)进行种间杂交, 通过对

收稿日期: 2014-07-31; 修订日期: 2014-10-30.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD26B03-1); 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-49).

作者简介: 强俊(1984-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 研究方向为鱼类遗传繁殖和健康养殖. E-mail: qiangjunn@163.com

通信作者: 杨弘, 研究员, E-mail: Yangh@ffrc.cn; 徐跑, 研究员, E-mail: xup@ffrc.cn

遗传特性、杂交优势、生长与抗病以及肌肉营养成分等各方面综合比较,期望更好地评估选育效果。

在众多评价鱼肉品质的因素中,肌肉中的自由氨基酸成分与多不饱和脂肪酸组成,以及挥发性物质的含量主要受鱼肉来源的影响^[1]。其中,氨基酸组成在改善鱼肉营养成分与口感上发挥着重要作用^[2]。鱼肉脂肪中富含长链 n-3 多不饱和脂肪酸,尤其是二十碳五烯酸(20:5n-3 或 EPA)和二十二碳六烯酸(22:6n-3 或 DHA),这些脂肪酸在人类营养需求,疾病防控以及健康促进上发挥着重要作用^[3]。长链 n-3 多不饱和脂肪酸在人体内不能合成,必须通过外界食物获取^[4]。鱼体肌肉脂肪酸组成受养殖品种与条件以及营养调控的影响^[5]。一些脂代谢酶,如激素敏感性脂肪酶(hormone-sensitive triglyceride lipase, HSL)、脂蛋白脂酶(lipoprotein lipase, LPL)、脂肪酸合成酶(fatty acid synthetase, FAS)、葡萄糖-6-磷酸脱氢酶(glucose 6-phosphate dehydrogenase, G6PD)等在脂肪酸合成与代谢上发挥着重要作用^[6-8]。因此,本研究拟从吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代的生长、肌肉氨基酸与脂肪酸组成以及脂代谢相关酶 mRNA 表达水平 3 个方面进行分析与比较,旨在为下一步吉富罗非鱼良种选育和品种改良提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验用鱼

吉富罗非鱼取自中国水产科学研究院淡水渔业研究中心宜兴试验基地。‘夏奥 1 号’奥利亚罗非鱼取自中国水产科学研究院淡水渔业研究中心南泉试验基地。

1.2 养殖条件与实验配组

2012 年 5 月上旬,取吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼雌鱼各 20 尾、雄鱼各 10 尾,在 4 个水泥池(长×宽×深 700 cm×300 cm×150 cm,水深 100 cm)中,每个池子按雌雄比例 2:1 放入母本 10 尾,父本 5 尾,试验设计见表 1。5 月 22 日开始出苗,4 d 内,陆续见苗。将苗捞起后分别放入 4 个水泥池中进行培育。鱼苗经过 15 d 的强化培育,体长达 2 cm

左右时,选择规格整齐、健壮的仔鱼进行试验。

试验在 12 个同等规格的水泥池(500 cm×250 cm×150 cm,水深 100 cm)中进行,试验期间水泥池均用来自同一蓄水池的流水进行水交换,日换水量 10 m³,进水口位于池的上面,出水口位于池底中央,水流带走大部份鱼类排泄废物,并采用 24 h 不间断充分增氧,以保证水体水质良好,水泥池的水温在 26~29℃,pH 值 7.2~7.8,各水泥池的水质条件基本一致,每个水泥池中放养 120 尾仔鱼。每天投饲膨化颗粒饲料 3 次,投喂量为体重 6%~12%(饲料含粗蛋白质为 32.0%、脂肪 8.0%)。每隔 10 d 每个组合随机选取 10 尾鱼进行称重,调整饲料投喂量。

表 1 本试验的交配设计

Tab. 1 Mating design of the present study

	奥利亚罗非鱼 (<i>O. aureus</i>)(♂)	吉富罗非鱼 (<i>O. niloticus</i>)(♂)
奥利亚罗非鱼(<i>O. aureus</i>)(♀)	√	√
吉富罗非鱼(<i>O. niloticus</i>)(♀)	√	√

1.3 指标测量

饲养 100 d 后,禁食 24 h,统计各养殖桶的鱼数,每桶随机选取 30 尾罗非鱼,称量完体重与体长。随机再选取 10 尾鱼,用浓度为 200 mg/L 的 MS-222 作快速深度麻醉,立即剖开腹腔,剥离出内脏和肝合并称重。

分别按下式计算特定生长率(SGR)、饲料转化率(FCR)、肝体比(HSI)、内脏比(VSI)、肥满度(CF):

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

$$\text{饲料转化率(FCR, \%)} = (W_t - W_0) / F \times 100$$

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

$$\text{内脏比(VSI, \%)} = 100 \times W_v / W_b$$

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

式中: W_0 (g)为鱼的初始均体重; W_t (g)为鱼的终末均体重; t (d)为饲养天数; F (g)为每尾鱼的平均总摄食量(湿重); W_h (g)为每尾鱼终末肝重; W_v (g)为每尾鱼终末内脏重; W_b (g)为每尾鱼终末体重; L (cm)为每尾鱼终末体长。

1.4 肌肉营养测定和评价方法

每个平行另外随机选取 3 尾鱼,用纱布擦去

每尾鱼体表的水分,用手术刀割取罗非鱼背部肌肉,低温绞碎后分装,一半用于测量肌肉一般营养成分,一半用于肌肉氨基酸与脂肪酸的测定。同时取 0.1 g 左右的新鲜肌肉用液氮速冻后,于 -80℃ 保存,用于分子生物学分析。

1.4.1 一般营养成分测定 样品在 105℃ 下烘至恒重测定水分。采用凯氏定氮法测定样品的总氮含量,然后将测定结果乘以 6.25 得粗蛋白含量;用索氏抽提法测定粗脂肪含量;将样品在电炉上炭化到无烟,再在马福炉中灼烧(550℃) 5 h 测得灰分含量。每一样品重复测定 3 次,然后求出其平均值。

1.4.2 氨基酸组成测定 样品经酸(盐酸 6 mol/L)水解后,参照 JY/T019-1996 的方法在高效液相色谱仪(Aglient 1100 型)上测定氨基酸组成(色氨酸须碱水解方能测出,本试验未检测)。

1.4.3 脂肪酸组成测定 称取约 1.5 g 样品+15 mL 混合溶剂(氯仿/甲醇=2/1,体积比)振荡提取 3 次,过滤,合并滤液挥干。加 2 mL 0.5mol/L 氢氧化钠甲醇溶液,60℃ 水浴 30 min。冷却,加 2 mL 25%三氟化硼甲醇溶液,60℃ 水浴 20 min。冷却,加 2 mL 正己烷和 2 mL 饱和氯化钠溶液,振荡萃取,静止分层。取上层利用日本岛津(Shimadzu) GC-2010 进行检测。

