

文章编号: 1000-0615(2019)04-1092-12

DOI: 10.11964/jfc.20180411239

## 饲料中添加竹炭对红罗非鱼幼鱼肌肉脂肪酸组分及脂代谢相关基因表达的影响

唐丹<sup>1</sup>, 苏胜彦<sup>2</sup>, 朱文彬<sup>2</sup>, 王兰梅<sup>2</sup>, 宋飞彪<sup>1</sup>,  
董娟娟<sup>1</sup>, 张丹<sup>1</sup>, 董在杰<sup>1,2\*</sup>

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心,

农业农村部淡水渔业与种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081)

**摘要:** 为研究饲料中添加竹炭对红罗非鱼幼鱼肌肉营养成分及脂代谢相关基因表达量的影响, 实验选取平均体质量为(7.07±0.01) g的健康红罗非鱼幼鱼, 随机分为5组, 进行网箱养殖实验, 每组3个重复, 饲养60 d。饲料中竹炭添加量依次为0%、0.5%、1%、2%、4%。结果显示, 0.5%、1%竹炭组的血清谷丙转氨酶(ALT)活性比对照组显著降低; 碱性磷酸酶(ALP)和血清总蛋白(TP)活性在1%组显著升高; 谷草转氨酶(AST)、甘油三酯(TG)和血清总胆固醇(TC)实验组比对照组显著降低; 高密度脂蛋白(HDL)随着竹炭浓度的增加显著升高。1%竹炭组肌肉水分含量显著低于对照组; 肌肉粗蛋白含量1%、2%和4%处理组显著低于对照组; 与对照组相比, 1%与4%的组中粗脂肪和肌肉灰分含量显著增加。饲料添加竹炭能提高鱼体肌肉中总不饱和脂肪酸(UFA)含量, 但只有4%组的总不饱和脂肪酸(LPL)基因和苹果酸脱氢酶(MDH)基因表达量与对照组相比均有所升高, 但是只有1%组的MDH基因与对照组相比有显著性差异。研究表明, 饲料添加适当浓度的竹炭能提高鱼肉中粗脂肪、总不饱和脂肪酸(UFA)含量, 以及LPL基因和MDH基因的表达, 这将为提高红罗非鱼肉质提供新的途径。

**关键词:** 红罗非鱼; 竹炭; 肌肉; 脂肪酸组分; 脂代谢基因

**中图分类号:** S 963.73

**文献标志码:** A

我国竹类资源丰富, 生长快、繁殖能力强, 经高温炭化可以得到竹炭。近年来, 竹炭在医药<sup>[1]</sup>、净化污水<sup>[2]</sup>、纤维制品<sup>[3]</sup>、食品行业<sup>[4]</sup>和 高分子材料<sup>[5]</sup>等领域得到很大的发展和应用, 体现出巨大的发展空间。而竹炭作为饲料工业中使用较为普遍的添加吸附剂<sup>[6]</sup>研究较少, 主要在尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)<sup>[7-8]</sup>、低眼巨鲶(*Pangasius hypophthalmus*)<sup>[9]</sup>、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)<sup>[10]</sup>、大鼠(*Rattus norvegicus*)<sup>[11]</sup>、火鸡(*Meleagris gallopavo*)<sup>[12]</sup>、鸭(*Anatinae*)<sup>[13]</sup>以及山羊(*Capra aegagrus hircus*)<sup>[14]</sup>等相关动物上进行。关

于竹炭在饲料中的添加效果, 有研究表明随着饲料中活性炭含量的增加, 尼罗罗非鱼肌肉中蛋白水平增加<sup>[8]</sup>; 饲料中添加2%的竹炭能够显著提高低眼巨鲶的特定生长率并且减少氨氮的排放<sup>[9]</sup>。在牙鲆的有关研究中验证了上述功能, 饲料中添加竹炭能够显著提高牙鲆的特定生长率、饲料转化率和蛋白质功效比值等<sup>[10]</sup>。

红罗非鱼(*O. mossambicus* × *O. niloticus*)属于鲈形目(Perciformes), 鲈亚目(Percoidae), 丽鱼科(Cichlidae), 罗非鱼属(*Oreochromis*), 是由尼罗罗非鱼与体色变异的莫桑比克罗非鱼杂交, 经多

收稿日期: 2018-04-10 修回日期: 2018-07-17

资助项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2017HY-XKQ02-3); 江苏省自然科学基金—青年基金(BK20160203)

通信作者: 董在杰, E-mail: dongzj@ffrc.cn

代选育而成的优良品种<sup>[15-16]</sup>。红罗非鱼的味道鲜美、无肌间刺,体色纯红,颇受食客们的喜爱,市场前景广阔。尽管饲料中添加竹炭对尼罗罗非鱼肌肉蛋白水平有明显影响,但是对红罗非鱼的影响未见报道。本实验在饲料中添加竹炭来提高红罗非鱼的肉质、口感,拟提高其市场价值、延伸其产业链。

动物体内的物质调控受基因表达量的影响,这是体内物质变化的根本原因。脂蛋白脂肪酶(lipoprotein lipase, LPL)是脂肪代谢的关键酶,其在不同组织器官中的表达水平,直接影响这些器官对脂质的需求量,间接决定摄入脂质的代谢途径,从而影响整个机体的脂质蓄积情况<sup>[17-18]</sup>。LPL的表达具有组织特异性,与机体的脂质代谢密切相关<sup>[19]</sup>。苹果酸脱氢酶(malate dehydrogenase, MDH)在动物体内催化苹果酸转变为丙酮酸,并产生NADPH (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate),而NADPH是动物体内脂肪合成的重要辅酶,因此MDH基因在脂肪合成中起到非常重要的作用<sup>[20]</sup>。目前LPL和MDH基因表达对猪肉脂肪沉积的影响已有报道,但在红罗非鱼中尚未报道。通过基因与肌肉成分、脂肪酸变化相结合,可以更好地了解竹炭作用的机理。

本实验以红罗非鱼幼鱼为对象,研究在饲料中添加不同含量的竹炭对其血清生化指标、肌肉营养成分、脂肪酸含量以及脂肪酸相关基因表达的影响,深层次探讨饲料中添加竹炭在红罗非鱼养殖中的潜在价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验对象

红罗非鱼幼鱼取自中国水产科学研究院淡水渔业研究中心宜兴基地。

实验前驯化1周。选用规格均等的红罗非鱼幼鱼,分为5组,每组3个重复,每个网箱20尾,平均体质量(7.07±0.01)g/尾。幼鱼养殖在中国水产科学研究院淡水渔业研究中心池塘网箱中,按组喂食不同浓度竹炭饲料,每天喂食4次(08:00、11:00、14:00和17:00),按鱼体质量的5%喂食,实验周期60 d。每天用水银玻璃温度计测量3次水温(08:00、11:00和17:00),整个实验周期温度

