

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20200818001

http://www.yykxjz.cn/

孟伟, 王琦, 牟华, 巩雨, 申雅雯, 孙云霞, 张文兵, 麦康森. 饲料棕榈酸/(EPA+DHA)对大黄鱼抗氧化能力和肌肉品质的影响. 渔业科学进展, 2022, 43(1): 123-132

MENG W, WANG Q, MU H, GONG Y, SHEN Y W, SUN Y X, ZHANG W B, MAI K S. Effects of palmitic acid/(EPA+DHA) ratios on anti-oxidative capacity and muscle quality of large yellow croaker *Larimichthys crocea*. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(1): 123-132

## 饲料棕榈酸/(EPA+DHA)对大黄鱼 抗氧化能力和肌肉品质的影响\*

孟伟 王琦 牟华 巩雨 申雅雯 孙云霞 张文兵<sup>①</sup> 麦康森

(农业农村部水产动物营养与饲料重点实验室 海水养殖教育部重点实验室

中国海洋大学水产学院 山东 青岛 266003)

**摘要** 为探究饲料中棕榈酸/(二十碳五烯酸+二十二碳六烯酸)(EPA+DHA)对大黄鱼(*Larimichthys crocea*) [初始体重为(30.51±0.16)g]抗氧化能力和肌肉品质的影响,本研究以鱼粉和豆粕为主要蛋白源, EPA 富含油、DHA 富含油、棕榈酸和卵磷脂为主要脂肪源,分别配制棕榈酸/(EPA+DHA)比例分别为1:5、1:1和5:1的3种等氮(约43%粗蛋白)、等脂(约11%粗脂肪)饲料,并分别命名为P0、P50和P100组,在海水浮式网箱中进行为期70d的摄食生长实验,从肌肉基本指标与分子基因层面探究饲料对大黄鱼抗氧化能力与肌肉品质的影响。结果显示,P0和P50组大黄鱼肌肉具有显著高的硬度、粘附性、内聚性和咀嚼性( $P<0.05$ )。P0组大黄鱼肌肉多不饱和脂肪酸显著高于P50和P100组( $P<0.05$ );P100组肌肉饱和脂肪酸显著高于P0和P50组( $P<0.05$ )。P100组大黄鱼肌肉超氧化物歧化酶2基因(*SOD2*)和过氧化氢酶基因(*CAT*)表达水平显著高于P0和P50组( $P<0.05$ );P0组肌肉核因子E2相关因子基因(*Nrf2*)表达水平则显著高于P50组( $P<0.05$ ),P100和P0组、P100和P50组间相比无显著差异( $P>0.05$ )。对于超氧化物歧化酶1基因(*SOD1*),P0、P50和P100组相比均无显著差异( $P>0.05$ )。P50组大黄鱼肌肉的总抗氧化能力(T-AOC)显著低于P0和P100组( $P<0.05$ ),P0、P50和P100组大黄鱼肌肉的总超氧化物歧化酶(T-SOD)、CAT活性及丙二醛(MDA)含量相比均无显著差异( $P>0.05$ )。研究表明,饲料中棕榈酸含量较高时,大黄鱼肌肉质构特性降低,抗氧化能力没有受到显著影响;在饲料棕榈酸/(EPA+DHA)值发生改变时,大黄鱼肌肉品质的变化与鱼体内氧化应激和抗氧化能力之间的关联仍需进一步探究。

**关键词** 大黄鱼;肌肉品质;抗氧化能力;棕榈酸;EPA+DHA

中图分类号 S963 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2022)01-0123-10

鱼油因富含二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)等必需脂肪酸,并具有良好的适口性而被广

泛用作海水养殖鱼类饲料的重要脂肪源。随着集约化养殖对鱼油的大规模需求,野生渔业资源的减少及环

\* 国家重点研发计划项目(2019YFD0900200)资助 [This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900200)]. 孟伟, E-mail: mengwei@stu.ouc.edu.cn

① 通讯作者: 张文兵, 教授, E-mail: wzhang@ouc.edu.cn

收稿日期: 2020-08-18, 收修改稿日期: 2020-09-25

保意识的增强,用于生产鱼油的原料供给紧张,致使鱼油价格持续上涨。因此,产量大、价格低的植物油越来越受到人们的重视(FAO, 2019)。棕榈油是世界产量最大的食用植物油源,2018年全球棕榈油产量为7 499.8万t (USDA, 2019)。棕榈油含有饱和脂肪酸(SFA)和不饱和脂肪酸(UFA)的比例接近1:1,其主要成分为棕榈酸(C16:0)(Edem, 2002)。Bell等(2002)和Fonseca-Madrigal等(2005)研究表明,棕榈油分别替代0、25%、50%和100%饲料鱼油,对大西洋鲑(*Salmo salar*)和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的生长性能无显著影响,并且饲料棕榈油最高含量分别可达24%与20%。

饲料脂肪源的改变会对养殖鱼类肌肉品质产生影响。植物油完全替代饲料鱼油显著降低了大西洋鲑的肌肉质地、持水力和肉色(Regost *et al*, 2004)。鱼肉口感是消费者评价鱼类品质的常用标准,很大程度上决定其市场接受度。李百安(2015)、张殿福等(2020)从大西洋鲑和罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)等鱼类的研究发现,肌肉的化学物质组成对衡量品质会产生重要影响。其中,肌肉中多不饱和脂肪酸(PUFA)易被氧化出现瘦背肌症,进而造成肌肉品质下降(苏小凤等, 2002)。鱼体过多的活性氧(ROS)造成机体氧化损伤,而氧化损伤的减弱与机体抗氧化能力的提升有关(Chen *et al*, 2013)。同时,ROS水平升高导致肌肉纤维直径减小,增加肌肉硬度,对肌肉质构有调节作用(Yu *et al*, 2020)。程民杰(2014)研究表明,饲料中32%~40%的棕榈油替代鱼油可以提高半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)抗氧化能力并促进其生长,而饲料棕榈油完全替代鱼油则显著降低抗氧化酶的活力,鱼体合成能力降低,蛋白质效率降低。在虹鳟和大西洋鲑研究中发现,饲料中超过50%的鱼油被棕榈油替代会显著降低鱼体n-3 PUFA的含量(Fonseca-Madrigal *et al*, 2005)。

大黄鱼(*Larimichthys crocea*)是我国最大规模的海水网箱养殖鱼类。随着养殖规模的扩大和养殖密度的增加,养殖大黄鱼的品质备受关注。与野生大黄鱼相比,养殖大黄鱼出现肌肉松散、体色退化等品质问题(孟玉琼等, 2016; Mu *et al*, 2017)。大黄鱼养殖过程中,以投喂冰鲜杂鱼为主,其来源不详,品质不一,容易造成资源浪费、水环境污染和品质下降等问题(胡兵, 2015),这也促进了大黄鱼环境友好型高效配合饲料的研发和应用。本研究以棕榈酸替代饲料中不同水平的EPA+DHA,探究其对大黄鱼肌肉品质和抗氧化能力

的影响,为大黄鱼配合饲料配方的优化提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

以鱼粉和豆粕为主要蛋白源,DHA富含油、EPA富含油、棕榈酸以及卵磷脂为主要脂肪源,配制棕榈酸/(EPA+DHA)比例分别为1:5、1:1和5:1的3种等氮(约43%粗蛋白)、等脂(约11%粗脂肪)饲料,并分别命名为P0、P50和P100(表1)。