1.4.4 营养品质评价方法 根据联合国粮农组织/世界卫生组织(FAO/WHO)1973 年建议的氨基酸评分标准模式(FAO/WHO 模式)和中国疾病预防控制中心营养与食品安全所提出的鸡蛋蛋白质的

氨基酸模式分别按以下公式计算氨基酸评分(AAS)^[9]、化学评分(CS)和必需氨基酸指数(EAAI)^[10]:
AAS=待测蛋白质氨基酸含量(%) / [FAO/WHO 评分模式氨基酸含量(%)]

CS =待评蛋白质氨基酸含量(%) / 鸡蛋蛋白质氨基酸含量(%)

$$EAAI=[(100A/AE) \times (100B/BE) \times (100C/CE \times \dots \times (100J/JE)]^{1/n}$$

式中, n 为比较的必需氨基酸(EAA)数目; $A, B, C, \dots, J$ 为罗非鱼肌肉蛋白质的 EAA 含量(% , DM); $AE, BE, CE, \dots, JE$ 为全鸡蛋蛋白质的 EAA 含量(% , DM)。

1.5 脂代谢酶基因定量表达

根据 GenBank 中罗非鱼 FAS、LPL、HSL 和 G6PD 序列,设计 4 个基因的特异性引物,引物序列见表 2。用罗非鱼的管家基因 β -actin(EU887951.1) 作为内参,设计 β -actin 引物,引物序列见表 2。所有引物由上海基康生物技术有限公司合成,取罗非鱼肌肉 20 mg 左右,参照 RNeasy Mini Handbook(QIAGEN 公司)说明书用试剂盒提取总 RNA, OD_{260}/OD_{280} 为 1.90 左右。

RT-PCR 与荧光定量 PCR 反应液的制备与反应条件参照强俊等^[11]的方法。

1.6 数据处理

在基因表达与 β -actin 的定量 PCR 扩增效率基本一致的前提下,计算基因 mRNA 相对表达水平。以罗非鱼 β -actin 为内参,对得到的各样品 C_t

表 2 引物序列
Tab. 2 Primer sequences

目标基因 target mRNA	序列 sequence	NCBI GenBank accession No.
脂肪酸合成酶 <i>FAS</i>	F: 5'-CGGCAACGAGTCTGAGGCTGA A-3'	GU433188.1
	R: 5'-TGTCCTGTGAGCGGAGGTGAT-3'	
脂蛋白脂酶 <i>LPL</i>	F: 5'-AGGCTGCGACATCCAGAACACT-3'	GU433189.1
	R: 5'-GCCACGCTCTGCTGCTCA AT-3'	
激素敏感性脂肪酶 <i>HSL</i>	F: 5'-CCGAGAAGCAGGTGGAGAAGGT-3'	FJ601660.1
	R: 5'-TGGTGGAGGCTGAAGCTCTGGT-3'	
葡萄糖-6-磷酸脱氢酶 <i>G6PD</i>	F: 5'-ACAGGAAGTGTGACCCACCTT-3'	XM_003448158
	R: 5'-AGCACCATGAGGTTCTGGACCA-3'	
内参基因 β -actin control gene β -actin	F: 5'-CCACACAGTGCCCATCTACGA-3'	EU_887951.1
	R: 5'-CCACGCTCTGTCAGGATCTTCA-3'	

值进行均一化处理,以吉富罗非鱼自交组合 F_1 mRNA 的表达水平为基准,应用 $2^{-\Delta\Delta C_T}$ 法^[12]确定不同组合 F_1 基因 mRNA 的相对表达量。数据结果用平均值 $\pm$ 标准差 ($\bar{x}\pm SD$)表示,试验数据用 SPSS15.0 统计软件进行方差分析及 Duncan 多重比较。采用 Excel 进行基因表达水平与肌肉脂肪含量相关性分析。显著水平为 0.05,极显著水平为 0.01。

2 结果与分析

2.1 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代生长性能与形体指标的比较

由表 3 可见,饲养 100 d 后,各试验组存活率间无显著差异($P>0.05$)。吉富罗非鱼的生长速度具有明显优势,显著快于奥利亚罗非鱼及与其正反交的后代($P<0.05$);两个杂交组合间的生长速度无显著差异($P>0.05$)。奥利亚罗非鱼纯繁后代的饲料转化率显著高于两个杂交组合($P<0.05$),与吉富无显著差异($P>0.05$)。

吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼反交 F_1 —吉奥罗非鱼肝脏重量显著高于吉富和奥利亚罗非鱼自交与

正交 F_1 组合($P<0.05$)(表 4)。奥利亚罗非鱼自交 F_1 的内脏重量显著小于其他 3 个组合 F_1 ($P<0.05$)。吉富自交与吉富和奥利亚正交 F_1 —奥吉罗非鱼肝体比指数和肥满度显著小于吉奥罗非鱼与奥利亚自交 F_1 ($P<0.05$)。吉奥罗非鱼内脏比指数显著小于其他组合 F_1 ($P<0.05$)。

2.2 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代一般肌肉营养成分组成的比较

吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交 F_1 肌肉水分、灰分、粗蛋白和粗脂肪含量的测定结果见表 5。4 个组合 F_1 肌肉水分含量介于 76.71%~79.18%,粗蛋白含量介于 18.48%~19.65%,灰分含量介于 1.18%~1.35%,各组合 F_1 间无显著差异($P>0.05$)。吉富罗非鱼自交 F_1 肌肉中粗脂肪含量为 0.98%,显著高于吉富罗非鱼奥利亚正反交和奥利亚自交组合的 F_1 ($P<0.05$)。

2.3 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代肌肉氨基酸组成与营养品质评价

由表 6 显示,4 个罗非鱼交配组合 F_1 肌肉(鲜样)中共检测出 17 种氨基酸,包含 7 种必需氨基酸

表 3 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正反交后代生长性能比较

Tab. 3 Comparison on growth and male ratio in offspring of self-bred and reciprocal cross of GIFT and Aurea tilapia

组合 combination	初始体重/g initial body weight	终末体重/g final body weight	特定增长率/%·d ⁻¹ SGR	饲料转化率/% feed conversion rate
吉富罗非鱼自交 ^① GIFT tilapia♂ × GIFT tilapia♀	1.22±0.02	170.40 ±32.67 ^a	1.41 ±0.08 ^a	2.07 ±0.05 ^{bc}
奥吉罗非鱼 ^② GIFT tilapia♂ × Aurea tilapia♀	1.24±0.01	145.37 ±39.69 ^b	1.21 ±0.06 ^b	1.94 ±0.04 ^a
吉奥罗非鱼 ^③ Aurea tilapia♂ × GIFT tilapia♀	1.22±0.02	144.65 ±40.17 ^b	1.20 ±0.11 ^b	1.97 ±0.04 ^{ab}
奥利亚罗非鱼自交 ^④ Aurea tilapia♂ × Aurea tilapia♀	1.19±0.02	81.85 ±26.47 ^c	0.67 ±0.02 ^c	2.13 ±0.09 ^c

注: ①吉富罗非鱼♂×吉富罗非鱼♀为吉富罗非鱼自交; ②吉富罗非鱼♂×奥利亚罗非鱼♀为奥吉罗非鱼;③奥利亚罗非鱼♂×吉富罗非鱼♀为吉奥罗非鱼; ④奥利亚罗非鱼♂×奥利亚罗非鱼♀为奥利亚罗非鱼自交。不同上标字母表示组间差异显著($P<0.05$)。
Note: ① the offspring of self-bred between GIFT tilapia♂ and GIFT tilapia♀; ②the offspring of reciprocal cross between GIFT tilapia♂ and Aurea tilapia♀; ③the offspring of reciprocal cross between Aurea tilapia♂ and GIFT tilapia♀; ④the offspring of self-bred between Aurea tilapia♂ and Aurea tilapia♀. Values with different letters mean significant differences between groups ($P<0.05$).