范围为18~28℃。2周测量1次鱼体质量,以调整喂食量。

### 1.2 实验饲料

根据红罗非鱼幼鱼的营养需要设计5组饲料,基础饲料中不添加竹炭组为对照组,实验组将质量分数分别为0.5%、1%、2%和4%的竹炭添加到饲料中。竹炭粉(水分6.39%、灰分4.19%、固定碳89.32%,密度0.521 g/cm<sup>3</sup>, pH 7.56,比表面积265 m<sup>2</sup>/g)从宁波兴达煤炭工业有限公司购买。饲料原料购自通威饲料集团有限公司无锡分公司,多维、多矿由无锡华诺威动物保健品有限公司提供。所有原料粉碎后过60目筛,按比例称量,加14%的水,饲料为机械混合,制好后风干,保存在-20℃备用。饲料配方及组成见表1。

### 1.3 样本采集

采样前24 h停止投喂,从网箱中随机取3条鱼,立即放入含有0.1 mg/L丁香油的水桶中,麻醉后取样。用肝素钠抗凝剂润洗过的一次性注射器尾静脉采血1 mL,放入抗凝管中,在4℃、7 500 r/min条件下离心4 min,小心收集上层血清并移入新离心管中-20℃保存。去鳞去皮后取背部肌肉分装在小自封袋中,-80℃保存。取-80℃冰箱中保存的肌肉,在冷冻干燥机中冻干,研磨成粉待测。

### 1.4 测定方法

**血清酶活性** 将血清送至无锡市第四人民医院检测,检测的血清生化指标包括谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、乳酸脱氢酶(LDH)、血糖(GLU)、碱性磷酸酶(ALP)、谷氨酰转氨酶(GGT)、总蛋白(TP)、总胆固醇(TC)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL)、甘油三酯(TG),共10项指标。

**常规成分的测定** 依照国标方法测定饲料常规营养成分。水分:用常压干燥法测定,依照GB6435-86;灰分:用马弗炉灼烧法测定,依照GB/T6438-2007;粗蛋白:用凯氏定氮法测定,依照GB/T6432-94;粗脂肪:用索氏抽提法测定,依照GB/T6433-2006<sup>[21]</sup>。脂肪酸含量的测定使用气相色谱仪(GC5890N),依照GB/T17377-2008气相色谱法测定。

**组织RNA提取** 用北京原平皓—总RNA提取试剂盒按说明书进行操作。提取出的RNA

表1 饲料配方和营养成分

项目 items	组别 groups				
	对照 control	0.5%	1%	2%	4%
<b>成分</b> <b>ingredient</b>					
鱼粉 fish meal	10	10	10	10	10
花生粕 peanut meal	3	3	3	3	3
豆粕 soybean meal	20	20	20	20	20
菜粕 rape seed meal	15	15	15	15	15
棉粕 cotton seed meal	12	12	12	12	12
小麦淀粉 wheat gluten	16	16	16	16	16
米糠 rice bran	7	7	7	7	7
豆油 soybean oil	6	6	6	6	6
磷脂粉 phospholipid	2	2	2	2	2
多维、多矿* multidimensional ore *	1	1	1	1	1
沸石粉 zeolite powder	1	1	1	1	1
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	5.5	5	4.5	3.5	1.5
磷酸二氢钙 calcium dihydrogen phosphate	1	1	1	1	1
维生素C vitamin C	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
竹炭 bamboo charcoal	0	0.5	1	2	4
<b>近似组分</b> <b>proximate composition</b>					
水分 moisture	4.193	4.070	3.615	4.710	5.987
粗蛋白 crude protein	35.370	35.570	34.237	34.211	34.601
粗脂肪 crude fat	8.637	8.090	8.147	8.114	7.565
灰分 ash	8.278	6.802	7.624	7.209	7.305

注: \*. 维生素预混料(IU或mg/kg)和矿物质预混料(g/kg预混料), 维生素A 900 000 IU; 维生素D 250 000 IU; 维生素C 10 000 mg; 维生素E 4 500 mg; 维生素K<sub>3</sub> 220 mg; 维生素B<sub>1</sub> 320 mg; 维生素B<sub>2</sub> 1 090 mg; 维生素B<sub>6</sub> 5 000 mg; 维生素B<sub>12</sub> 116 mg; 生物素 50 mg; 泛酸盐 1 000 mg; 叶酸 165 mg; 胆碱 60 000 mg; 肌醇 15 000 mg; 维生素B<sub>3</sub> 2 500 mg; CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 2.5 g; FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 28 g; ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 22 g; MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 9 g; Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 0.045 g; KI 0.026 g; CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.1 g

Notes: \*. vitamin premix (IU or mg/kg) and mineral premix (g/kg premix), vitamin A 900 000 IU; vitamin D 250 000 IU; vitamin C 10 000 mg; vitamin E 4 500 mg; vitamin K<sub>3</sub> 220 mg; vitamin B<sub>1</sub> 320 mg; vitamin B<sub>2</sub> 1 090 mg; vitamin B<sub>6</sub> 5 000 mg; vitamin B<sub>12</sub> 116 mg; biotin 50 mg; pantothenate 1 000 mg; folic acid 165 mg; choline 60 000 mg; inositol 150 00 mg; vitamin B<sub>3</sub> 2 500 mg; CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 2.5 g; FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 28 g; ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 22 g; MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 9 g; Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 0.045 g; KI 0.026 g; CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.1 g

使用超微量分光光度计(ND2000)测量OD值, 定量RNA浓度, 并取2 μL电泳检测, 其余RNA放入-80 °C冰箱保存备用。

**cDNA合成** cDNA第一链的合成严格按照PrimeScript™ RT Master Mix反转录试剂盒的说明书进行操作, 所有的反转录操作均需要在冰上进行。使用PrimeScript™ RT Master Mix进行cDNA合成的反应体系: 5×PrimeScript® RT Master Mix (for Real Time) 2 μL, Template RNA 3 μL, 补充RNase Free H<sub>2</sub>O至10 μL。反应条件: 37 °C 15 min, 85 °C 5 min, 最后4 °C保存。反应产物置保存于-20 °C备用。

**引物设计** 实验所用引物参照韩春艳等<sup>[22]</sup>, 内参基因β-actin作为对照。引物均由生工生物工程(上海)股份有限公司合成, 引物信息见表2。

**实时荧光定量PCR** 从保存在-20 °C冰箱中的样品cDNA提取液中抽取一定的cDNA溶液, 加入适量的RNase Free H<sub>2</sub>O稀释至150 ng/μL, 使全部样品cDNA浓度一致。以此cDNA第一链为模板, 用TaKaRa公司生产的SYBR® Premix Ex Taq™ II试剂盒进行荧光定量分析, 总反应体系为20 μL, 其中模板cDNA第一链2 μL, 2×SYBR® Premix Ex Taq™ 10 μL, 上、下游引物各1 μL, ROX Reference Dye II, ddH<sub>2</sub>O 6 μL。MDH基因的反应程序为95 °C预变性30 s; 然后95 °C变性5 s, 61 °C退火30 s, 72 °C延伸30 s, 40个循环。对所有样本重复测定3次, 并对每组实验设阴性对照; LPL基因的反应程序为95 °C预变性30 s; 然后95 °C变性5 s, 59 °C退火30 s, 72 °C延伸30 s, 40个循环。所有样本重复测定3次, 并对每组实验设阴性对照。