### 1.2 摄食生长实验

实验所用同一批大黄鱼购于福建宁德市富发水产有限公司。在正式实验开始前,先将大黄鱼在4.0 m×4.0 m×4.0 m的海水浮式网箱中驯养14 d,以适应实验饲料和养殖环境。暂养结束后,将鱼饥饿24 h后,挑选体格健壮、大小相近的大黄鱼[初始体重为(30.51±0.16) g]随机分配到9个网箱(1.0 m×1.0 m×2.0 m)中,每个网箱50尾。每种饲料随机投喂3个网箱,每天饱食投喂2次(05:00和17:00)。养殖实验周期为70 d。养殖期间,水温为21℃~28℃,盐度为28~32,溶解氧(DO)≥6.5 mg/L。

养殖实验结束后,大黄鱼饥饿24 h,并使用丁香酚(1:10 000)(纯度为99%)对实验鱼进行麻醉。对每个网箱中的鱼称重和计数,分别记录其体重和体长。在每个网箱随机取9尾鱼,收集肌肉样本。为了避免肌肉的异质性,对特定的肌肉部位进行不同品质指标的测定[图1,引自孟玉琼等(2016)]。解剖后于48 h内完成测定肌肉质地、持水力和pH,其他肌肉样品放入-80℃冰箱中冷冻保存。

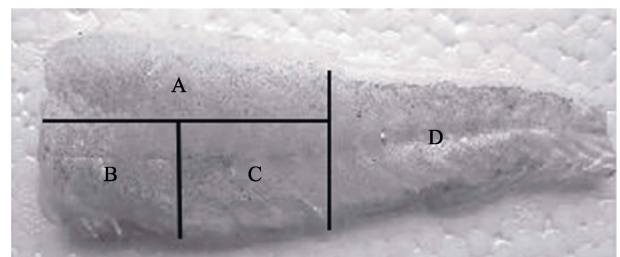


图1 大黄鱼肌肉品质指标测定部位分布  
Fig. 1 Sampling segments for measurements of the quality parameters in muscle of large yellow croaker

A: 检测质地; B: 检测持水力;  
C: 检测pH; D: 检测脂肪酸

A: Segment was used to test texture; B: Segment was used to test water holding capacity; C: Segment was used to test pH; D: Segment was used to test fatty acids

表 1 饲料配方及组成分析(%饲料干重)

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

原料 Ingredients	实验组 Groups		
	P0 <sup>1</sup>	P50 <sup>2</sup>	P100 <sup>3</sup>
鱼粉 Fish meal <sup>4</sup>	39.00	39.00	39.00
豆粕 Soybean meal <sup>4</sup>	21.70	21.70	21.70
小麦粉 Wheat flour <sup>4</sup>	18.50	18.50	18.50
大豆卵磷脂 Soybean lecithin	2.00	2.00	2.00
棕榈酸甘油酯 Tripalmitin	0.00	2.50	5.00
DHA <sup>5</sup> 富含油+EPA <sup>6</sup> 富含油	5.00	2.50	0
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	10.35	10.35	10.35
啤酒酵母 Beer yeast <sup>4</sup>	1.50	1.50	1.50
维生素预混料 Vitamin Premix <sup>7</sup>	1.00	1.00	1.00
矿物质预混料 Mineral Premix <sup>8</sup>	0.50	0.50	0.50
诱食剂 Attractant <sup>9</sup>	0.30	0.30	0.30
防霉剂 Mold inhibitor <sup>10</sup>	0.10	0.10	0.10
乙氧基喹啉 Ethoxy quinoline	0.05	0.05	0.05
总计 Total	100.00	100.00	100.00
成分分析 Proximate composition			
粗蛋白 Crude protein	43.41	43.41	42.63
粗脂肪 Crude lipid	10.69	10.63	10.67
棕榈酸/(EPA+DHA) Palmitic acid/(EPA+DHA)	0.20	0.80	6.00

注: 1. 饲料棕榈酸/(EPA+DHA)=1:5; 2. 饲料棕榈酸/(EPA+DHA)=1:1; 3. 饲料棕榈酸/(EPA+DHA)=5:1; 4. 原料由青岛七好生物科技有限公司提供。鱼粉、粗蛋白: 70.27%; 粗脂肪: 6.60%; 豆粕、粗蛋白: 53.37%; 粗脂肪: 3.68%; 小麦面粉、粗蛋白: 19.69%; 粗脂肪: 1.58%; 5. DHA: 二十二碳六烯酸; 6. EPA: 二十碳五烯酸; 7. 维生素预混料: 维生素 B<sub>1</sub>, 25 mg; 核黄素, 45 mg; 维生素 B<sub>6</sub>, 20 mg; 维生素 B<sub>12</sub>, 10 mg; 维生素 K<sub>3</sub>, 10 mg; 肌醇, 800 mg; 维生素 B<sub>3</sub>, 60 mg; 烟酸, 200 mg; 叶酸, 20 mg; 生物素, 60 mg; 维生素 A, 32 mg; 维生素 D<sub>3</sub>, 5 mg; 维生素 E, 240 mg; 维生素 C, 2000 mg; 次粉, 16 473 mg; 8. 矿物质预混料: 亚硒酸钠(1%), 20 mg; 碘酸钙(1%), 60 mg; 氯化钴(1%), 50 mg; 硫酸铜, 10 mg; 硫酸亚铁, 80 mg; 硫酸锌, 50 mg; 硫酸锰, 45 mg; 硫酸镁, 1 200 mg; 磷酸二氢钙, 10 000 mg; 纤维素, 8485 mg; 9. 诱食剂: 甘氨酸: 甜菜碱=1:2; 10. 防霉剂: 富马酸: 丙酸钙=1:1

Note: 1. Diet with palmitic acid/(EPA+DHA)=1:5; 2. Diet with palmitic acid/(EPA+DHA)=1:1; 3. Diet with palmitic acid/(EPA+DHA)=5:1; 4. All of these ingredients were supplied by Qingdao Great Seven Biotechnology Co., Ltd. White fish meal, Crude protein: 70.27%; Crude lipid: 6.60%; Soybean meal, Crude protein: 53.37%, Crude lipid, 3.68%; Wheat flour, Crude protein: 19.69%, Crude lipid: 1.58%; 5. DHA: Docosahexaenoic acid; 6. EPA: Eicosapentaenoic acid; 7. Vitamin premix: Thiamin, 25 mg; Riboflavin, 45 mg; Pyridoxine HCl, 20 mg; Vitamin B<sub>12</sub>, 10 mg; Vitamin K<sub>3</sub>, 10 mg; Inositol, 800 mg; Pantothenic acid, 60 mg; Niacin acid, 200 mg; Folic acid, 20 mg; Biotin, 60 mg; Retinol acetate, 32 mg; Cholecalciferol, 5 mg;  $\alpha$ -tocopherol, 240 mg; Ascorbic acid, 2000 mg; wheat middling, 16 473 mg; 8. Mineral premix: Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> (1%), 20 mg, Ca(IO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O (1%), 60 mg; CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O (1%), 50 mg; CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, 10 mg; FeSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 80 mg; ZnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 50 mg; MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 45 mg; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 1200 mg; Ca (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O, 10 000 mg; Microcrystalline cellulose, 8485 mg; 9. Attractant: Glycine: Betaine=1:2; 10. Mold inhibitor: fumaric acid: Calcium propionate=1:1