表 4 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正反交后代形体指标的比较

Tab. 4 Comparison on body indices in offspring of self-bred and reciprocal cross of GIFT and Aurea tilapia

组合 combination	肝重/g liver weight	内脏重/g visceral weight	肝体比指数 hepatosomatic index	内脏比指数 viscerosomatic index	肥满度/% condition factor
吉富罗非鱼自交 GIFT tilapia♂ × GIFT tilapia♀	3.85±0.92 ^a	22.80±4.33 ^a	2.31±0.52 ^a	13.71±2.34 ^a	4.49 ±0.48 ^a
奥吉罗非鱼 GIFT tilapia♂ × Aurea tilapia♀	3.43±0.75 ^a	21.13±2.18 ^a	2.45±0.41 ^a	15.07±1.93 ^b	4.39 ±0.32 ^a
吉奥罗非鱼 Aurea tilapia♂ × GIFT tilapia♀	4.30±0.79 ^b	17.95±2.47 ^b	3.01±0.62 ^b	12.58±1.57 ^c	4.12±0.29 ^a
奥利亚罗非鱼自交 Aurea tilapia♂ × Aurea tilapia♀	2.64±0.62 ^c	12.77 ±2.11 ^b	3.22 ±0.34 ^c	15.62 ±1.37 ^b	3.99±0.25 ^b

注: 不同上标字母表示组间差异显著($P<0.05$)。
Note: Values with different letters mean significant differences between groups ($P<0.05$).

表 5 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正反交后代肌肉营养组成比较

Tab. 5 Comparison on nutritional compositions in muscle in offspring of self-bred and reciprocal cross of GIFT and <i>Aurea</i> tilapia %(鲜重 wet weight)				
组合 combination	水分 moisture	粗蛋白 crude protein	粗脂肪 crude lipid	灰分 ash
吉富罗非鱼自交 GIFT tilapia♂ × GIFT tilapia♀	76.71±0.58	19.65±0.32	0.98±0.11 ^a	1.27±0.09
奥吉罗非鱼 GIFT tilapia♂ × <i>Aurea</i> tilapia♀	77.63±0.63	19.26±0.21	0.82±0.08 ^b	1.32±0.08
吉奥罗非鱼 <i>Aurea</i> tilapia♂ × GIFT tilapia♀	78.03±0.44	18.74±0.45	0.64±0.06 ^c	1.35±0.06
奥利亚罗非鱼自交 <i>Aurea</i> tilapia♂ × <i>Aurea</i> tilapia♀	79.18±0.61	18.48±0.27	0.57±0.07 ^d	1.18±0.07

注: 不同上标字母表示组间差异显著($P<0.05$).
Note: Values with different letters mean significant differences between groups ($P<0.05$).

表 6 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正反交后代肌肉氨基酸含量比较

Tab. 6 Comparison on contents of amino acids in muscle in offspring of self-bred and reciprocal cross of GIFT and <i>Aurea</i> tilapia %(鲜重 wet weight)					
氨基酸 amino acid	吉富罗非鱼自交 GIFT tilapia♂ × GIFT tilapia♀	奥吉罗非鱼 GIFT tilapia♂ × <i>Aurea</i> tilapia♀	吉奥罗非鱼 <i>Aurea</i> tilapia♂ × GIFT tilapia♀	奥利亚罗非鱼自交 <i>Aurea</i> tilapia♂ × <i>Aurea</i> tilapia♀	<i>P</i>
天门冬氨酸 Asp	1.85±0.09	2.12±0.04	1.85±0.09	1.78±0.04	ns
谷氨酸 Glu	3.07±0.14	3.41±0.04	3.07±0.14	2.84±0.06	<0.05
丝氨酸 Ser	0.81±0.03	0.80±0.01	0.82±0.02	0.65±0.02	<0.05
组氨酸 His	0.62±0.03	0.63±0.02	0.62±0.02	0.41±0.02	<0.05
甘氨酸 Gly	1.04±0.02	1.01±0.01	1.11±0.02	0.92±0.04	ns
精氨酸 Arg	1.21±0.03	1.20±0.02	1.24±0.03	1.04±0.03	<0.05
丙氨酸 Ala	1.27±0.03	1.26±0.01	1.30±0.02	1.06±0.03	<0.05
酪氨酸 Tyr	0.60±0.02	0.61±0.02	0.60±0.02	0.48±0.02	<0.05
胱氨酸 Cys	0.04±0.00	0.04±0.00	0.05±0.00	0.03±0.00	<0.05
脯氨酸 Pro	0.53±0.05	0.53±0.05	0.60±0.05	0.65±0.03	<0.05
苏氨酸 Thr	0.92±0.03	0.92±0.02	0.93±0.02	0.79±0.03	<0.05
缬氨酸 Val	1.10±0.05	1.10±0.03	1.11±0.03	0.92±0.02	ns
蛋氨酸 Met	0.68±0.02	0.68±0.01	0.69±0.01	0.56±0.02	<0.05
苯丙氨酸 Phe	0.95±0.04	0.94±0.01	0.96±0.01	0.79±0.02	<0.05
异亮氨酸 Ile	1.00±0.04	1.01±0.02	1.01±0.02	0.85±0.02	<0.05
亮氨酸 Leu	1.49±0.08	1.49±0.08	1.49±0.08	1.43±0.03	ns
赖氨酸 Lys	1.79±0.11	1.79±0.11	1.79±0.11	1.75±0.05	ns
必需氨基酸总量ΣEAA	7.94±0.28	7.93±0.26	7.99±0.23	7.09±0.19	<0.05
呈味氨基酸ΣDAA	7.23±0.23	7.80±0.26	7.33±0.23	6.60±0.17	<0.05
氨基酸总量ΣTAA	18.97±0.56	19.54±0.41	19.25±0.47	16.96±0.41	<0.05
ΣEAA/TAA	0.419	0.406	0.415	0.418	ns
ΣDAA/TAA	0.381	0.399	0.381	0.389	ns