## 1.5 数据处理

用2<sup>-ΔΔC<sub>t</sub></sup>法测定目的基因mRNA的相对表达水平, 以β-actin基因为内标进行标准化。实验数据用SPSS 17.0软件进行分析, 采用ANOVA进行方差分析, 若组间差异显著, 则用Duncan氏比较, 结果以“mean±SE”表示, 差异显著性均以P<0.05为准。所有图表采用Excel 2007制作。

## 2 结果

### 2.1 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼血清生化指标的影响

竹炭对血清中的酶活性具有显著性影响,

表2 3对引物的基本信息

Tab. 2 The basic information table of the three pairs of primers

基因 gene		引物序列(5'-3') primers sequences	PCR产物长度/bp PCR product length
LPL	LPL-F	AGAGCACACTGTCCCGAGGCGAT	240
	LPL-R	AAGGTGCCTCCGTTGGGGTAAAT	
MDH	MDH-F	ATGTCCACCACGCTAAGGTC	179
	MDH-R	GTGGTCACAGATGGCCTTGG	
$\beta$ -actin	$\beta$ -actin-F	GTACCACCATGTACCCTGGC	224
	$\beta$ -actin-R	TGAAGTTGTTGGGCGTTTGG	

本实验中0.5%、1%浓度组的ALT活性比对照组显著降低( $P<0.05$ )。实验组的AST活性比对照组显著降低( $P<0.05$ )。1%组的ALP活性比对照组显著升高( $P<0.05$ )。TP各组之间均有显著性差异( $P<0.05$ )，在竹炭浓度1%时最高，浓度0.5%时最低。TG和TC实验组比对照组显著降低( $P<0.05$ )。HDL随着竹炭浓度的增加显著升高( $P<0.05$ )。1%组的GLU与对照组没有显著性差异( $P>0.05$ )，其他实验组均显著高于对照组( $P<0.05$ )，0.5%组的GLU最高(表3)。

## 2.2 不同竹炭添加量对肌肉常规营养成分的影响

饲料中添加竹炭后，实验组肌肉水分均有所降低，但只有1%的竹炭处理组显著低于对照组( $P<0.05$ )；与对照组相比，1%、2%和4%竹炭处理组粗蛋白含量显著降低( $P<0.05$ )，1%和4%组与0.5%组相比有显著性差异( $P<0.05$ )；粗脂肪含

量与对照组相比均有所上升，且1%和4%组与对照组以及0.5%和2%组相比显著性上升( $P<0.05$ )；肌肉中灰分含量处理组与对照组相比显著上升( $P<0.05$ )(表4)。

## 2.3 不同竹炭添加量对脂肪酸组分的影响

肌肉总饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFA)的含量随着竹炭添加量的增加而呈现逐渐下降的趋势，只有4%的竹炭处理组与对照组相比有显著性差异( $P<0.05$ )；各处理组与对照组之间的总单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acids, MUFA)无显著性差异( $P>0.05$ )，但1%和4%竹炭处理组的C22:1与对照组相比显著上升( $P<0.05$ )；实验组与对照组的总多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)无显著性差异( $P>0.05$ )，但4%竹炭处理组的C18:2和C18:3n3与对照组相

表3 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼血清生化指标的影响

Tab. 3 Effect of different dietary bamboo charcoal levels on the serum biochemical parameters of juvenile *O. mossambicus* × *O. niloticus*

血清指标 serum index	组别 groups				
	对照 control	0.5%	1%	2%	4%
ALT/(U/L)	28.667±0.333 <sup>a</sup>	13.333±0.667 <sup>b</sup>	15.667±1.202 <sup>b</sup>	27.333±4.177 <sup>a</sup>	29.000±0.577 <sup>a</sup>
AST/(U/L)	350.667±0.882 <sup>a</sup>	226.000±1.528 <sup>b</sup>	116.000±1.155 <sup>d</sup>	164.667±3.756 <sup>c</sup>	102.667±0.882 <sup>c</sup>
ALP/(U/L)	4.000±0 <sup>b</sup>	4.000±0 <sup>b</sup>	5.667±0.333 <sup>a</sup>	2.333±0.333 <sup>c</sup>	1.000±0 <sup>d</sup>
TP/(g/L)	35.333±0.120 <sup>b</sup>	32.067±0.067 <sup>c</sup>	35.800±0.208 <sup>a</sup>	33.867±0.033 <sup>c</sup>	32.833±0.088 <sup>d</sup>
TG/(g/L)	11.933±0.027 <sup>a</sup>	7.000±0.006 <sup>b</sup>	7.043±0.019 <sup>b</sup>	6.150±0.021 <sup>c</sup>	6.453±0.347 <sup>c</sup>
TC/(g/L)	6.280±0.010 <sup>a</sup>	5.400±0.026 <sup>d</sup>	5.950±0.045 <sup>b</sup>	4.887±0.043 <sup>c</sup>	5.540±0.025 <sup>c</sup>
HDL/(mmol/L)	1.140±0.090 <sup>d</sup>	1.403±0.012 <sup>c</sup>	2.337±0.019 <sup>b</sup>	2.277±0.015 <sup>b</sup>	2.713±0.015 <sup>a</sup>
GLU/(mmol/L)	6.220±0.020 <sup>d</sup>	11.130±0.049 <sup>a</sup>	6.253±0.027 <sup>d</sup>	9.593±0.087 <sup>b</sup>	8.160±0.067 <sup>c</sup>

注：同一行肩标不同小写字母代表有显著差异( $P<0.05$ )，下同

Notes: in the same column, values with different small superscript letters means significant differences ( $P<0.05$ ), the same below



表4 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼肌肉营养成分的影响

Tab. 4 Effect of different dietary bamboo charcoal levels on the muscle nutritional components of juvenile *O. mossambicus* × *O. niloticus*

成分 composition	组别 groups					%
	对照 control	0.5%	1%	2%	4%	
水分 moisture	77.69±0.14 <sup>a</sup>	77.00±0.48 <sup>ab</sup>	76.53±0.12 <sup>b</sup>	77.07±0.11 <sup>ab</sup>	76.93±0.33 <sup>ab</sup>	
粗蛋白 crude protein	17.60±0.12 <sup>a</sup>	17.40±0.31 <sup>ab</sup>	16.68±0.17 <sup>c</sup>	17.05±0.10 <sup>bc</sup>	16.88±0.18 <sup>c</sup>	
粗脂肪 crude fat	1.06±0.02 <sup>b</sup>	1.23±0.14 <sup>b</sup>	1.97±0.12 <sup>a</sup>	1.32±0.07 <sup>b</sup>	1.89±0.13 <sup>a</sup>	
灰分 ash	0.89±0.02 <sup>c</sup>	1.05±0.07 <sup>b</sup>	1.13±0.03 <sup>ab</sup>	1.14±0.01 <sup>ab</sup>	1.19±0.04 <sup>a</sup>	

