

doi: 10.7541/2024.2024.0198

全植物蛋白饲料的营养及非营养性优化对大口黑鲈肌肉营养成分及质构特性的影响

张宝平 董智勇 康嘉铭 王 渤 蔡万杰 时 博 张月星

(浙江海洋大学国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 海洋科学与技术学院, 舟山 316022)

摘要: 实验研究了全植物蛋白饲料的营养及非营养性优化对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)肌肉营养成分和质构特性的影响。共设计了9种实验饲料, 分别为鱼粉对照组(FFH)、全植物蛋白组(PFH)、软化组(PFS)、二甲基-β-丙酸噻亭(DMPT)组(PFD)、牛磺酸组(PFT)、胆固醇鱼油组(PFC)、豆油组(PSH)、胆固醇豆油组(PSC)及综合组(PFA)。在室内循环水系统中对初始均重为(78.1±6.60) g的大口黑鲈进行了为期50d的饲喂。结果显示: PFH组肌肉脂肪含量显著高于FFH组, 而肌肉硬度、黏附性、弹性、胶黏性和咀嚼性则显著低于FFH组。在PFD、PFT、PFC、PFA和PSH组等采用营养性优化组别的肌肉脂肪含量显著低于PFH组。相较PFH组, PFD组肌肉黏附性、胶黏性和咀嚼性显著升高, PFT组肌肉硬度和胶黏性显著升高, PFC和PFA组肌肉硬度、胶黏性和咀嚼性显著升高, PSH组肌肉硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性显著升高。而在采用非营养性优化方面, 相比于PFH组, PFS组肌肉硬度、黏附性、胶黏性和咀嚼性显著升高。与PSH组相比, PSC组肌肉弹性显著降低。相关性分析结果表明, 肌肉硬度、黏附性、胶黏性和咀嚼性与脂肪含量呈负相关关系; 肌肉硬度与弹性、胶黏性及咀嚼性呈正相关关系, 弹性与胶黏性和咀嚼性呈正相关关系, 胶黏性与咀嚼性呈正相关关系。上述结果表明, 在全植物蛋白饲料中添加诱食剂(DMPT)、牛磺酸、胆固醇及以豆油替代鱼油等策略可部分改善因全植物蛋白摄入引起的大口黑鲈肌肉品质下降问题。实验结果可为全植物蛋白在水产养殖中的应用和大口黑鲈养殖产业的可持续发展提供参考依据。

关键词: 全植物蛋白; 营养成分; 质构特性; 优化策略; 大口黑鲈

中图分类号: S965.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)09-1519-09



水产养殖业发展迅猛, 导致其对鱼粉的需求与日俱增, 寻找来源广泛、价格低廉的鱼粉替代物成为近年来的研究热点。目前, 常见的用于替代鱼粉的蛋白源包括动物性蛋白源、植物性蛋白源及新型蛋白源。动物性蛋白源虽具营养价值高、适口性好、氨基酸平衡性佳等优点, 但由于其原料及成分不稳定导致的产品品质波动大等原因, 进而限制了其广泛使用。植物蛋白因其来源广泛、营养品质相对稳定、价格低廉等优点, 成为水产饲料中替代鱼粉的首选蛋白源。但植物蛋白源存在适口性差、含有抗营养因子和氨基酸不平衡等一系列问题, 使得其高水平替代鱼粉使用并未取得良好效

果。因此, 以营养及非营养手段提高植物性蛋白的替代效果是提高植物蛋白源利用效率的可行方式之一。

植物蛋白替代鱼粉后对水产动物肌肉品质的影响也逐渐受到关注。在大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)上的研究表明, 以不同梯度的棉籽浓缩蛋白替代鱼粉, 与对照组(0%)相比, 45%替代组对鱼体的生长性能、肌肉营养、质构特性及抗氧化能力的没有显著影响, 但高比例(70%)替代会降低大口黑鲈的生长和肌肉品质^[1]。分别以0(对照组)、3%、6%、12%、15%、18%酶解鸡肉粉替代鱼粉后发现, 6%酶解鸡肉粉可改善珍珠龙胆石斑鱼(*E. fus-*

收稿日期: 2024-05-17; 修订日期: 2024-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(32202947)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32202947)]

作者简介: 张宝平(1997—), 女, 硕士研究生; 主要从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: 2456447136@qq.com

通信作者: 张月星, 男, 教授; E-mail: yuexing.zhang@zjou.edu.cn

coguttatus ♀ × *E. lanceolatus* ♂)背肌系水力和质构特性^[2]。在凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的研究中发现用棉籽浓缩蛋白替代饲料中不同比例(25%、50%、75%和100%)的鱼粉对凡纳滨对虾的体色、肌肉质构特性(硬度、弹性、黏聚性、咀嚼性、剪切力)和常规成分均无显著影响^[3]。在卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)饲料中使用脱酚棉籽粕替代鱼粉后,发现20%替代组的鱼体肌肉胶着性和咀嚼性显著下降,40%和60%替代组肌肉内聚性显著提高,硬度、胶着性、弹性、胶黏性、咀嚼性、回复性出现显著下降^[4]。此外,饲料中不同的脂肪源对养殖动物的肌肉品质也有一定的影响。饲料中以棕榈油作为脂肪源显著降低黄姑鱼(*Nibea albiglora*)肌肉的系水力和回复力^[5]。另一项研究报道饲料中以豆油作为脂肪源显著降低了青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)的肌肉弹性^[6]。