### 1.3 样品分析

**1.3.1 肌肉脂肪酸的测定** 称取约 10 g 大黄鱼肌肉 D 区(图 1)的样品, 切碎混匀之后, 在冷冻干燥机(ALPHA1-4LD, Christ, 德国)中冻干。脂肪酸甲酯化前处理后(孟玉琼等, 2016), 采用气相-质谱联用仪进行检测(GCMS-QP2010, 岛津, 日本)(Mu *et al*, 2018)。对色谱数据进行定性处理, 通过 NIST08.LIB 谱库进行检索, 确定脂肪酸组成(匹配度高于 80%)。

**1.3.2 肌肉质地、pH 和持水力的测定** 在肌肉 A 区(图 1)选取 3 个点, 采用质构仪(TMS-PRO, FTC,

美国)中的 TPA 模式进行肌肉质地的测定, 包括硬度、弹性、内聚性、粘附性和咀嚼性。相关参数: 直径为 8 mm 的圆柱形探头; 量程为 25 N 的力量感应元; 检测速度为 30 mm/min; 形变量为 30%; 起始力为 0.1 N。

采用 Gómez-Guillén 等(2000)的方法测定大黄鱼肌肉 B 区(图 1)的持水力。使用便携式 pH 计(Testo 205, 德国)对大黄鱼肌肉特定部位的 3 个点进行 pH 测定。

**1.3.3 抗氧化相关基因的表达量分析** 使用 Trizol 试剂(Invitrogen, Carlsbad, CA, 美国)提取肌肉组织 RNA。采用 NanoDrop 2000 分光光度计(Thermo fisher

scientific, 美国)和 1.2%琼脂糖凝胶电泳检测 RNA 浓度和质量。按照说明书步骤操作, 采用 PrimeScript™ RT 试剂盒(TaKaRa)将提取的 RNA 反转录成 cDNA。

引物设计与合成: 在 NCBI 上搜索已报道的大黄鱼中相关目的基因的蛋白编码的序列; 对所找到的序

列进行多重序列比对并确定合适的保守区; 基于研究, 选用  $\beta$ -actin 为内参基因, 应用 Primer 5.0 软件设计、分析引物, 并对引物进行修饰(降低简并度), 然后由生工生物工程(上海)股份有限公司负责合成并测试引物序列(表 2)。

表 2 抗氧化相关基因引物序列  
Tab. 2 Primer sequences of anti-oxidation related genes

引物名称 Primer name	引物序列 Primer sequence (5'~3')	基因库编号 Acc. No.
<i>Nrf2</i>	F: TCTGATGTGCGTCTCTCCAG R: GCCTCATTCAATTGGTGCTT	XM 010737768.2
<i>SOD1</i>	F1: ACCGTGTTCTTTGAGCAGGAG R1: GCTACCAGCGTTGCCAGTC	NM 001303360.1
<i>SOD2</i>	F2: GGCCTGGCAAAGGGAGAC R2: CACAAGCGGCGATACGAAG	NM 001303364.1
<i>CAT</i>	F: CTTCATCAGGGACGCTCTACT R: ATGGCATAATCTGGGTTGGT	XM 010735178.2
$\beta$ -actin	F: CTACGAGGGTTATGCCCTGCC R: TGAAGGAGTAACCGCGCTCTGT	GU584189.1

注: *Nrf2*: 核因子 E2 相关因子 2 基因; *SOD1*: 超氧化物歧化酶 1 基因; *SOD2*: 超氧化物歧化酶 2 基因; *CAT*: 过氧化氢酶基因

Note: *Nrf2*: Nuclear factor erythroid 2-related factor 2 gene; *SOD1*: Superoxide dismutase 1 gene; *SOD2*: Superoxide dismutase 2 gene; *CAT*: Catalase gene

PCR 扩增反应: RT-PCR 扩增反应体系试剂  $2 \times$  Es Taq MasterMix 为 7.5  $\mu$ L, 上游引物(F, 10  $\mu$ mol/L) 为 0.3  $\mu$ L, 下游引物(R, 10  $\mu$ mol/L)为 0.3  $\mu$ L, dH<sub>2</sub>O 为 5.9  $\mu$ L, 模板 cDNA 为 1.0  $\mu$ L。PCR 反应均在 Eppendorf Mastercycler gradient PCR 仪(德国)中进行。

数据处理: *Nrf2*、*SOD* 和 *CAT* 表达量采用  $2^{-\Delta\Delta Ct}$  法计算(Livak *et al.*, 2001)。

**1.3.4 抗氧化酶活性、总抗氧化力和丙二醛含量的测定** 制备肌肉组织匀浆液后(Mu *et al.*, 2018), 采用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒分别测定总超氧化物歧化酶(T-SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性、总抗氧化能力(T-AOC)和丙二醛(MDA)含量, 采用比色法测定上述参数, 使用紫外分光光度计(UV2401PC, 岛津, 日本)测定吸光度。

## 1.4 统计分析

使用 SPSS 17.0 软件对所得数据进行统计分析。所有数据均进行单因素方差分析(one-way ANOVA)后, 若组间存在显著差异则采用 Duncan's 检验进行多重比较,  $P < 0.05$  为差异显著。

## 2 实验结果

### 2.1 生长性能

从图 2 可以看出, P0、P50 和 P100 组之间在大黄鱼终末体重(Final body weight)无显著差异( $P > 0.05$ )。

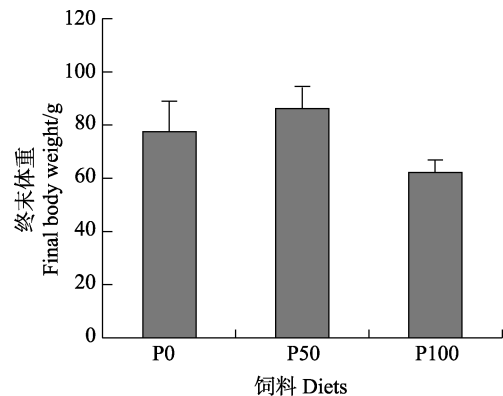


图 2 不同饲料棕榈酸/(EPA+DHA)比例对大黄鱼终末体重的影响

Fig. 2 Effects of different ratios of dietary palmitic acid to EPA+DHA on the final body weight of large yellow croaker

### 2.2 肌肉脂肪酸组成

从表 3 可以看出, 随着饲料中棕榈酸含量的增加, 大黄鱼肌肉 SFA 水平显著提高( $P < 0.05$ )。P100 组大黄鱼肌肉的 C16:0 含量显著高于 P0 组, P100 与 P50 组、P0 与 P50 组之间无显著差异( $P > 0.05$ )。与 P50 组相比, P0 和 P100 组大黄鱼肌肉的 C12:0 水平显著提高( $P < 0.05$ ), P0 和 P100 组相比差异不显著( $P > 0.05$ )。与 P0 组相比, P50 和 P100 组大黄鱼肌肉的 C14:0 和 C18:0 水平显著提高( $P < 0.05$ ), P50 和 P100 组相比差异不显著( $P > 0.05$ )。大黄鱼肌肉的 C20:0 含量在各处理组间相比无显著差异( $P > 0.05$ )。