比显著上升( $P<0.05$ ), 1%竹炭处理组的C22:6与对照组相比显著降低( $P<0.05$ ); 与对照组相比, 各处理组的总不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acids, UFA)含量均有所上升, 但只有4%竹炭处理组的总不饱和脂肪酸含量显著上升( $P<0.05$ )(表5)。

#### 2.4 不同竹炭添加量对脂代谢相关基因表达的影响

随着饲料中竹炭添加量的增加, *LPL*基因的表达量较对照组均有所升高, 但无显著性差异( $P>0.05$ )(图1)。*MDH*基因的表达量随着竹炭比例的增加呈现先升高后下降的趋势, 各组表达量较对照组均有所升高, 但是只有1%的竹炭处理组与对照组相比显著增加( $P<0.05$ ), 其他各处理组与对照组相比均无显著性差异( $P>0.05$ )(图2)。

### 3 讨论

#### 3.1 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼血清生化指标的影响

血液变化与鱼类代谢、生理状况、健康水平均相关<sup>[20]</sup>。当发生病害或生理刺激时, 若肝脏和心肌细胞受损, AST和ALT释放到血液中将增加血清中酶活性。闫九明等<sup>[11]</sup>研究表明, 喂食添加低浓度竹炭(2.81、5.62、11.24 g/kg)的高脂饲料能够显著降低实验组大鼠的ALT活性, 蒋竹英等<sup>[23]</sup>用添加2%竹炭的基础饲料饲喂断奶仔猪, 对其血清ALT活性没有显著影响。本实验中饲料添加竹炭对血清酶活性有显著性影响, ALT在竹炭浓度为0.5%、1%时比对照组显著降低( $P<0.05$ ), 2%和4%时没有显著性差异, 与闫九明等<sup>[11]</sup>和蒋竹英等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。各组的AST活性都有显著差异( $P<0.05$ ), 并且实验组相对于对照组显

著降低( $P<0.05$ )。说明饲料中添加低浓度竹炭可能对红罗非鱼幼鱼的肝脏有一定程度的保护功能。碱性磷酸酶直接参与磷酸基团的转化, 对维持内环境的平衡有很大的作用<sup>[24]</sup>。本实验中添加0.5%竹炭组对ALP活性没有影响, 而1%组ALP活性显著升高, 随着竹炭浓度的增加, ALP活性显著降低且低于对照组, 这与蒋竹英等<sup>[23]</sup>研究中1%组ALP活性高于2%组的结果相似, 推测竹炭对ALP活性的影响与浓度有关。

血清中总蛋白、甘油三酯、总胆固醇在机体的整体健康和免疫方面发挥着巨大作用<sup>[25]</sup>。总蛋白有助于提升机体的免疫水平<sup>[26]</sup>, 硬骨鱼类血清中TP的含量为30~50 g/L<sup>[27]</sup>。本实验中TP含量虽然差异显著但差值都在正常范围内, 结合Boonanuntasarn等<sup>[8]</sup>研究中增加饲料活性炭的比例, 尼罗罗非鱼血清总蛋白2%和3%组第2周降低, 第4周近似相等的结果, 推测竹炭对总蛋白的影响可能与作用时间有关。不同研究中炭粉浓度作用存在差异, 可能是由于炭粉来源和成分, 以及养殖条件和鱼种的差异造成的<sup>[28]</sup>。甘油三酯是体内含量最多的脂类, 竹炭添加组中甘油三酯都显著低于对照组。这与闫九明等<sup>[11]</sup>喂食大鼠竹炭后其血清甘油三酯显著降低一致, 说明竹炭能促进脂肪的吸收转化。高密度脂蛋白将胆固醇从外周细胞逆转运到肝脏, 对抗动脉粥样硬化有着重要作用<sup>[29]</sup>。本实验中竹炭添加组的HDL活性显著高于对照组, 说明竹炭对抗动脉硬化有益处。鱼类正常血糖为2.78~12.72 mmol/L。波动范围内血糖升高说明鱼体消化吸收能力增强<sup>[30]</sup>, 本实验血糖数据都在该范围内, 且实验组血糖含量均较对照组高, 说明竹炭对鱼体消化吸收有积极作用。

表 5 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼肌肉脂肪酸组分的影响

Tab. 5 Effect of different dietary bamboo charcoal levels on the muscle fatty acid profile of juvenile *O. mossambicus* × *O. niloticus*