(NEEA)和 4 种呈味氨基酸(DAA), 氨基酸总量占鲜样的 16.96%~19.54%; 必需氨基酸总量占鲜样的 7.09%~7.99%; 呈味氨基酸为 6.60%~7.80%。奥利亚罗非鱼自交 F_1 肌肉中氨基酸含量, 必需氨基酸以及呈味氨基酸总量显著低于其他组合 F_1 ($P<0.05$)。4 组罗非鱼 F_1 中必需氨基酸与呈味氨基酸占总氨基酸的比例之间无显著差异($P>0.05$)。奥利亚自交组合 F_1 肌肉中 Glu, Ser, His, Arg, Ala, Tyr, Cys, Pro, Thr, Met, Phe, Ile 含量均低于其他各

组合 F_1 。由表 7 可知, 4 个罗非鱼交配组合 F_1 中必需氨基酸的评分均接近或大于 1, 其中奥利亚自交组合在 Lys 和 Leu 的分值显著高于其他各组合 F_1 。化学评分中除 Met+Cys 外, 各交配组合 F_1 均大于 0.6。各组合 F_1 肌肉中 Lys 分值接近或大于 1, 其中奥利亚自交 F_1 Lys 分值显著大于其他各组合。同时, 奥利亚罗非鱼自交 F_1 的必需氨基酸指数(EAAI)也显著高于吉富自交 F_1 ($P<0.05$)。

表 7 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正反交后代肌肉必需氨基酸组成指数比较

Tab. 7 Comparison on EAA composition in muscle in offspring of self-bred and reciprocal cross of GIFT and *Aurea* tilapia

项目 item	氨基酸 amino acid	FAO 模式 FAO pattern	鸡蛋蛋白 egg protein	吉富罗非鱼自交 GIFT tilapia♂ × GIFT tilapia♀	奥吉罗非鱼 GIFT tilapia♂ × <i>Aurea</i> tilapia♀	吉奥罗非鱼 <i>Aurea</i> tilapia♂ × GIFT tilapia♀	奥利亚罗非鱼 自交 <i>Aurea</i> tilapia♂ × <i>Aurea</i> tilapia♀	<i>P</i>
AAS	异亮氨酸 Ile	2.50		0.91	0.92	0.96	0.97	ns
	亮氨酸 Leu	4.40		0.77	0.78	0.80	0.92	<0.05
	赖氨酸 Lys	3.40		1.19	1.20	1.24	1.46	<0.05
	苏氨酸 Thr	2.50		0.83	0.84	0.88	0.89	ns
	缬氨酸 Val	3.10		0.80	0.81	0.85	0.84	ns
	蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	2.20		0.75	0.75	0.80	0.76	ns
	苯丙氨酸+酪氨酸 Tyr +Phe	3.80		0.92	0.93	0.97	0.95	ns
CS	异亮氨酸 Ile		3.31	0.69	0.70	0.72	0.73	ns
	亮氨酸 Leu		5.34	0.63	0.64	0.66	0.76	<0.05
	赖氨酸 Lys		4.41	0.92	0.93	0.96	1.13	<0.05
	苏氨酸 Thr		2.92	0.71	0.72	0.76	0.77	ns
	缬氨酸 Val		4.10	0.60	0.62	0.64	0.63	ns
	蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys		3.86	0.43	0.43	0.45	0.43	ns
	苯丙氨酸+酪氨酸 Tyr +Phe		5.65	0.62	0.63	0.65	0.64	ns
EAAI				70.19	71.43	74.00	78.82	<0.05

2.4 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代肌肉脂肪酸组成的比较

由表 8 可见, 4 个罗非鱼交配组合 F₁ 肌肉中共检测出 18 种脂肪酸, 其中含 6 种 SFA, 3 种 MUFA 以及 9 种 PUFA。各交配组 F₁ 肌肉脂肪酸中 SFA, MUFA 和 PUFA 含量存在显著差异($P<0.05$), 其中吉富罗非鱼自交 F₁ 的 SFA, MUFA 和 PUFA 含量均显著高于其他各组合 F₁。奥利亚自交组合 F₁ 中 SFA 和 MUFA 含量最低, 然而 PUFA 中的 EPA 和 DHA 含量显著高于其他组合 F₁。奥吉罗非鱼的 DPA 含量显著高于吉奥罗非鱼($P<0.05$)。吉富罗非鱼自交 F₁ 肌肉中 n-6 系列 PUFA 含量明显高于正反交组合与奥利亚自交组合 F₁($P<0.05$)。各交配组合 n-3 系列 PUFA 含量间无显著差异($P>0.05$)。

2.5 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代脂代谢酶 mRNA 表达水平及与肌肉脂肪含量的相关性分析

相同饲养条件下, 4 个不同交配组合 F₁ 肌肉 FAS, LPL, HSL 和 G6PD mRNA 相对表达水平的

比较见图 1, 各交配组间存在显著差异($P<0.05$)。吉富罗非鱼自交 F₁ 肌肉 FAS(图 1a)和 G6PD(图 1d) mRNA 水平显著低于吉奥罗非鱼与奥利亚自交 F₁; 然而, LPL(图 1b)和 HSL(图 1c) mRNA 水平显著高于吉奥与奥利亚罗非鱼自交 F₁。吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正反交 F₁ 的 LPL 与 G6PD mRNA 水平间无显著差异($P>0.05$)。

肌肉 FAS、LPL、HSL 和 G6PD mRNA 水平与肌肉脂肪含量的相关性分析见图 2。肌肉 FAS(图 2a)和 G6PD(图 2d) mRNA 水平与肌肉脂肪含量呈负相关, 相关系数 $R^2=0.761\ 5$ ($P<0.01$)和 $0.538\ 7$ ($P<0.05$)。LPL(图 2b)和 HSL(图 2c) mRNA 水平与肌肉脂肪含量呈正相关, 相关系数分别为 $R^2=0.782\ 5$ ($P<0.01$)和 $0.562\ 4$ ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代生长性能与形体指标的指数比较

本实验中, 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交组合在 4 d 内陆续出苗, 实验开始前在相

表 8 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正反交后代肌肉脂肪酸含量比较

Tab. 8 Composition and contents of fatty acid in muscle in offspring of self-bred and reciprocal cross of GIFT and *Aurea tilapia* % (鲜重 wet weight)