表 3 不同饲料棕榈酸/(EPA+DHA)比例对大黄鱼肌肉脂肪酸组成的影响(mg/g 湿重, 平均值±标准误,  $n=9$ )<sup>1</sup>  
Tab. 3 Effects of different ratios of dietary palmitic acid to EPA+DHA on fatty acid compositions in muscle of large yellow croaker (mg/g, wet basis, Mean±SE,  $n=9$ )<sup>1</sup>

项目 Items	实验组 Groups		
	P0	P50	P100
C12:0	0.05±0.00 <sup>b</sup>	0.19±0.03 <sup>a</sup>	0.09±0.01 <sup>b</sup>
C14:0	1.93±0.04 <sup>b</sup>	2.30±0.06 <sup>a</sup>	2.27±0.06 <sup>a</sup>
C16:0	21.13±0.78 <sup>b</sup>	24.71±1.70 <sup>ab</sup>	29.09±0.17 <sup>a</sup>
C18:0	5.07±0.23 <sup>b</sup>	6.96±0.08 <sup>a</sup>	7.41±0.35 <sup>a</sup>
C20:0	0.34±0.03	0.23±0.07	0.34±0.02
C16:1	4.91±0.38 <sup>b</sup>	6.06±0.27 <sup>ab</sup>	6.59±0.25 <sup>a</sup>
C18:1n-7	2.46±0.03	2.30±0.35	1.87±0.09
C18:1n-9	16.01±0.80 <sup>c</sup>	20.78±0.86 <sup>b</sup>	26.53±1.01 <sup>a</sup>
C20:1	1.18±0.06 <sup>b</sup>	1.85±0.18 <sup>a</sup>	1.21±0.01 <sup>b</sup>
C18:2n-6	12.32±0.51	12.07±0.38	13.57±0.84
C20:4n-6	0.92±0.05 <sup>ab</sup>	1.64±0.43 <sup>a</sup>	0.53±0.02 <sup>b</sup>
C18:3n-3	1.64±0.05 <sup>b</sup>	2.49±0.29 <sup>a</sup>	1.66±0.06 <sup>b</sup>
C20:5n-3	10.01±0.37 <sup>a</sup>	6.37±0.14 <sup>b</sup>	2.89±0.15 <sup>c</sup>
C22:6n-3	22.03±1.07 <sup>a</sup>	12.06±1.52 <sup>b</sup>	5.95±0.28 <sup>c</sup>
ΣSFA <sup>2</sup>	28.52±0.95 <sup>c</sup>	34.38±1.63 <sup>b</sup>	39.20±0.23 <sup>a</sup>
ΣMUFA <sup>3</sup>	24.56±1.11 <sup>c</sup>	30.99±0.60 <sup>b</sup>	36.20±1.13 <sup>a</sup>
Σn-6 PUFA <sup>4</sup>	13.24±0.56	13.70±0.43	14.11±0.86
Σn-3 PUFA <sup>5</sup>	33.68±1.49 <sup>a</sup>	20.92±1.78 <sup>b</sup>	10.49±0.49 <sup>c</sup>
DHA/EPA	2.20±0.03	1.90±0.24	2.06±0.01
EPA+DHA	32.04±1.43 <sup>a</sup>	18.44±1.50 <sup>b</sup>	8.83±0.43 <sup>c</sup>
PA <sup>6</sup> /(EPA+DHA)	0.66±0.05 <sup>c</sup>	1.37±0.20 <sup>b</sup>	3.31±0.17 <sup>a</sup>

注: 同一行中不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。一些含量呈微量或未检出的脂肪酸(C24:0, C14:1, C20:2n-6, C20:3n-6)未在表中列出, 下同

1. 采用气相色谱-质谱联用仪(GCMS)测定脂肪酸组成; 2. SFA: 饱和脂肪酸; 3. MUFA: 单不饱和脂肪酸; 4. n-6 PUFA: n-6 系列多不饱和脂肪酸; 5. n-3 PUFA: n-3 系列多不饱和脂肪酸; 6. PA: 棕榈酸

Note: Data with different superscripts in the same row are significantly different ( $P<0.05$ ). Some fatty acids with trace contents or not detected were not listed, such as C24:0, C14:1, C20:2n-6, C20:3n-6, the same as below

1. The fatty acid composition was determined by Gas Chromatograph Mass Spectrometer (GCMS); 2. SFA: Saturated fatty acids; 3. MUFA: Mono-unsaturated fatty acids; 4. n-6 PUFA: n-6 Poly-unsaturated fatty acids; 5. n-3 PUFA: n-3 Poly-unsaturated fatty acids; 6. PA: Palmitic acid

随着饲料棕榈酸含量的增加, 大黄鱼肌肉的单不饱和脂肪酸(MUFA)水平显著提高( $P<0.05$ )。P100 组大黄鱼肌肉的 C16:1 含量显著高于 P0 组, P100 与 P50 组、P0 与 P50 组相比无显著差异( $P>0.05$ )。P100 组的大黄鱼肌肉 C18:1n-9 水平显著提高, P0 组含量最低( $P<0.05$ )。与 P50 组相比, P0 和 P100 组大黄鱼肌肉的 C20:1 水平显著提高( $P<0.05$ ), P0 组和 P100 组相比差异不显著( $P>0.05$ )。大黄鱼肌肉的 C18:1n-7 含

量在各处理组间相比无显著差异( $P>0.05$ )。

随着饲料棕榈酸含量的增加, 大黄鱼肌肉的 n-3 PUFA 水平显著降低( $P<0.05$ ), 而肌肉的 n-6 PUFA 水平各处理组相比无显著差异( $P>0.05$ )。P100 组的大黄鱼肌肉的棕榈酸/(EPA+DHA)水平显著提高, 其次是 P50 组, P0 组含量最低( $P<0.05$ )。P0 组大黄鱼肌肉的 C20:5n-3、C22:6n-3 和 EPA+DHA 水平显著提高, 其次是 P50 组, P100 组含量最低( $P<0.05$ )。与 P50 组相比, P0 和 P100 组大黄鱼肌肉的 C18:3n-3 水平显著提高( $P<0.05$ ), P0 和 P100 组相比差异不显著( $P>0.05$ )。P50 组大黄鱼肌肉的 C20:4n-6 含量显著高于 P100 组, P50 与 P0 组、P100 与 P0 组相比无显著差异( $P>0.05$ )。大黄鱼肌肉的 C18:2n-6、DHA/EPA 含量在各处理组间相比无显著差异( $P>0.05$ )。

### 2.3 肌肉质地、pH 和持水力

从表 4 可以看出, P0 和 P50 组大黄鱼肌肉硬度、粘附性、内聚性、咀嚼性显著高于 P100 组( $P<0.05$ ), 而 P0 和 P50 组相比无显著差异( $P>0.05$ )。P0、P50 和 P100 组在大黄鱼肌肉 pH 和持水力相比无显著差异( $P>0.05$ )。

表 4 不同饲料棕榈酸/(EPA+DHA)比例对大黄鱼肌肉质地特性的影响(平均值±标准误,  $n=9$ )  
Tab. 4 Effects of different ratios of dietary palmitic acid to EPA+DHA on the flesh texture of large yellow croaker (Mean±SE,  $n=9$ )