脂肪酸 fatty acid	组别 groups					%
	对照 control	0.50%	1%	2%	4%	
C12 : 0	0.048±0.008 <sup>a</sup>	0.032±0.005 <sup>abc</sup>	0.039±0.007 <sup>ab</sup>	0.021±0.002 <sup>c</sup>	0.023±0.001 <sup>bc</sup>	
C14 : 0	1.375±0.063 <sup>ab</sup>	1.465±0.095 <sup>ab</sup>	1.553±0.021 <sup>a</sup>	1.343±0.080 <sup>ab</sup>	1.334±0.015 <sup>b</sup>	
C15 : 0	0.131±0.003	0.136±0.012	0.137±0.004	0.133±0.005	0.139±0.002	
C16 : 0	19.447±0.359 <sup>a</sup>	18.881±0.168 <sup>ab</sup>	19.327±0.464 <sup>a</sup>	18.327±0.184 <sup>ab</sup>	18.301±0.170 <sup>b</sup>	
C17 : 0	0.247±0.006	0.260±0.032	0.258±0.013	0.265±0.017	0.264±0.004	
C18 : 0	6.561±0.194 <sup>a</sup>	6.283±0.180 <sup>ab</sup>	6.334±0.090 <sup>ab</sup>	6.447±0.130 <sup>ab</sup>	6.061±0.067 <sup>b</sup>	
C20 : 0	0.207±0.001 <sup>bc</sup>	0.201±0.003 <sup>c</sup>	0.215±0.003 <sup>b</sup>	0.215±0.006 <sup>b</sup>	0.229±0.003 <sup>a</sup>	
C22 : 0	0.117±0.002 <sup>bc</sup>	0.115±0.004 <sup>c</sup>	0.128±0.002 <sup>ab</sup>	0.119±0.005 <sup>bc</sup>	0.130±0.004 <sup>a</sup>	
SFA	28.134±0.234 <sup>a</sup>	27.373±0.165 <sup>ab</sup>	27.991±0.510 <sup>a</sup>	27.516±0.296 <sup>a</sup>	26.482±0.222 <sup>b</sup>	
C16 : 1	2.360±0.135 <sup>ab</sup>	2.410±0.132 <sup>ab</sup>	2.545±0.093 <sup>a</sup>	2.214±0.083 <sup>ab</sup>	2.141±0.061 <sup>b</sup>	
C18 : 1	26.977±0.461	27.816±1.399	29.391±0.672	27.369±0.677	28.304±0.233	
C20 : 1	1.017±0.041	1.094±0.048	1.105±0.026	1.114±0.028	1.095±0.026	
C22 : 1	0.190±0.007 <sup>c</sup>	0.196±0.006 <sup>bc</sup>	0.210±0.004 <sup>ab</sup>	0.198±0.003 <sup>bc</sup>	0.217±0.001 <sup>a</sup>	
MUFA	30.544±0.528	31.515±1.574	33.251±0.787	31.166±0.775	31.757±0.208	
C18 : 2	25.798±0.261 <sup>b</sup>	26.486±0.429 <sup>b</sup>	26.174±0.601 <sup>b</sup>	26.660±0.399 <sup>b</sup>	27.958±0.071 <sup>a</sup>	
C18 : 3n3	1.952±0.028 <sup>b</sup>	2.053±0.075 <sup>ab</sup>	2.035±0.049 <sup>ab</sup>	2.027±0.018 <sup>ab</sup>	2.170±0.008 <sup>a</sup>	
C18 : 3n6	0.844±0.033	0.841±0.051	0.875±0.036	0.843±0.005	0.829±0.044	
C20 : 2	1.182±0.051	1.212±0.056	1.099±0.042	1.270±0.070	1.224±0.040	
C20 : 3	1.235±0.092	1.253±0.186	1.103±0.044	1.178±0.068	1.200±0.015	
C20 : 4	2.025±0.166	1.820±0.331	1.582±0.119	1.847±0.096	1.648±0.095	
C20 : 5	0.205±0.013	0.197±0.030	0.172±0.008	0.199±0.013	0.192±0.012	
C22 : 3	0.988±0.075	0.930±0.151	0.797±0.066	0.888±0.040	0.820±0.040	
C22 : 4	1.936±0.157	1.703±0.311	1.359±0.108	1.749±0.078	1.588±0.075	
C22 : 5	0.749±0.031	0.703±0.104	0.595±0.036	0.722±0.046	0.647±0.017	
C22 : 6	4.408±0.253 <sup>a</sup>	3.914±0.755 <sup>ab</sup>	2.967±0.208 <sup>b</sup>	3.997±0.282 <sup>ab</sup>	3.485±0.136 <sup>ab</sup>	
PUFA	41.322±0.703	41.111±1.491	38.758±1.047	41.316±1.065	41.761±0.299	
UFA	71.866±0.234 <sup>b</sup>	72.626±0.166 <sup>ab</sup>	72.009±0.509 <sup>b</sup>	72.482±0.295 <sup>b</sup>	73.518±0.222 <sup>a</sup>	

### 3.2 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼肌肉营养成分的影响

水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分是鱼肉的基本组成成分, 各种组分含量的高低直接影响鱼肉的品质<sup>[31]</sup>。罗非鱼主要以冷冻鱼片和冻全鱼的形式出口<sup>[32]</sup>。储存时水分含量过高, 会引起霉菌

繁殖加剧, 从而导致肉质的腐败<sup>[33]</sup>。竹炭组的红罗非鱼肌肉水分含量较对照组有所下降, 1%的竹炭处理组与对照组有显著性差异( $P<0.05$ ), 这说明添加竹炭可降低肌肉水分, 延长红罗非鱼肌肉的储存时间, 利于鱼片加工。鱼肉中粗蛋白的含量对鱼肉的营养和品质有直接影响, 本

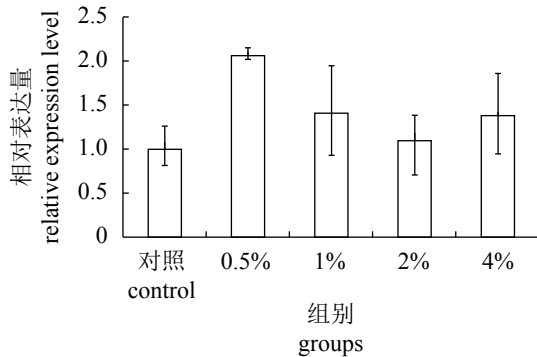


图1 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼LPL基因表达量的影响

Fig. 1 Effect of different dietary bamboo charcoal levels on the LPL gene expression of juvenile *O. mossambicus* × *O. niloticus*

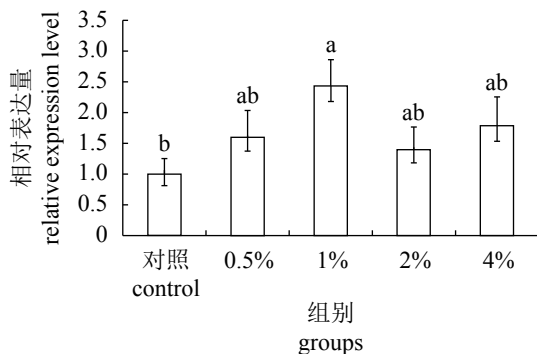


图2 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼MDH基因表达量的影响

图中不同字母表示有显著性差异( $P < 0.05$ )

Fig. 2 Effect of different dietary bamboo charcoal levels on the MDH gene expression of juvenile *O. mossambicus* × *O. niloticus*

There are significant differences without the same letters( $P < 0.05$ )

实验中1%、2%和4%竹炭组的肌肉粗蛋白含量与对照组相比均有所下降,结合Boonanuntasarn等<sup>[8]</sup>喂养雌性尼罗罗非鱼2周时,添加20 g/kg竹炭组的粗蛋白含量比对照组显著上升,4周时无显著差异的结果,推测竹炭对肌肉粗蛋白的影响可能呈阶段性,可以适当使用竹炭喂养。

脂肪是鱼类营养成分中含量差异最显著的部分<sup>[34]</sup>,其含量可以衡量鱼体脂肪积累量;粗灰分含量可以评价出鱼骨的软硬<sup>[35]</sup>。添加竹炭对粗脂肪和灰分有影响,1%和4%竹炭组的粗脂肪比对照组显著增加,各处理组的肌肉灰分均显著高于对照组。这些数据表明在红罗非鱼饲料中添加一定量的竹炭粉,可以改变罗非鱼肌肉

组分,并且不同竹炭含量对鱼体不同组分的影响也不同,这可能是竹炭的理化性质与相关组分的理化性质作用的结果,例如竹炭的吸附作用可能使合成蛋白质的元素含量下降,从而导致肌肉中蛋白含量的降低。有研究表明水产动物脂肪含量越高,其水分含量就会相应减少<sup>[34]</sup>,与本研究中粗脂肪含量升高而水分含量降低一致。