脂肪酸含量 fatty acid contents	吉富罗非鱼自交 GIFT tilapia♂× GIFT tilapia♀	奥吉罗非鱼 GIFT tilapia♂× <i>Aurea tilapia</i> ♀	吉奥罗非鱼 <i>Aurea tilapia</i> ♂× GIFT tilapia♀	奥利亚罗非鱼自交 <i>Aurea tilapia</i> ♂× <i>Aurea tilapia</i> ♀	<i>P</i>
C12:0	0.035±0.006	0.031±0.008	0.034±0.008	0.045±0.009	<0.05
C14:0	1.655±0.027	1.113±0.079	0.899±0.123	0.565±0.083	<0.05
C15:0	0.200±0.012	0.174±0.019	0.157±0.027	0.170±0.007	<0.05
C16:0	22.707±0.894	20.322±0.534	16.359±0.477	13.618±0.750	<0.05
C18:0	6.800±0.172	5.588±0.441	4.476±0.469	3.942±0.238	<0.05
C20:0	0.153±0.013	0.088±0.012	0.088±0.009	0.086±0.009	<0.05
饱和脂肪酸 ΣSFA	31.550±0.784	27.316±0.551	22.013±0.411	18.427±0.472	<0.05
C16:1	3.332±0.104	2.551±0.194	1.935±0.143	1.506±0.308	<0.05
C18:1	27.768±1.456	21.068±1.033	14.160±0.095	11.856±0.764	<0.05
C20:1	1.092±0.113	0.836±0.092	0.519±0.019	0.464±0.030	<0.05
单不饱和脂肪酸ΣMUFA	32.191±0.538	24.455±0.389	16.615±0.469	13.826±0.391	<0.05
C18:2n-6	19.194±0.687	15.014±0.956	10.078±1.097	9.698±0.443	<0.05
C18:3n-6	0.448±0.015	0.317±0.006	0.244±0.013	0.162±0.073	<0.05
C18:3n-3	1.982±0.088	1.520±0.187	0.890±0.140	0.852±0.059	<0.05
C20:2	0.714±0.050	0.601±0.035	0.423±0.043	0.541±0.081	<0.05
C20:3	0.795±0.047	0.746±0.052	0.699±0.039	0.534±0.062	<0.05
C20:4n-6	1.326±0.318	1.446±0.173	1.499±0.196	1.551±0.131	<0.05
C20:5n-3 EPA	0.528±0.066	0.449±0.019	0.534±0.086	0.664±0.031	<0.05
C22:5n-3 DPA	1.609±0.130	1.679±0.074	1.399±0.126	1.430±0.181	<0.05
C22:6n-3 DHA	6.469±0.991	7.506±0.988	7.799±0.927	8.243±0.913	<0.05
多不饱和脂肪酸ΣPUFA	33.064±0.592	29.279±0.514	23.566±0.514	23.675±0.628	<0.05
Σn-6	20.968±0.811	16.777±0.493	11.821±0.137	11.411±0.142	<0.05
Σn-3	10.588±0.471	11.154±0.315	10.622±0.072	11.189±0.131	ns
Σn-6/Σn-3	1.980±0.218	1.504±0.211	1.113±0.104	1.020±0.095	<0.05

同条件下强化培育了 15 d。实验中,我们选取规格基本一致的 F₁ 进行生长性能比较,4 组初始体重介于 1.19~1.22 g,因此可以排除仔鱼孵化时间不同对实验结果的影响。

养殖 100 d 后,吉富罗非鱼自交 F₁ 遗传了亲本生长速度快的优势,特定生长率显著高于吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正反交 F₁ 和奥利亚自交组合。吉富罗非鱼于 2006 年从马来西亚的世界渔业中心引进,并在淡水渔业研究中心的宜兴试验基地进一步选育了 6 代,各方面的性能指标均有明显提高。陈林等^[13]在对不同罗非鱼生长比较中也发现,新吉富罗非鱼的绝对增重率>吉奥罗非鱼(新吉富罗非鱼♀×奥利亚罗非鱼♂)>奥利亚罗非

鱼。然而,奥利亚罗非鱼自交 F₁ 的饲料转化率显著优于吉富罗非鱼奥利亚正反交 F₁。吉富罗非鱼自交组合 F₁ 的肝体比指数小于其他组合 F₁,同时,肥满度高于其他组合。奥利亚罗非鱼自交 F₁ 的肝体比和内脏比指数均最高,而肥满度最小。

3.2 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代一般肌肉营养成分组成的比较

本实验中,养殖环境与饲料营养均相同,因而养殖后代中肌肉营养成分的差异主要来自遗传效应。由表 5 可知,吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代肌肉水分、粗蛋白和灰分含量间无显著差异。然而,4 组 F₁ 的粗脂肪含量存在显著差异。以吉富罗非鱼作为父本的吉富罗非鱼自交

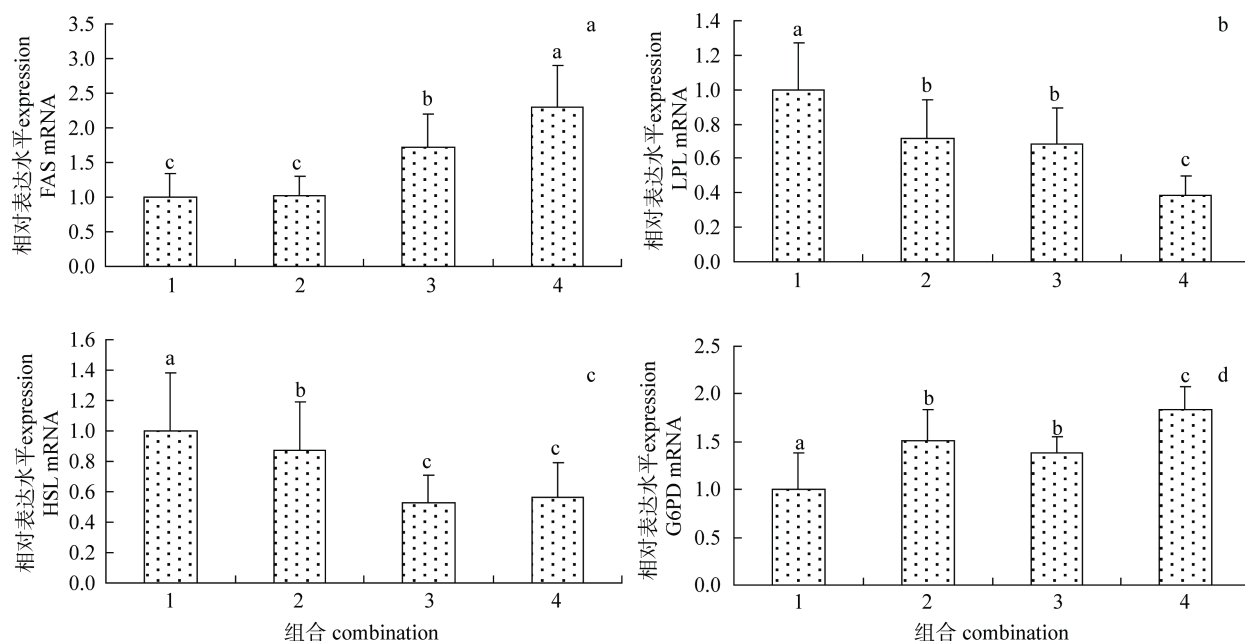


图1 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代肌肉脂代谢酶 mRNA 相对表达水平的比较

1: 吉富自交; 2: 奥吉; 3: 吉奥; 4: 奥利亚自交。柱上不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 1 Comparison on mRNA levels of lipid metabolism enzyme in muscle in offspring of self-bred and reciprocal cross of GIFT and *Aurea* tilapia

1: GIFT tilapia ♂ × GIFT tilapia ♀; 2: GIFT tilapia ♂ × *Aurea* tilapia ♀; 3: *Aurea* tilapia ♂ × GIFT tilapia ♀; 4: *Aurea* tilapia ♂ × *Aurea* tilapia ♀. Values with different letters mean significant differences between groups ($P < 0.05$).