项目 Items	实验组 Groups		
	P0	P50	P100
弹性 Springiness/mm	0.83±0.06	0.85±0.04	0.76±0.04
硬度 Hardness/g	1.11±0.10 <sup>a</sup>	1.18±0.13 <sup>a</sup>	0.76±0.06 <sup>b</sup>
内聚性 Cohesiveness	0.46±0.01 <sup>a</sup>	0.45±0.01 <sup>a</sup>	0.41±0.01 <sup>b</sup>
粘附性 Adhesiveness/(g·mm <sup>-1</sup> )	0.63±0.06 <sup>a</sup>	0.67±0.07 <sup>a</sup>	0.41±0.03 <sup>b</sup>
咀嚼性 Chewiness/(g·mm <sup>-1</sup> )	0.56±0.08 <sup>a</sup>	0.62±0.09 <sup>a</sup>	0.32±0.03 <sup>b</sup>
pH	6.08±0.06	6.20±0.03	6.22±0.03
持水力 Liquid holding capacity/%	82.41±1.31	77.88±1.47	79.11±1.43

### 2.4 肌肉抗氧化能力

大黄鱼肌肉抗氧化相关基因表达水平的影响见图 3。从图 3 可以看出, P0 组大黄鱼肌肉的 SOD2 基因表达水平显著低于 P50 和 P100 组( $P<0.05$ ), P50 和 P100 组相比无显著差异。随着饲料棕榈酸替代水平

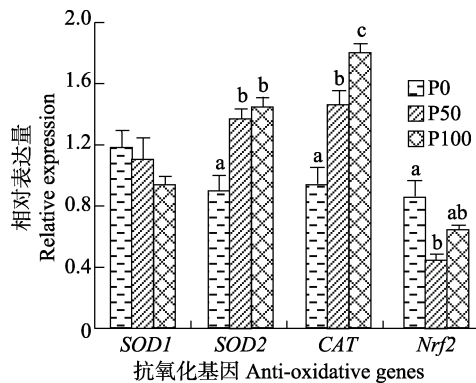


图3 不同饲料棕榈酸/(EPA+DHA)比例对大黄鱼肌肉抗氧化相关基因表达水平的影响(平均值±标准误,  $n=3$ )

Fig. 3 Effects of different ratios of dietary palmitic acid to EPA+DHA on the expression level of anti-oxidation-related gene in muscle of large yellow croaker (Mean±SE,  $n=3$ )

图中不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),下同。SOD1: 超氧化物歧化酶1基因; SOD2: 超氧化物歧化酶2基因; 过氧化氢酶基因; Nrf2: 核因子E2相关因子2基因  
Different letters in each figure present significant difference ( $P<0.05$ ), the same as bellow. SOD1: Superoxide dismutase 1 gene; SOD2: Superoxide dismutase 2 gene; CAT: Catalase gene; Nrf2: Nuclear factor erythroid 2-related factor 2 gene

的增加, 大黄鱼肌肉的 CAT 基因表达水平显著提高( $P<0.05$ )。P0 组大黄鱼肌肉的 Nrf2 基因表达水平显著高于 P50 组( $P<0.05$ ), P0 和 P100 组、P50 和 P100

组之间相比无显著差异( $P>0.05$ )。大黄鱼肌肉 SOD1 基因表达水平在各处理组间相比无显著差异( $P>0.05$ )。

大黄鱼肌肉抗氧化酶活性及 T-AOC 和 MDA 含量结果见图 4。从图 4 可以看出, P50 组大黄鱼肌肉 T-AOC 含量显著降低( $P<0.05$ ), P0 和 P100 组含量相比无显著差异( $P>0.05$ )。大黄鱼肌肉 SOD 和 CAT 的活性及 MDA 含量在 3 个处理组相比均无显著差异( $P>0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 饲料棕榈酸/(EPA+DHA)对大黄鱼肌肉脂肪酸组成的影响

一方面, 相比于 P0 组, P100 组大黄鱼肌肉 SFA 含量显著增加, MUFA 和 n-3 PUFA 含量显著降低。这与鱼类肌肉脂肪酸组成与饲料脂肪酸存在高度相关性有关(Bahurmiz *et al*, 2007); 另一方面, P100 组的 EPA+DHA 含量显著降低, 而 C18 脂肪酸(C18:0 和 C18:1n-9)含量增加。这和斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*) (何凌云, 2019)及大西洋鲑(Bell *et al*, 2002)的研究结果相一致, 也表明海水鱼类利用脂肪酸的去饱和反应及碳链延长反应合成 PUFA 的能力有限(Cai *et al*, 1989)。同时, 大黄鱼生长性能无显著差异可能与饲料鱼粉提供的必需脂肪酸可以满足大黄鱼的基础生长需要有关。

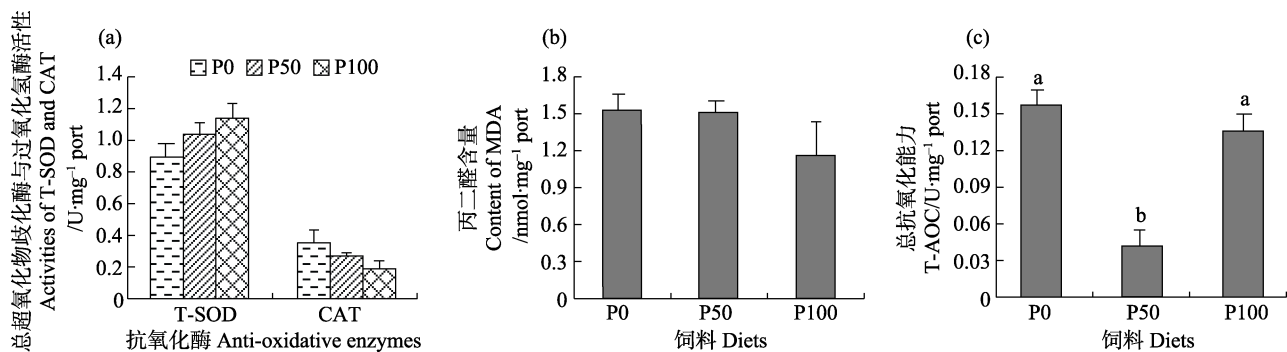


图4 不同饲料棕榈酸/(EPA+DHA)比例对大黄鱼肌肉抗氧化酶活(a)及 MDA(b)和 T-AOC(c)含量的影响(平均值±标准误,  $n=3$ )

Fig. 4 Effects of different ratios of dietary palmitic acid to EPA+DHA on the activities of anti-oxidative enzymes (a), MDA content (b) and T-AOC (c) in muscle of large yellow croaker (Mean±SE,  $n=3$ )

T-SOD: 总超氧化物歧化酶;

CAT: 过氧化氢酶; MDA: 丙二醛; T-AOC: 总抗氧化能力

T-SOD: Total superoxide dismutase; CAT: Catalase; MDA: Malondialdehyde; T-AOC: Total anti-oxidative capacity

随着饲料中棕榈酸/(EPA+DHA)比例的增加, 大黄鱼肌肉脂肪酸组成发生改变, 可能是肌肉脂肪酸组成反映饲料脂肪酸组成并呈现正相关(Olsen *et al*,

2000); 大黄鱼利用脂肪酸去饱和反应和碳链延长反应合成 PUFA 的能力不足(李桑等, 2015)。饲料中均衡的 n-3/n-6 PUFA 比例对于海水鱼类非常重要(郑建明