### 3.3 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼肌肉脂肪酸组分的影响

脂肪酸是脂肪的主要组成部分,是由一条长烃链和一个末端羧基组成的羧酸。根据不同脂肪酸之间双键数目、碳原子数目和位置可将脂肪酸分为SFA、MUFA和PUFA。

PUFA在鱼类的存活、生长、免疫和繁育等方面具有重要作用<sup>[36]</sup>。比较本实验中不同竹炭添加组,发现各组的脂肪酸组成成分相同,含量有所差异。4%组的饱和脂肪酸显著降低,但MUFA和PUFA没有显著差异。C18:3n-3、C20:5n-3、C22:6n-3及C18:2n-6是鱼类的必需脂肪酸(essential fatty acid, EFA),人体不能合成亚油酸,必须通过食物摄入<sup>[37]</sup>, $\alpha$ -亚麻酸的代谢产物是人体细胞膜的组成成份,是重要结构物质<sup>[38]</sup>。本研究发现,饲料中添加竹炭后鱼体亚油酸(C18:2)和亚麻酸(C18:3n-3)均有所升高,且4%组显著升高,说明添加竹炭能提高C18:2和C18:3n-3的含量,进而有助于降低胆固醇、促进新陈代谢和抑制衰老等。

SFA的含量随着竹炭添加量的增加而呈下降趋势,但只有4%组有显著性差异( $P < 0.05$ ),总不饱和脂肪酸的趋势与之相反。说明竹炭能够影响罗非鱼肌肉合成脂肪酸的比例。王晓明等<sup>[39]</sup>研究发现,肉猪用饲料中添加不同含量的复合维生素、复合微量元素能够影响猪背最长肌中饱和脂肪酸含量,其中,锌影响肝脏脂肪酸代谢相关酶的活性<sup>[40]</sup>。刘燕强等<sup>[41]</sup>研究发现,缺锌可以使大鼠血液中的饱和脂肪酸含量降低。竹炭对 $Zn^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 具有吸附能力<sup>[42]</sup>,推测处理组饱和脂肪酸含量下降的原因可能是竹炭的吸附作用导致体内吸收的 $Zn^{2+}$ 减少,从而影响饱和脂肪酸的合成。

### 3.4 不同竹炭添加量对红罗非鱼幼鱼脂代谢相关基因表达的影响

Gerfault等<sup>[43]</sup>研究表明,猪皮下组织中的LPL

基因的高表达能够显著增加其脂肪的沉积,王刚等<sup>[44]</sup>证明莱芜黑猪LPL基因的高表达对增加肌肉脂肪的含量有积极的影响。研究发现,可以通过控制猪饲料中PUFA的含量来调节猪肉中PUFA的含量,从而影响LPL基因的表达,达到调节肌肉脂肪含量的目的<sup>[20]</sup>。本实验中,添加竹炭后肌肉中PUFA含量没有显著差异,LPL基因表达也没有显著差异,符合此结论。

MDH基因是脂肪合成的重要基因<sup>[45]</sup>。实验中粗脂肪含量与对照组相比均有所上升,且1%和4%组与对照组相比显著上升( $P<0.05$ );荧光定量结果表明,实验组MDH基因表达量较对照组均升高,且1%的竹炭组与对照组相比显著增加( $P<0.05$ ),4%组仅次于1%组的表达量,这与粗脂肪含量趋势一致。王美玲等<sup>[46]</sup>发现减少肉鸡体内MDH mRNA表达量能显著降低腹脂的沉积,而高含量的多不饱和脂肪酸会抑制肌肉脂肪的沉积<sup>[47]</sup>。还有研究发现,不饱和脂肪酸C22:6 n-3(DHA)可明显降低MDH mRNA的表达,高含量的多不饱和脂肪酸能抑制动物生脂酶基因表达<sup>[45]</sup>。因此,推测多不饱和脂肪酸含量与MDH基因的表达呈负相关。结合脂肪酸含量的测定发现,竹炭能抑制C22:6的合成,促进MDH基因的表达。

#### 参考文献:

- [1] Van D T T, Mui N T, Ledin I. Effect of method of processing foliage of *Acacia mangium* and inclusion of bamboo charcoal in the diet on performance of growing goats[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2006, 130(3-4): 242-256.
- [2] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y K, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 255-257.
- [3] Yang F C, Wu K H, Huang J W, et al. Preparation and characterization of functional fabrics from bamboo charcoal/silver and titanium dioxide/silver composite powders and evaluation of their antibacterial efficacy[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2012, 32(5): 1062-1067.
- [4] Jia Z C, Zhong Y T, Yan J M, et al. Safety assessment of dietary bamboo charcoal powder: a 90-day subchronic oral toxicity and mutagenicity studies[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2015, 75: 50-57.
- [5] You Z P, Li D G. Highly filled bamboo charcoal powder reinforced ultra-high molecular weight polyethylene[J]. *Materials Letters*, 2014, 122: 121-124.
- [6] Diaz D E, Hagler W M, Hopkins B A, et al. Aflatoxin binders I: *in vitro* binding assay for aflatoxin B1 by several potential sequestering agents[J]. *Mycopathologia*, 2003, 156(3): 223-226.
- [7] Jahan N. Addition of bamboo charcoal to diets on the reduction of ammonia nitrogen excretion and growth of Nile tilapia[D]. Mymensingh: Bangladesh Agricultural University, 2013.
- [8] Boonanuntanasarn S, Khaomek P, Pitaksong T, et al. The effects of the supplementation of activated charcoal on the growth, health status and fillet composition-odor of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) before harvesting[J]. *Aquaculture International*, 2014, 22(4): 1417-1436.
- [9] Quaiyum M A, Jahan R, Jahan N, et al. Effects of bamboo charcoal added feed on reduction of ammonia and growth of *Pangasius hypophthalmus*[J]. *Journal of Aquaculture Research and Development*, 2014, 5: 6.
- [10] Thu M, Koshio S, Ishikawa M, et al. Effects of supplementation of dietary bamboo charcoal on growth performance and body composition of juvenile Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2010, 41(S2): 255-262.
- [11] 闫九明, 岳茜岚, 贾贞超, 等. 食用竹炭粉对高脂模型大鼠脂肪代谢的影响[J]. *卫生研究*, 2016, 45(4): 631-636.
- [12] Yan J M, Yue Q L, Jia Z C, et al. Effects of bamboo charcoal powder on lipid metabolism in hyperlipidaemic rats fed high fat diet[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2016, 45(4): 631-636(in Chinese).
- [13] Majewska T, Mikulski D, Siwik T. Silica grit, charcoal and hardwood ash in turkey nutrition[J]. *Journal of Elementology*, 2009, 14(3): 489-500.
- [14] Ruttanavut J, Yamauchi K, Goto H, et al. Effects of dietary bamboo charcoal powder including vinegar liquid on growth performance and histological intestinal change in Aigamo ducks[J]. *International Journal of Poultry Science*, 2009, 8(3): 229-236.
- [15] Villalba J J, Provenza F D, Banner R E. Influence of macronutrients and activated charcoal on intake of sagebrush by sheep and goats[J]. *Journal of Animal*