目前,全植物蛋白饲料的多种营养优化策略被提出以缓解或消除低鱼粉带来的负面影响。牛磺酸已被确定为低动物蛋白饲料中的第一限制性氨基酸^[7],因此,在全植物蛋白饲料中添加外源性牛磺酸具有一定的必要性。许多研究表明全植物蛋白饲料会抑制鱼体对胆固醇和胆汁酸的利用,一方面是因为植物蛋白饲料中缺乏胆固醇,另一方面是由于抗营养因子的存在抑制了养殖动物机体对营养物质的消化和吸收^[8]。为了解决全植物蛋白饲料适口性差的问题,添加诱食剂或对饲料颗粒进行预软化处理是一种行之有效的策略。二甲基-β-丙酸噻亭(Dimethyl-β-propiothetin, DMPT)具有改善饲料适口性和提高饲料利用率的作用,具体机制在于DMPT刺激养殖动物的嗅觉、味觉,从而促进动物摄食和消化酶的分泌^[9]。已有实验证明DMPT对草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[10]、慈鲷(*Labidochromis caeruleus*)^[11]、异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)^[12]的生长和摄食均有不同程度的促进作用。此外,在花鲈(*Lateolabrax maculatus*)上的研究发现饲料颗粒的含水量过低会降低养殖鱼类的摄食率^[13],本实验室前期的研究也发现大口黑鲈对高硬度饲料的采食积极性较差。

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)是一种典型的肉食性鱼类,因其具有生长速度快、适应性强、经济价值高等特点,在我国广东、浙江、江苏等地区被广泛养殖^[14]。大口黑鲈对蛋白质的需求量较高,且其饲料中的蛋白源主要是鱼粉^[15]。目前已有许多研究报道了棉籽浓缩蛋白^[16]、发酵豆粕^[17]、豆粕^[18]等植物性蛋白源替代鱼粉对大口黑鲈生长性能、免疫水平和肠道健康的影响,然而关于植物

蛋白源替代饲料中的鱼粉对大口黑鲈肌肉品质的影响还鲜有报道,饲料中全植物蛋白替代鱼粉对大口黑鲈肌肉品质的影响研究则更为缺乏。因此,本实验旨在探究以营养及非营养性策略优化全植物蛋白饲料对大口黑鲈肌肉营养成分及质构特性的影响,以期在全植物蛋白在水产饲料中的合理应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

本实验的饲料制作分两个阶段,即膨化制粒和真空喷涂。先制得两种膨化饲料颗粒,即全植物蛋白饲料(PPD)颗粒及鱼粉对照饲料(FMD)颗粒,膨化阶段的配方见表1。

膨化制粒在布勒(常州)机械有限公司实验工厂合作完成,流程如下:所有干粉原料经粗粉(锤片式粉碎机DFZX140,布勒)过0.8 mm筛,与预混料充分混合(AHML1000,布勒)后再进行超微粉碎(超微粉

表 1 实验饲料膨化配方(以干基计)
Tab. 1 Formulation of extruded diets (DM basis)

原料Ingredient (g/kg)	植物蛋白组 PPD ¹	鱼粉组 FMD ²
秘鲁鱼粉Peruvian fish meal	0	162.40
国产鱼粉Chinese fish meal	0	163.52
大豆浓缩蛋白Soy protein concentrate	223.13	147.17
豆粕Soybean meal	108.21	185.31
面粉Wheat flour	128.29	125.35
谷朊粉Wheat gluten	317.95	119.91
菜粕Rapeseed meal	0	16.35
玉米蛋白粉Corn gluten meal	152.84	51.24
葵花籽粕Sunflower meal	0	5.45
磷酸二氢钙Mono-calcium phosphate	33.47	5.45
多维多矿预混料Vita & Mineral premix ³	5.58	5.45
赖氨酸L-Lysine-HCl (98.5%)	23.43	5.45
氯化胆碱(50%) Choline chloride	3.90	3.82
维生素E Vitamin E	0.22	0.22
维生素C Vitamin C	1.23	1.20
防霉剂Mould Inhibitor	1.12	1.09
抗氧化剂Antioxidants	0.52	0.51
氧化钇Y ₂ O ₃	0.11	0.11
总计Total	1000	1000

注: ¹植物蛋白饲料(PPD)用于PFA、PFC、PFD、PFH、PFT、PSC和PSH组喷涂; ²鱼粉饲料(FMD)用于FFH组喷涂; ³多维多矿预混料详见Zhang等^[19]的研究

Note: ¹Plant protein diet (PPD) includes the PFA, PFC, PFD, PFH, PFT, PSC, and PSH groups; ²Fish meal diet (FMD) includes the FFH group; ³Vita & mineral premix is described in detail previously^[19]