等, 2019), 在减少饲料氧化基础上需要提供足够的 EPA+DHA 来满足鱼类必需脂肪酸的需求(柳学周等, 2017)。

### 3.2 饲料棕榈酸/(EPA+DHA)对大黄鱼肌肉品质的影响

本研究中, P0 和 P50 组大黄鱼的肌肉硬度、内聚性、粘附性和咀嚼性显著高于 P100 组。饲料中不添加或添加少量棕榈酸保证鱼肉较高的 n-3 PUFA 含量, 而 n-6 PUFA 含量在各处理组相比无显著差异。肌肉中较高含量的 PUFA 显著增加香味并提升肌肉的多汁性, 改善鱼的肌肉品质(Menoyo *et al*, 2004; 邴旭文等, 2005)。Duan 等(2014)研究表明, 饲料中鱼粉含量为 70%时, 棕榈油完全替代鱼油并提升大黄鱼肌肉的持水力和整体风味, 进而改善鱼肉品质。而本研究中, 饲料棕榈酸的添加对大黄鱼鱼肉持水力无显著变化, 可能与大黄鱼规格及鱼体自身的调控有关。

本研究中, 饲料棕榈酸完全替代 EPA 和 DHA, 降低了大黄鱼肌肉质构, 对肌肉持水力和 pH 则无显著影响。持水力是衡量肌肉品质的重要指标(张玉伟等, 2012), 肌肉质构与肌肉持水力有关(Periago *et al*, 2005)。本研究中, 3 个处理组肌肉持水力相比虽无显著差异, 但饲料中添加棕榈酸降低了大黄鱼肌肉的持水力。毛轲(2014)研究表明, 棕榈酸会促使肌细胞凋亡, 破坏成肌细胞肌管形态。因此, 饲料棕榈酸替代 EPA 和 DHA 通过降低持水力影响肌肉质构, 加上棕榈酸可能对大黄鱼肌细胞产生负面作用来共同导致肌肉品质的下降。

### 3.3 饲料棕榈酸/(EPA+DHA)对大黄鱼肌肉抗氧化能力的影响

饲料中棕榈酸/(EPA+DHA)比例不同造成饲料脂肪酸组成和含量的变化, 其对鱼的抗氧化能力产生一定影响(Mu *et al*, 2018)。本研究中, P0 组大黄鱼肌肉的 SOD1 与 CAT 表达水平显著低于 P50 和 P100 组。这与饲料中植物油替代鱼油降低鱼体的抗氧化基因表达水平不一致(Yu *et al*, 2016)。P50 和 P100 组大黄鱼肌肉抗氧化基因表达水平较高, 可能与棕榈酸在鱼体代谢中刺激细胞产生活性 ROS 诱导 *Nrf2* 的表达, 促进抗氧化酶基因转录有关(Joshi-Barve *et al*, 2007)。同时, 饲料中适宜的棕榈酸可以提高饲料的抗氧化性能, 从而被鱼类有效地吸收利用(韩雨哲等, 2010)。*Nrf2* 受到机体中 ROS 氧化应激因子刺激后, 启动下游相应抗氧化相关基因(SOD、CAT 等)的转录, 影响机体抗氧化能力(Xu *et al*, 2015; 胡流芳等, 2016)。

而 P50 组大黄鱼肌肉的 *Nrf2* 基因表达量显著低于 P0 组, P100 组与 P0、P50 组相比无显著差异, 这可能与组内数据差异较大有关, 需进一步探究。

*Nrf2* 相关信号转导对抗氧化酶活性有关键调控作用(Gan *et al*, 2014)。本研究各处理组之间, 大黄鱼肌肉 *Nrf2* 表达水平与 T-AOC 的变化趋势相一致。本研究中, P0 组饲料 EPA+DHA 提升肌肉总抗氧化力, 饲料中适宜 EPA+DHA 可以促进机体产生氧自由基进而增加酶活性保护机体(吉红等, 2011); 而 P50 组大黄鱼肌肉 T-AOC 显著降低, 说明机体抗氧化能力有所下降。本研究中, P50 组大黄鱼肌肉 MDA 含量低于 P0 和 P100 组, 可能是因为鱼肉 n-3/n-6 PUFA 比例不平衡使鱼肉脂质沉淀, 从而导致 MDA 含量增加(Yu *et al*, 2016)。

### 3.4 饲料棕榈酸/(EPA+DHA)投喂下, 大黄鱼肌肉品质与抗氧化能力的关系

Wu 等(2015)研究表明, ROS 引起机体脂质和蛋白质的氧化损伤是造成鱼肉品质下降的主要原因, 而鱼类通过提高抗氧化酶活性和非酶抗氧化物质含量来抵御 ROS, 防止氧化损伤(Tang *et al*, 2013)。棕榈酸可以引起细胞脂毒性促进 ROS 产生, 机体抗氧化酶活性和非酶抗氧化物质含量受到影响, 从而降低鱼的肌肉品质(Gan *et al*, 2014; 郝丽红等, 2016)。因此, 抗氧化酶活性和非酶抗氧化物质含量, 即鱼的抗氧化能力对鱼肉质量比较重要。

本研究中, 饲料棕榈酸完全替代 EPA+DHA, 导致大黄鱼肌肉硬度、内聚性、粘附性和咀嚼性显著下降, 对弹性、pH 和持水力无显著影响。而从肌肉的 T-AOC 和 MDA 含量以及 SOD 和 CAT 活性等反应抗氧化和氧化状态的指标来看, 纯 EPA+DHA 组(P0)与纯棕榈酸组(P100)相比无显著差异。由此可见, 本研究中, 大黄鱼肌肉的质构特性与体内氧化-抗氧化状态的相关性并不强, 就其原因与本研究的棕榈酸或者 EPA+DHA 的梯度设计数量不够多, 有些趋势性现象未表现出有关。因此, 关于饲料棕榈酸/(EPA+DHA)比例所引起的大黄鱼肌肉质构特性的变化与抗氧化之间的关系, 还需要做进一步的研究。

## 4 结论

大黄鱼肌肉脂肪酸组成的变化反映了饲料棕榈酸/(EPA+DHA)比例的变化。较高含量的饲料棕榈酸显著降低了大黄鱼肌肉的硬度、内聚性、粘附性和咀嚼性。饲料棕榈酸/(EPA+DHA)比例显著影响大黄鱼肌肉的总抗氧化力。但大黄鱼肌肉质构特性的变化与