- Science, 2002, 80(8): 2099-2109.
- [15] 江东能. 低温胁迫对以色列红罗非鱼生理生化指标的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.  
Jiang D N. Effects of low temperature stress on physiological and biochemical parameters in Israeli red tilapia[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012(in Chinese).
- [16] 李学军, 李思发, 冯金海, 等. 以色列红罗非鱼耐盐性的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2003, 12(3): 205-208.  
Li X J, Li S F, Feng J H, *et al.* Preliminary study on salinity tolerance of Israel red tilapia[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2003, 12(3): 205-208(in Chinese).
- [17] 黄燕, 梁旭方, 王琳, 等. 中华鲟及六种淡水养殖鱼类脂蛋白脂酶和肝脂酶基因克隆及系统进化分析[J]. 动物学研究, 2010, 31(3): 239-249.  
Huang Y, Liang X F, Wang L, *et al.* Molecular characterization and evolutionary analysis of lipoprotein lipase and hepatic lipase gene in Chinese sturgeon and other six freshwater fishes[J]. Zoological Research, 2010, 31(3): 239-249(in Chinese).
- [18] Auwerx J, Leroy P, Schoonjans K. Lipoprotein lipase: recent contributions from molecular biology[J]. Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences, 1992, 29(3-4): 243-268.
- [19] 刘茜. 草鱼LPL基因克隆及草鱼脂肪细胞提取与培养的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.  
Liu Q. The research on cloning of LPL and the extraction and culture of adipocytes in grass carp[D]. Yangling: Northwest A and F University, 2007(in Chinese).
- [20] 祝仁铸, 尹逊河, 王元虎, 等. 猪肌肉组织MDH和LPL基因表达与肌内脂肪含量和脂肪酸组成关系的研究[J]. 畜牧兽医学报, 2013, 44(8): 1182-1188.  
Zhu R Z, Yin X H, Wang Y H, *et al.* The gene expression of MDH and LPL in muscle and their association with content of intramuscular fat and composition of fatty acids in pigs[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2013, 44(8): 1182-1188(in Chinese).
- [21] 陈清华. 兴凯湖四种鲈消化酶活力和肌肉营养成分的季节变化研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.  
Chen Q H. The seasonal change study on digestive enzyme activity and nutritional component of four culters in Xingkai Lake[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011(in Chinese).
- [22] 韩春艳, 郑清梅, 陈桂丹, 等. 添加不同类型脂肪酸对罗非鱼肝脏原代细胞内脂类代谢相关基因表达的影响[J]. 嘉应学院学报(自然科学版), 2014, 32(5): 53-57.  
Han C Y, Zheng Q M, Chen G D, *et al.* Effect of different fatty acids on the lipid metabolism related gene expression in primary cultured hepatocytes of tilapia[J]. Journal of Jiaying University (Natural Science Edition), 2014, 32(5): 53-57(in Chinese).
- [23] 蒋竹英, 李铁军, 唐利华, 等. 竹炭和竹醋液对断奶仔猪生长性能、血液生理生化指标和抗氧化性能的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(3): 88-93.  
Jiang Z Y, Li T J, Tang L H, *et al.* Effects of bamboo-carbon and bamboo vinegar on blood indexes and antioxidant capacity in weaned piglets[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(3): 88-93(in Chinese).
- [24] 刘红柏, 张颖, 白秀娟. 史氏鲟及小体鲟不同组织中磷酸酶活性的比较[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2006(6): 92-93.  
Liu H B, Zhang Y, Bai X J. Comparison of phosphatase activity in different tissues of Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii* Brandt) and the starlet (*Acipenser ruthenus* Linnaeus)[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2006(6): 92-93(in Chinese).
- [25] Deng J M, Mai K S, Chen L Q, *et al.* Effects of replacing soybean meal with rubber seed meal on growth, antioxidant capacity, non-specific immune response, and resistance to *Aeromonas hydrophila* in tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)[J]. Fish and Shellfish Immunology, 2015, 44(2): 436-444.
- [26] Habte-Tsion H M. Threonine affects growth, digestive capacity and immunity of fish[M]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.
- [27] 尾崎久雄. 鱼类血液与循环生理[M]. 许学龙, 熊国强, 缪圣赐, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.  
Akazaki O. Blood and Circulatory Physiology of Fish[M]. Xu X L, Xiong G Q, Miao S C, trans. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1982(in Chinese).
- [28] Abdel-Tawwab M, El-Sayed G O, Shady S H. Effect of dietary active charcoal supplementation on growth performance, biochemical and antioxidant responses, and resistance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. to environmental heavy metals exposure[J]. Aquaculture,