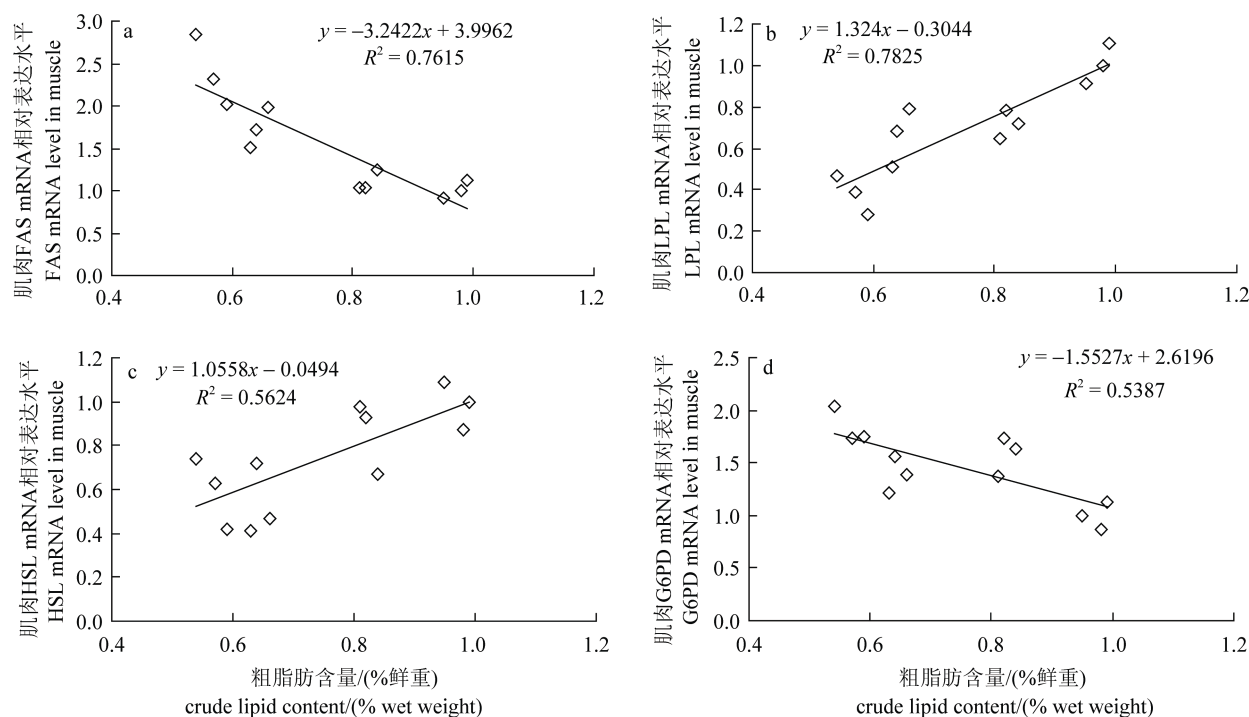


图2 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代肌肉粗脂肪含量与脂代谢酶基因 mRNA 表达水平的相关性

Fig. 2 The relationship between crude lipid content and mRNA levels of lipid metabolism enzyme in muscle in offspring of self-bred and reciprocal cross of GIFT and *Aurea* tilapia

和吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正交 F_1 —奥吉罗非鱼, 肌肉中粗脂肪含量显著高于以奥利亚罗非鱼作为父本的吉奥和奥利亚罗非鱼自交 F_1 。父本效应、母本效应、父母本交互作用效应在鱼体遗传效应中发挥着重要作用, 肌肉中脂肪含量的调控是否由父本效应所调控, 下一步我们将对这方面展开深入的研究。

3.3 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代肌肉氨基酸组成与营养品质评价

本实验所检测的肌肉 17 种氨基酸中, 奥利亚罗非鱼自交 F_1 肌肉氨基酸成分中, 除 Pro 含量显著较高外, 其他氨基酸成分均低于或显著低于吉富罗非鱼自交与吉富和奥利亚罗非鱼正反交 F_1 。同时, 吉富罗非鱼自交与吉富和奥利亚正反交 F_1 的 EAA 值介于 7.93~7.99, 显著高于奥利亚自交 F_1 的 7.09。吉富罗非鱼自交 F_1 与奥吉罗非鱼的 EAA 值也显著高于养殖刀鲚的 EAA 值, EAA 值与鱼肉的营养价值密切相关, 说明这两种罗非鱼的肉质营养优于养殖刀鲚^[10]。4 个交配组合 F_1 的 AAS 均接近 1 或大于 1, 说明这 4 组 F_1 罗非鱼肌肉氨基酸含量符合 FAO/WHO 的标准, 适合人体需求^[14]。采用 CS 评价中, 肌肉中 Val 和 Met+Cys 含硫氨基酸略显缺乏, 这可能与所摄食的食物中含硫氨基酸不足有关^[15]。

鱼肉的鲜美程度很大程度上取决于呈味氨基酸(DAA)的含量^[16]。刀鲚味道鲜美, 野生和养殖刀鲚的 DAA 分别占鲜重的 6.1%和 6.7%^[10]。本研究中发现, 吉富罗非鱼自交与吉富和奥利亚罗非鱼正反交 F_1 DAA 含量介于 7.23%~7.80%, 说明这 3 个品种罗非鱼肉质口感优于刀鲚。同时, 17 种氨基酸分析表明, Glu 含量最高, Cys 含量最低, 这与其他硬骨鱼如兰州鲇(*Silurus lanzhouensis*)^[18]、刀鲚^[10]、翘嘴红鲌^[14]和湘华鲮(*Sinilabeo decorus tungting*)^[19]等肌肉氨基酸含量高低顺序基本一致, 说明硬骨鱼类在进化过程中肌肉水解氨基酸的种类具有较大的保守性。Glu 不仅是重要的鲜味氨基酸之一, 而且参与脑组织生化代谢与多种生物活性物质合成^[17]。不同品种或品系的罗非鱼, 肌肉 Glu 含量存在较大差异。郝淑贤等^[20]研究发现,