肌肉抗氧化能力的变化未表现出较高相关性,这二者之间的关系还需要进一步研究。

## 参 考 文 献

- BAHURMIZ O M, NG W K. Effects of dietary palm oil source on growth, tissue fatty acid composition and nutrient digestibility of red hybrid tilapia, *Oreochromis* sp. raised from stocking to marketable size. *Aquaculture*, 2007, 262(2/3/4): 382–392
- BELL J G, HENDERSON R J, TOCHER D R, *et al.* Substituting fish oil with crude palm oil in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects muscle fatty acid composition and hepatic fatty acid metabolism. *The Journal of Nutrition*, 2002, 132(2): 222–230
- BING X W, CAI B Y, WANG L P, *et al.* Evaluation of nutritive quality and nutritional components in *Spinibarbus sinensis* muscle. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(2): 211–215 [邴旭文, 蔡宝玉, 王利平. 中华倒刺鲃肌肉营养成分与品质的评价. *中国水产科学*, 2005, 12(2): 211–215]
- CAI Z W, CURTIS L R. Effects of diet on consumption, growth and fatty acid composition in young grass carp. *Aquaculture*, 1989, 81(1): 47–60
- CHEN S R, ZOU L Y, LI L, *et al.* The protective effect of glycyrrhetic acid on carbon tetrachloride-induced chronic liver fibrosis in mice via upregulation of *Nrf2*. *PLoS One*, 2013, 8(1): 1–17
- CHENG M J. Effect of substitution of fish oil by plam oil on growth performance, physiological and biochemical parameters and muscle nutritional quality in *Cynoglossus semilaevis*. Master's Thesis of Tianjin Agricultural University, 2014 [程民杰. 棕榈油替代鱼油对半滑舌鳎生长、生理生化和肌肉营养品质影响的研究. 天津农学院硕士研究生学位论文, 2014]
- DU Z Y. Study on utilization of fat and -oxidation of fatty acid in grass carp. Doctoral Dissertation of Sun Yat-sen University, 2005 [杜震宇. 草鱼对脂肪的利用和对脂肪酸 $\beta$ -氧化的研究. 中山大学博士研究生学位论文, 2005]
- DUAN Q Y, MAI K S, SHENTU J K, *et al.* Replacement of dietary fish oil with vegetable oils improves the growth and flesh quality of large yellow croaker (*Larmichthys crocea*). *Journal of Ocean University of China*, 2014, 13(3): 445–452
- EDEM D O. Palm oil: Biochemical, physiological, nutritional, hematological and toxicological aspects: A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2002, 57(3/4): 319–341
- FONSECA-MADRIGAL J, KARALAZOS V, CAMPBELL P J, *et al.* Influence of dietary palm oil on growth, tissue fatty acid compositions, and fatty acid metabolism in liver and intestine in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Nutrition*, 2005, 11(4): 241–250
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The state of food and agriculture in 2019: Advancing work to reduce food loss and waste, Rome, 2019 [联合国粮农组织. 2019 年粮食与农业状况: 推进工作, 减少粮食损失和浪费, 罗马, 2019]
- GAN L, JIANG W D, WU P, *et al.* Flesh quality loss in response to dietary isoleucine deficiency and excess in fish: a link to impaired *Nrf2*-dependent antioxidant defense in muscle. *PLoS One*, 2014, 9(12): e115129
- GÓMEZ-GUILLÉN M C, MONTERO P, HURTADO O, *et al.* Biological characteristics affect the quality of farmed atlantic salmon and smoked muscle. *Journal of Food Science*, 2000, 65(1): 53–60
- HAN Y Z, JIANG Z Q, REN T J, *et al.* Effects of oxidized fish oil blended with palm oil on antioxidant capacity and histology of Japanese sea bass (*Lateolabrax maculatus*) juvenile. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(4): 798–806 [韩雨哲, 姜志强, 任同军, 等. 氧化鱼油与棕榈油对花鲈肝脏抗氧化酶及组织结构的影响. *中国水产科学*, 2010, 7(4): 798–806]
- HAO L H, ZHANG X Y, ZHANG J M, *et al.* Effects of palmitic acid and stearic acid on genes and protein expressions of heme oxygenase 1 and nuclear transcription factor *Nrf2* in HepG2 cell. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2016, 47(3): 603–608 [郝丽红, 张秀英, 张金铭, 等. 棕榈酸和硬脂酸对 HepG2 细胞血红素加氧酶-1 和核转录因子 *Nrf2* 表达的影响. *畜牧兽医学报*, 2016, 47(3): 603–608]
- HE L Y. Effects of replacing fish oil with soybean oil or plam oil in diets on growth performance, fatty acid composition and fat metabolism of grouper (*Epinephelus coioides*). Master's Thesis of Jimei University, 2019 [何凌云. 大豆油或棕榈油替代鱼油对斜带石斑鱼生长性能、脂肪酸组成及脂肪代谢的影响. 集美大学硕士研究生学位论文, 2019]
- HU B. Application status of giant croaker series compound feed. *China Fisheries*, 2015(3): 48–50 [胡兵. 大黄鱼系列配合饲料的应用现状. *中国水产*, 2015(3): 48–50]
- HU L F, WANG Y, REN R J, *et al.* Anti-oxidative stress actions and regulation mechanisms of Keap1-*Nrf2*/ARE signal pathway. *International Journal of Pharmaceutical Research*, 2016, 43(1): 146–152 [胡流芳, 王迎, 任汝静, 等. Keap1-*Nrf2*/ARE 信号通路的抗氧化应激作用及其调控机制. *国际药学研究杂志*, 2016, 43(1): 146–152]
- JI H, LI J, CHENG X F, *et al.* Dietary effects of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid on growth, lipid accumulation and antioxidation system in juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science)*, 2011, 39(8): 56–62 [吉红, 李杰, 程小飞, 等. 饲料 DHA/EPA 比率对草鱼稚鱼生长、脂质蓄积及抗氧化系统的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(8): 56–62]
- JOSHI-BARVE S, BARVE S S, AMANCHERLA K, *et al.* Palmitic acid induces production of proinflammatory cytokine interleukin-8 from hepatocytes. *Hepatology*, 2007, 46(3): 823–830
- LI B A. Study on fresh quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*)