- 2017, 479: 17-24.
- [29] Fredenrich A, Bayer P. Reverse cholesterol transport, high density lipoproteins and HDL cholesterol: recent data[J]. *Diabetes and Metabolism*, 2003, 29(3): 201-205.
- [30] 明红, 刘涌涛, 杜习翔, 等. 木聚糖酶对尼罗罗非鱼生长及血脂血糖水平的影响[J]. *新乡医学院学报*, 2006, 23(6): 556-558.
- Ming H, Liu Y T, Du X X, *et al.* Effects of xylanase on the growth, the levels of serum lipids and glucose of *Tilapia nilotica*[J]. *Journal of Xinxiang Medical College*, 2006, 23(6): 556-558(in Chinese).
- [31] 陈伟兴, 刘清振, 范兆廷. 鱼类肉质评价及影响因素研究进展[J]. *肉类研究*, 2012, 26(10): 34-40.
- Chen W X, Liu Q Z, Fan Z T. Recent advances in research on meat quality evaluation and influencing factor of fish[J]. *Meat Research*, 2012, 26(10): 34-40(in Chinese).
- [32] 郭培. 罗非鱼鱼皮明胶在鱼糜制品中的应用研究[D]. 海口: 海南大学, 2016.
- Guo P. Study on the application of tilapia fish skin gelatin in surimi products[D]. Haikou: Hainan University, 2016(in Chinese).
- [33] 张晓燕. 水产动物肌肉组织中水分含量的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(19): 6265-6268.
- Zhang X Y. Research progress of muscle tissue moisture in aquaculture animal[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(19): 6265-6268(in Chinese).
- [34] 周彦锋, 徐东坡, 单俊峰, 等. 3个地理群体大银鱼营养成分的分析与评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(5): 734-740.
- Zhou Y F, Xu D P, Shan J F, *et al.* An analysis and evaluation of nutritional components of *Protosalanx hyalocranius* Abbott from three wild populations[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(5): 734-740(in Chinese).
- [35] 刘军, 胡兵, 李惠, 等. 铜鱼肌肉营养组成与评价[J]. *上海水产大学学报*, 2006, 15(3): 370-374.
- Liu J, Hu B, Li H, *et al.* Analysis of the nutritional composition in muscle of *Coreius heterodon*[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2006, 15(3): 370-374(in Chinese).
- [36] 彭士明, 施兆鸿, 侯俊利. 海水鱼脂类营养与饲料的研究进展[J]. *海洋渔业*, 2010, 32(2): 218-224.
- Peng S M, Shi Z H, Hou J L. Study on the lipid nutrition and artificial diet of marine fish[J]. *Marine Fisheries*, 2010, 32(2): 218-224(in Chinese).
- [37] 李爱杰. 水产动物营养与饲料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- Li A J. *Nutrition and Feed Science of Aquatic Animal*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996(in Chinese).
- [38] 李冀新, 张超, 罗小玲.  $\alpha$ -亚麻酸研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2006(2): 10-12.
- Li J X, Zhang C, Luo X L. Research advances of  $\alpha$ -linolenic acid[J]. *Cereals and Oils*, 2006(2): 10-12(in Chinese).
- [39] 王晓明, 万茜, 覃芸, 等. 日粮中复合添加剂水平对猪肉中脂肪酸组成影响的研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2005(7): 41-43.
- Wang X M, Wan Q, Qin Y, *et al.* Effects of adding levels of compound additives in diet on composition of fatty acid in pork[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2005(7): 41-43(in Chinese).
- [40] 王建枫, 孙建义, 翁晓燕, 等. 日粮锌对大鼠肝脏脂肪酸代谢的影响[J]. *动物营养学报*, 2008, 20(5): 586-591.
- Wang J F, Sun J Y, Weng X Y, *et al.* Effects of dietary Zinc on hepatic fatty acid metabolism of rats[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2008, 20(5): 586-591(in Chinese).
- [41] 刘燕强, 顾景范. 缺锌对大鼠脑和血液中微量元素及游离脂肪酸含量的影响[J]. *南开大学学报(自然科学)*, 2000, 33(3): 73-77.
- Liu Y Q, Gu J F. Effects of Zinc deficiency on some trace elements and free fatty acids of blood and brain in rats[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2000, 33(3): 73-77(in Chinese).
- [42] 桑忠营, 张燕, 袁军成. 竹炭在重金属废水处理中的应用[J]. *中国化工贸易*, 2012(2): 154-155.
- Sang Z Y, Zhang Y, Yuan J C. The application of bamboo-charcoal in the heavy metal wastewater treatment[J]. *China Chemical Trade*, 2012(2): 154-155(in Chinese).
- [43] Gerfault V, Louveau I, Mourot J, *et al.* Lipogenic enzyme activities in subcutaneous adipose tissue and skeletal muscle from neonatal pigs consuming maternal or formula milk[J]. *Reproduction, Nutrition, Development*, 2000, 40(2): 103-112.

- [44] 王刚, 曾勇庆, 武英, 等. 猪肌肉组织LPL基因表达的发育性变化及其与肌肉脂肪沉积关系的研究[J]. 畜牧兽医学报, 2007, 38(3): 253-257.
- Wang G, Zeng Y Q, Wu Y, *et al.* The developmental changes of LPL mRNA expression in muscle and their association with intramuscular fat for pigs[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2007, 38(3): 253-257(in Chinese).
- [45] 宋庆文. 不同饲料营养水平下荣昌猪和DLY猪脂肪(酸)代谢关键酶活性的发育性变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- Song Q W. Studies on development changes of key enzymes involved in lipid metabolism in Rongchang and DLY Pigs feed different dietary nutrient levels[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007(in Chinese).
- [46] 王美玲, 陈仲建, 吕林, 等. 不同形态锰对肉仔鸡脂肪代谢关键酶活性及其基因表达的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(18): 3850-3858.
- Wang M L, Chen Z J, Lü L, *et al.* Effect of different manganese sources on activities and gene expression of key enzymes in fat metabolism of broilers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(18): 3850-3858(in Chinese).
- [47] 杨海玲. 莱芜猪肌肉脂肪沉积的生物化学和组织形态学研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- Yang H L. Study on the biochemistry and histomorphology of intramuscular fat deposition in Laiwu Black pigs[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2005(in Chinese).

## Effects of dietary addition of bamboo charcoal on muscle fatty acid composition and lipid metabolism related genes of juvenile red tilapia (*Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*)

TANG Dan<sup>1</sup>, SU Shengyan<sup>2</sup>, ZHU Wenbin<sup>2</sup>, WANG Lanmei<sup>2</sup>, SONG Feibiao<sup>1</sup>,  
DONG Juanjuan<sup>1</sup>, ZHANG Dan<sup>1</sup>, DONG Zaijie<sup>1,2\*</sup>

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;

2. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization,  
Freshwater Fisheries Research Centre, Chinese Academy of Fishery Sciences,  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi 214081, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of feed bamboo charcoal on muscle nutrition composition and lipid metabolism-related gene expression in juvenile red tilapia, the healthy juvenile red tilapia with an average body weight of (7.07±0.01) g were randomly divided into 5 groups, with 3 replicates in each group and were kept for 60 days. The quantity of bamboo charcoal in the feed was 0%, 0.5%, 1%, 2% and 4%, respectively. The results showed that: the activity of ALT in the 0.5% and 1% groups was significantly lower than that in the control group. The activity of alkaline phosphatase (ALP) and serum total protein (TP) activities were significant increased in the 1% group. The aspartate aminotransferase (AST), triglyceride (TG) and serum total cholesterol (TC) concentrations in the experimental groups were significantly lower than those in the control group. High density lipoprotein (HDL) increased significantly with the increase of bamboo charcoal concentration. 1% bamboo charcoal group muscle moisture content was significantly lower than the control group; crude protein content of 1%, 2% and 4% treatment groups was significantly lower than that of the control group. Crude fat content and muscle ash that of increased compared with the control group, 1% and 4% groups significantly increased compared with the control group. Feed bamboo charcoal can increase the content of total unsaturated fatty acid (UFA) in fish muscle, but only 4% group's total unsaturated fatty acid content increased significantly, on the contrary, the content of saturated fatty acids (SFA) in 4% group was significantly lower than that of the control group; C18: 2 and C18: 3n3 treatment in 4% bamboo charcoal treatment group increased significantly compared with the control group, and the C22: 6 in 1% bamboo charcoal treatment group was significantly lower than the control group. With the increase of bamboo charcoal feed, *LPL* gene and *MDH* gene expression increased compared with the control group, but only 1% group *MDH* gene compared with the control group were significantly different. Studies have shown that adding appropriate concentrations of bamboo charcoal can improve the crude fat content, total unsaturated fatty acid (UFA) content, *LPL* gene and *MDH* gene expression in fish, and help to change the nutrient composition of fish.

**Key words:** *Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*; bamboo charcoal; muscle; fatty acid composition; lipid metabolism gene

**Corresponding author:** DONG Zaijie. E-mail: dongzj@ffrc.cn

**Funding projects:** Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, Chinese Academy of Fishery Sciences (2017HY-XKQ02-3); Jiangsu Natural Science Foundation for Young Scholar (BK20160203)