5 种罗非鱼中, 红罗非鱼(*O. niloticus* × *O. mossamoicus*) 的 Glu 含量为 2.58>尼罗罗非鱼的 2.41>奥利亚罗非鱼的 2.38>吉富罗非鱼的 2.33>奥尼罗非鱼的 2.11。本实验中的亲本为优化选育 6 代的吉富罗非鱼和‘夏奥 1 号’奥利亚罗非鱼, 其亲本品质与遗传特性的差异可能影响了 F_1 肌肉氨基酸组成。吉富罗非鱼自交 F_1 、奥吉和吉奥罗非鱼肌肉 Glu 含量分别为 3.07、3.41 和 3.07, 显著高于野生刀鲚的 2.66^[10]; 翘嘴红鲌的 2.04~2.625^[14]; 半滑舌鲷的 1.17~1.26 以及奥利亚罗非鱼自交 F_1 的 2.84。由肌肉氨基酸组成、EAA、DAA 和 TAA 含量, 我们可以推测出父本吉富罗非鱼对子代肉质改良有一定作用, 杂交可以改良奥利亚罗非鱼肌肉品质。

由表 7 中可以看出, 4 个交配组合 F_1 的 EAA/TAA 比值介于 0.406~0.415, 这与李世杰等^[21]报道的吉富罗非鱼 EAA/TAA 比值 0.424 和奥尼罗非鱼的比值 0.433 较为接近, 比值均高于普通蛋白质的 0.4 正常比值^[18]。氨基酸平衡效果较优, 属于优质的人体所需的蛋白质, 人体氨基酸含量与平衡对维持防御和神经肌肉功能方面特别重要。然而, 本实验所检测 4 个组合 F_1 的肌肉氨基酸含量基本高于郝淑贤等^[20]对部分罗非鱼肌肉的检测结果。罗非鱼肌肉氨基酸组成可能与养殖品种、饲养条件以及饲料营养组成有较大关系^[5]。

3.4 吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼自交与正反交后代肌肉脂肪酸组成的比较

脂肪酸是加热产生香气成分的不可缺少的物质, 尤其是高含量的 PUFA 能显著地增加香味, 同时可以在一定程度上反映肌肉的多汁性^[15]。同一群体肌肉脂肪酸组成与饵料中脂肪源、季节、水温、水体理化因子、光照等密切相关。然而, 不同群体的鱼类, 遗传与环境因子对肌肉的品质参数有显著影响^[22]。本研究中, 4 个交配组合 F_1 的 n-3 系列 PUFA 之间无显著差异, 然而吉富罗非鱼自交 F_1 在 SFA、MUFA 和 PUFA 以及 n-6 系列 PUFA 含量均显著高于吉富罗非鱼奥利亚罗非鱼正反交和奥利亚自交 F_1 , 这可能与吉富罗非鱼的遗传特性以及其对饲料中植物油消化吸收能力较强有关。人工配合饲料中添加的植物油含有相对

丰富的亚油酸(C18:2n-6)^[23]。奥利亚罗非鱼自交F₁的SFA、MUFA和PUFA含量最低,然而与吉富罗非鱼杂交后,杂交F₁的肉质得到改良,SFA、MUFA和PUFA含量均有所提高,但都没有超过吉富罗非鱼自交F₁。因此,我们下一步的研究方向将着重于吉富罗非鱼父本对子代脂肪酸遗传特性的影响。

FAS、LPL、HSL和G6PD是脂肪合成与代谢途径的关键酶。FAS和G6PD在动物体脂生成、沉积中发挥着重要作用^[24-25]。本研究中发现肌肉脂肪含量较高的F₁组中,肌肉FAS和G6PD mRNA水平相对较低,相关性分析表明,肌肉脂肪含量与FAS和G6PD mRNA水平均呈负相关,相关系数分别为 $R^2=0.7615(P<0.01)$ 和 $0.5387(P<0.05)$ 。相对较高的肌肉脂肪含量可能会抑制FAS和G6PD酶的活性,降低表达丰度,体内不需要合成大量的脂肪酸来参与肌肉脂肪的合成与沉积^[5]。LPL和HSL作为调控脂肪代谢的关键酶,肌肉脂肪含量相对较高组LPL和HSL mRNA水平相对较高,与肌肉脂肪含量呈正相关,相关系数分别为 $R^2=0.7825(P<0.01)$ 和 $0.5624(P<0.05)$,较高的LPL和HSL mRNA水平有助于从头合成甘油三酯提供脂肪储备或氧化分解为肌肉活动提供能量。

参考文献:

- [1] Fuentes A, Fernández-Segovia I, Escriche I, et al. Comparison of physico-chemical parameters and composition of mussels (*Mytilus galloprovincialis* Lmk.) from different Spanish origins[J]. Food Chem, 2009, 112: 295-302
- [2] Fuentes A, Fernández-Segovia S, Serra J A, et al. Comparison of wild and cultured sea bass (*Dicentrarchus labrax*) quality[J]. Food Chem, 2010, 119: 1514-1518.
- [3] Glover K A, Otterå H, Olsen R E, et al. A comparison of farmed, wild and hybrid Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) reared under farming conditions[J]. Aquaculture, 2009, 286: 203-210.
- [4] Hu Y, Chen Z J. Exploring relations of unsaturated fatty acid and human health[J]. Meat Research, 2011, 143: 17-20.[胡燕, 陈忠杰. 不饱和脂肪酸与人体健康关系探讨[J]. 肉类研究, 2011, 143: 17-20.]
- [5] Børrensen T. Quality aspects of wild and reared fish[M]// Huss H H, Jacobsen M, Liston J. Quality assurance in the food industry. Amsterdam: Elsevier, 1992: 1-17.
- [6] Tian J, Wen H, Zeng L B, et al. Changes in the activities and mRNA expression levels of lipoprotein lipase (LPL), hormone-sensitive lipase (HSL) and fatty acid synthetase (FAS) of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) during fasting and re-feeding[J]. Aquaculture, 2013, 400-401: 29-35.
- [7] Qiang J, He J, Yang H, et al. Temperature modulates hepatic carbohydrate metabolic enzyme activity and gene expression in juvenile GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed a carbohydrate-enriched diet[J]. J Therm Biol, 2014, 40: 25-31.
- [8] Suburu J, Gua Z N, Chen H Q, et al. Fatty acid metabolism: Implications for diet, genetic variation, and disease[J]. Food Biosci, 2013(4): 1-12.
- [9] Pellett P L, Young V R. Nutritional Evaluation of Protein in Foods[M]. Tokyo: The United National University Press, 1980: 26-29.
- [10] Tang X, Xu G C, Xu P, et al. A comparison of muscle nutrition composition between wild and cultured *Coilia nasus*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2011, 23(3): 514-520.[唐雪, 徐钢春, 徐跑, 等. 野生与养殖刀鲚肌肉营养成分的比较分析[J]. 动物营养学报, 2011, 23(3): 514-520.]
- [11] Qiang J, Yang H, Wang H, et al. Studies on blood biochemical indices and expression of hepatic HSP70 mRNA of different tilapia strains artificially challenged with *Streptococcus iniae*[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36: 958-967.[强俊, 杨弘, 王辉, 等. 海豚链球菌感染对不同品系罗非鱼血液生化指标和肝脏 HSP70 表达的影响[J]. 水产学报, 2012, 36: 958-967.]
- [12] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using Real-Time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C_T}$ method[J]. Methods, 2001, 25: 402-408.
- [13] Chen L, Li S F, Jian W Y, et al. Evaluation of growth performance of JA tilapia (NEW GIFT strain *O. niloticus*♀×*O. aureus*♂)[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(3): 257-262.[陈林, 李思发, 简伟业, 等. 吉奥罗非鱼(新吉富罗非鱼♀×奥利亚罗非鱼♂)生长性能的评估[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(3): 257-262.]
- [14] Yan H B, Yi J S, Xu W, et al. Nutritive composition in muscles of wild and cultural *Ergthrocultus ilishaeformis*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2003, 10(1): 82-84.[尹洪滨, 尹家胜, 徐伟, 等. 兴凯湖翘嘴红鲌肌肉营养成分分析[J]. 中国水产科学, 2003, 10(1): 82-84.]
- [15] Wang W, Chen L Q, Gu Z M, et al. Comparative study on muscle nutritional quality of six different geographical populations of *Cultus alburnus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(9): 92-99.[王伟, 陈立侨, 顾志敏, 等. 六