- O. aureus*). Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2015 [李百安. 大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)、罗非鱼(*Oreochromis niloticus*×*O. aureus*)的肌肉品质研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2015]
- LI S, CHEN C Y, HUANG X X, *et al.* Effect of partial replacement of fish oil with vegetable oil on muscle and liver total lipid and fatty acid of larvae *Larimichthys crocea*. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(5): 726–736 [李桑, 陈春燕, 黄旭雄, 等. 植物油部分替代饲料中鱼油对大黄鱼脂肪及脂肪酸的影响. 上海海洋大学学报, 2015, 24(5): 726–736]
- LIU X Z, XU Y J, LI R, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional composition of the muscle of yellowtail kingfish (*Seriola aureovittata*). Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(1): 128–135 [柳学周, 徐永江, 李荣, 等. 黄条鲷(*Seriola aureovittata*)肌肉营养组成分析与评价. 渔业科学进展, 2017, 38(1): 128–135]
- 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. Methods: A Companion to Methods in Enzymology, 2001, 25(4): 402–408
- GAN L, JIANG W D, WU P, *et al.* Flesh quality loss in response to dietary isoleucine deficiency and excess in fish: A link to impaired *Nrf2*-dependent antioxidant defense in muscle. PLoS One, 2014, 9(12): 1–23
- MAO K. A preliminary study on the expression and mechanism of palmitic acid affecting musclin. Master's Thesis of Harbin Institute of Technology, 2014 [毛轲. 棕榈酸影响肌肉素基因的表达及其机制的初步研究. 哈尔滨工业大学硕士研究生学位论文, 2014]
- MENG Y Q, MA R, SHENTU J K, *et al.* Comparative studies on the quality of wild and formulated diet-fed large yellow croaker (*Larimichthys crocea*). Journal of Ocean University of China (Natural Science), 2016, 46(11): 108–116 [孟玉琼, 马睿, 申屠基康, 等. 野生和配合饲料养殖大黄鱼品质的比较研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(11): 108–116]
- MENOYO D, IZQUIERDO M S, ROBAINA L E, *et al.* Adaptation of lipid metabolism, tissue composition and flesh quality in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) to the replacement of dietary fish oil by linseed and soyabean oils. The British Journal of Nutrition, 2004, 92(1): 41–52
- MU H, SHEN H H, LIU J H, *et al.* High level of dietary soybean oil depresses the growth and antioxidative capacity and induces inflammatory response in large yellow croaker *Larimichthys crocea*. Fish and Shellfish Immunology, 2018, 77(1): 465–473
- MU H, WEI Z H, YI L N, *et al.* Dietary fishmeal levels affect the volatile compounds in cooked muscle of farmed large yellow croaker *Larimichthys crocea*. Aquaculture Research, 2017, 48(12): 1–14
- OLSEN R E, MYKLEBUST R, RINGØ E, *et al.* The influences of dietary linseed oil and saturated fatty acids on caecal enterocytes in Arctic char (*Salvelinus alpinus* L.): A quantitative ultrastructural study. Fish Physiology and Biochemistry, 2000, 22: 207–216
- PERIAGO P L, AYALA M D, LOPEZALBORS O, *et al.* Muscle cellularity and flesh quality of wild and farmed sea bass, *Dicentrarchus labrax* L. Aquaculture, 2005, 249(1/2/3/4): 175–188
- REGOST C, JAKOBSEN J V, RORA A M B. Flesh quality of raw and smoked fillets of Atlantic salmon as influenced by dietary oil sources and frozen storage. Food Research International, 2004, 37(3): 259–271
- SU X F, SHAO Q J. The role of polyunsaturated fatty acids in fish nutrition and feed and its oxidation stability. Feed Research, 2002(3): 11–14 [苏小凤, 邵庆均. 多不饱和脂肪酸在鱼类营养与饲料中的作用及其氧化稳定性. 饲料研究, 2002(3): 11–14]
- TANG Q Q, FENG L, JIANG W D, *et al.* Effects of dietary copper on growth, digestive, and brush border enzyme activities and antioxidant defense of hepatopancreas and intestine for young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). Biological Trace Element Research, 2013, 155(3): 370–380
- United States Department of Agriculture (USDA) Foreign Agricultural Service, 2019. <https://ipad.fas.usda.gov/cropeplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000>
- WU Y P, FENG L, JIANG W D, *et al.* Influence of dietary zinc on muscle composition, flesh quality and muscle antioxidant status of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella* Val.). Aquaculture Research, 2015, 46(10): 2360–2373
- XU H G, ZHANG Y J, WANG J, *et al.* Replacement of fish oil with linseed oil or soybean oil in feeds for Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus*: Effects on growth performance, immune response, and tissue fatty acid composition. Journal of the World Aquaculture Society, 2015, 46(4): 349–362
- YU E M, FU B, WANG G J, *et al.* Proteomic and metabolomic basis for improved textural quality in crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* C. et V) fed with a natural dietary pro-oxidant. Food Chemistry, 2020, 325: 126906
- YU H B, GAO Q F, DONG S L, *et al.* Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids (HUFAs) on growth, fatty acid profiles, antioxidant capacity and immunity of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). Fish and Shellfish Immunology, 2016, 54: 211–219
- ZHANG D F, WU L, ZHANG X Z, *et al.* Nutrient components and texture profiles in the flesh of Atlantic salmon, triploid rainbow trout, and golden trout. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(2): 186–194 [张殿福, 吴雷, 张学振, 等. 大西洋鲑、三倍体虹鳟和金鳟的肌肉营养成分与品质特性. 中国水产科学, 2020, 27(2): 186–194]
- ZHANG Y W, LUO H L, JIA H N, *et al.* Effect factors of water holding capacity of meats and its potential mechanism. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2012, 24(8): 1389–1396 [张玉

伟, 罗海玲, 贾慧娜, 等. 肌肉系水力的影响因素及其可能机制. 动物营养学报, 2012, 24(8): 1389–1396]  
ZHENG J M, ZHAO J J, CHEN S Q, *et al.* Growth and fatty acid composition of juvenile spotted halibut (*Verasper variegatus*)

fed diets with fish oil replaced by soybean oil. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(4): 39–46 [郑建明, 赵捷杰, 陈四清, 等. 豆油替代鱼油对圆斑星鲈幼鱼生长和肌肉脂肪酸的影响. 渔业科学进展, 2019, 40(4): 39–46]

(编辑 陈 严)

## Effects of Palmitic acid/(EPA+DHA) Ratios on Anti-oxidative Capacity and Muscle Quality of Large Yellow Croaker *Larimichthys crocea*

MENG Wei, WANG Qi, MU Hua, GONG Yu, SHEN Yawen,  
SUN Yunxia, ZHANG Wenbing<sup>①</sup>, MAI Kangsen

(The Key Laboratory of Aquaculture Nutrition and Feeds (Ministry of Agriculture and Rural Affairs),  
the Key Laboratory of Mariculture (Ministry of Education), Fisheries College, Ocean University of  
China, Qingdao, Shandong 266003, China)

**Abstract** This study explored the effects of dietary palmitic acid/(docosahexaenoic acid [DHA] and eicosapentaenoic acid [EPA]) on the anti-oxidative capacity and muscle quality of large yellow croaker (initial weight:  $30.51 \pm 0.16$  g). Fish meal and soybean meal were used as the main dietary protein sources. DHA rich oil, EPA-rich oil, palmitic acid, and lecithin were used as the main dietary lipid sources. Three isonitrogenous (43% crude protein) and isolipidic (11% crude lipid) experimental diets were formulated to have 1 : 5, 1 : 1, and 5 : 1 palmitic acid/(EPA+DHA) ratios, and called P0, P50, and P100, respectively. The feeding trial lasted for 10 weeks. Results showed that there was no significant difference in the growth rate among the three groups ( $P > 0.05$ ). Compared with the P100 group, the hardness, adhesiveness, cohesiveness, and chewiness of muscle in large yellow croaker fed P0 and P50 were significantly higher ( $P < 0.05$ ). Muscle polyunsaturated fatty acid (PUFA) content in the P0 group was significantly higher than that in the P50 and P100 groups ( $P < 0.05$ ). The saturated fatty acid (SFA) content of the P100 group was significantly higher than that in the P0 and P50 groups ( $P < 0.05$ ). The expression levels of superoxide dismutase 2 gene (*SOD2*) and catalase gene (*CAT*) in the muscle of the P100 group were significantly higher than those in the P0 and P50 groups ( $P < 0.05$ ). The gene expression level of muscle nuclear factor E2-related factor 2 gene (*Nrf2*) in the P0 group was significantly higher than that in the P50 group ( $P < 0.05$ ); however, there was no significant difference either between the P100 and P0 groups or between the P100 and P50 groups ( $P > 0.05$ ). There was no significant difference among the three groups in the expression level of superoxide dismutase 1 gene (*SOD1*) in muscle ( $P > 0.05$ ). The total anti-oxidative capacity (T-AOC) of muscle in the large yellow croaker fed P50 was significantly lower than that in the P0 and P100 groups ( $P < 0.05$ ). The activities of total superoxide dismutase (T-SOD) and CAT, and malondialdehyde (MDA) content of muscle showed no significant differences among all the groups ( $P > 0.05$ ). In conclusion, higher antioxidative capacity was found in muscle when large yellow croaker juveniles were fed with higher levels of dietary palmitic acid or (EPA+DHA). Higher dietary palmitic acid levels decreased the texture parameters in muscle.

**Key words** Large yellow croaker; Muscle quality; Anti-oxidative capacity; Palmitic acid; EPA+DHA

① Corresponding author: ZHANG Wenbing, E-mail: wzhang@ouc.edu.cn