- 个群体翘嘴红鲌肌肉生化组成的比较[J]. 水产学报, 2007, 31(9): 92-99.]
- [16] Gunji A. Handbook of Food Additives[M]. Beijing: China Prospect Publishing House, 1988: 157-160.[郡司笃孝. 食品添加剂手册[M]. 北京: 中国展望出版社, 1988: 157-160.]
- [17] Zhang C Y, Li L, Li C F, et al. Biochemistry (Version 2) [M]. Beijing: People's Medical Publishing House Co., LTD, 1988: 305, 561.[张昌颖, 李亮, 李昌甫, 等. 生物化学(第 2 版)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1988: 305, 561.]
- [18] Yang Y H, Li W P, Gong Y S, et al. Analysis of biochemical composition and evaluation of nutritive quality in muscles of *Silurus lanzhouensis*[J]. Acta Hydrobiologia Sinica, 2009, 33(1): 54-60.[杨元昊, 李维平, 龚月生, 等. 兰州鲇肌肉生化成分分析及营养学评价[J]. 水生生物学报, 2009, 33(1): 54-60.]
- [19] Wu B L, Xiao T Y, Ge X K, et al. Evaluation of nutritional components and nutritive quality of the muscle of *Sinilabeo decorus tungting*[J]. Freshwater Fisheries, 2007, 37(6): 72-75.[吴宝林, 肖调义, 葛熹凯, 等. 湘华鲮肌肉营养成分分析与品质评价[J]. 淡水渔业, 2007, 37(6): 72-75.]
- [20] Hao S X, Li L H, Yang X Q, et al. Analysis and evaluation of nutrient composition of tilapias[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2007, 29(6): 614-618.[郝淑贤, 李来好, 杨贤庆, 等. 5 种罗非鱼营养成分分析及评价[J]. 营养学报, 2007, 29(6): 614-618.]
- [21] Li S J, Li R W, Song W D, et al. Studies of Nutritional Components of two strain tilapia[J]. Ocean and Fishery, 2008(10): 7-9.[李世杰, 李瑞伟, 宋文东, 等. 两种罗非鱼的营养成分研究[J]. 海洋与渔业, 2008(10): 7-9.]
- [22] Nguyen N H, Ponzoni R W, Yee H Y, et al. Quantitative genetic basis of fatty acid composition in the GIFT strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) selected for high growth [J]. Aquaculture, 2010, 309(1-4): 66-74.
- [23] Orban E, Di Lena G, Nevigato T, et al. Quality characteristics of sea bass intensively reared and from lagoon as affected by growth conditions and the aquatic environment[J]. J Food Sci, 2002, 67: 542-546.
- [24] Leng X J, Wu X F, Tian J, et al. Molecular cloning of fatty acid synthase from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) and the regulation of its expression by dietary fat level[J]. Aquac Nutr, 2012, 18: 551-558.
- [25] Preiss-Landl K, Zimmermann R, Hämmerle G, et al. Lipoprotein lipase: the regulation of tissue specific expression and its role in lipid and energy metabolism[J]. Curr Opin Lipidol, 2002, 13: 471-481.

Comparative study of the growth and nutrient composition of muscle tissue of two species of tilapia and their reciprocal hybrids

QIANG Jun¹, YANG Hong^{1,2}, XU Pao^{1,2}, HE Jie¹, MA Xinyu², ZHU Zhixiang¹, LI Ruiwei³

1. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;

2. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;

3. Maonan Sango Tilapia Breeding Base, Maoming 525024, China

Abstract: Using a complete diallel mating system, growth and nutrient composition of muscle tissue, expression of lipid metabolism enzyme genes, and the relationship between crude lipid content and mRNA levels of a lipid metabolism enzyme were compared between two species of tilapia, *Oreochromis niloticus* (the GIFT strain of Nile tilapia) and *O. aureus*. At the end of an experimental period of 100 days, the specific growth rate of pure-bred progeny of GIFT tilapia was significantly higher than that of the two hybrids and the pure-bred progeny of *O. aureus*. The feed conversion rate, hepatosomatic index, and viscerosomatic index of pure-bred progeny of *O. aureus* were significantly higher than those of experimental groups. There was no significant difference in the moisture, ash, or crude protein content. Crude lipid content of pure-bred GIFT tilapia progeny was significantly higher than that of other groups. Total amino acids, essential amino acids, and dispensable amino acids of pure-bred *O. aureus* progeny were significantly lower than other groups. The rate of essential amino acid formation in four F₁ generations was consistent with FAO/WHO standards. Saturated, single unsaturated, polyunsaturated, and n-6 polyunsaturated fatty acids of pure-bred GIFT tilapia progeny were significantly higher than those of the two hybrids and the pure-bred progeny of *O. aureus*. Correlation analysis showed a negative relationship between muscle crude lipid content and mRNA levels of FAS ($R^2=0.761\ 5$; $P<0.01$) and *G6PD* ($R^2=0.538\ 7$; $P<0.05$). In contrast, crude lipid content was positively correlated with mRNA levels of *LPL* ($R^2=0.782\ 5$; $P<0.01$) and *HSL* ($R^2=0.562\ 4$, $P<0.05$). Overall, the results indicated that the growth and nutritional composition of muscle of pure-bred *O. aureus* progeny were significantly lower than of GIFT tilapia or hybrids. Thus, hybridization may increase growth performance of offspring and improve meat quality, as well as enhancing the effect of selective breeding. Although there were no significant differences in mRNA levels of *LPL* and *G6PD* between the two hybrids of GIFT tilapia, higher muscle crude lipid content may amplify mRNA levels of *LPL* and *HSL*.

Key words: tilapia; nutritional composition of muscle; amino acids; fatty acids; lipid metabolism enzyme

Corresponding author: YANG Hong, E-mail: yangh@ffrc.cn; XU Pao, E-mail: xup@ffrc.cn