碎机AHFL 110, 布勒); 超微粉碎后的物料经由湿式双螺杆膨化机(BCCG62 TSE)膨化制粒并温和干燥(干燥机BDBDP2G0.5C, 布勒)。后期优化用的成分及油脂的添加则在浙江海洋大学中欧水产动物营养与饲料资源研究所完成。采用真空喷涂的方式(真空喷涂机ZJB-100, 诸城市鑫得利食品机械有限公司)进行。喷涂配方详见表 2。其中, 胆固醇预先与喷涂用油脂充分混合后再喷入饲料颗粒, 牛磺酸和DMPT则预先用双蒸水充分溶解后喷入饲料颗粒。具体喷涂处理如下: 全植物蛋白组(PFH)是PPD颗粒喷涂冬化鱼油所得; 软化组(PFS)是PFH饲料在投喂前12h喷雾添加10%的双蒸水进行预软化所得; 诱食剂组(PFD)是PPD颗粒喷涂 0.6 g/kg DMPT水溶液和鱼油所得; 牛磺酸组(PFT)是PPD颗粒喷涂 5 g/kg牛磺酸水溶液和鱼油所得; 胆固醇组(PFC)是PPD颗粒喷涂 5 g/kg胆固醇和鱼油混合物所得; 豆油组(PSH)是PPD颗粒喷涂相应量豆油所得; 豆油胆固醇组(PSC)是PPD颗粒喷涂 5 g/kg胆固醇和豆油混合物所得; 综合组(PFA)是PPD颗粒喷涂0.6 g/kg DMPT、5 g/kg牛磺酸、5 g/kg胆固醇, 并在饲喂前12h喷雾添加10%的双蒸水进行预软化所得; 鱼粉对照组(FFH)则是FMD颗粒喷涂鱼油所得。

1.2 实验鱼养殖与管理

本研究实验鱼采购于浙江省湖州市吴兴区本

澳农业科技有限公司。养殖实验在浙江海洋大学中欧水产动物营养与饲料资源研究所室内循环水养殖系统中进行。实验开始前将所有实验鱼饥饿24h, 随后使用麻醉剂MS-222 (浓度90 mg/L)对实验鱼进行麻醉处理, 挑选大小均一、体态健康的1215尾实验鱼, 随机分配到27个养殖桶中, 每组设3个重复, 每缸45尾, 初始均重为(78.1±6.60) g。每日投喂3次(8:00、14:00和20:00), 至表观饱食, 每餐后收集剩余浮性残饵并计数定量。养殖周期为50d, 养殖期间各缸的有效水体均保持在850 L左右, 水温26.1—29.3℃、溶氧(DO)>4.8 mg/L、pH 6.5—7.0、氨氮<0.2 mg/L、亚硝酸盐<0.1 mg/L。

1.3 样本采集

在饲喂实验结束后, 所有实验鱼饥饿24h, 捞出后用MS-222麻醉。每缸随机挑选10尾实验鱼, 在每尾鱼右侧背肌处取1 cm³的小块样本测定质构指标, 切取左侧相同部位背肌样本冻干处理, 用于后续肌肉成分测定。

1.4 肌肉成分分析

肌肉经冷冻干燥(SJIA-10N-50A, 宁波双嘉仪器有限公司)后测定其成分。粗脂肪测定采用索氏抽提法(Soxhlet, OPSIS, 瑞典), 乙醚为抽提溶剂; 粗蛋白测定采用凯氏定氮法(KD310, OPSIS, 瑞典)测定。

表 2 实验饲料喷涂配方及化学组分(以干基计)

Tab. 2 Formulation for post-coating and chemical composition of experimental diet (DM basis)

原料Ingredient (g/kg)	PFH	PSH	PFD	PFT	PFC	PSC	PFA	FFH
PPD膨化颗粒	896.60	896.60	896.00	891.60	896.60	896.60	891.00	
FMD膨化颗粒								916.73
溴代DMPT Br-DMPT			0.60				0.60	
牛磺酸Taurine				5.00			5.00	
胆固醇Cholesterol					5.00	5.00	5.00	
海产鱼油Marine fish oil	103.40		103.40	103.40	98.40		98.40	83.27
豆油Soybean oil		103.40				98.40		
总计Total	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
化学组分Chemical composition (g/kg)								
干物质Dry matter	932.74	926.76	923.65	930.96	910.82	907.53	908.32	930.79
粗蛋白Crude protein	546.01	544.74	544.71	543.49	542.40	543.54	542.82	537.55
粗脂肪Total lipid	134.50	139.92	140.09	142.54	133.97	133.50	133.11	141.84
灰分Ash	60.85	61.32	60.12	59.86	59.60	60.60	59.46	82.62
磷Phosphorus	12.97	12.79	12.53	12.72	12.65	12.63	12.54	12.27
总能Gross energy (MJ/kg)	22.22	22.45	22.54	22.42	22.83	22.91	22.91	22.01

注: FFH. 鱼粉组(鱼粉+鱼油); PFH. 植物蛋白组(植物蛋白+鱼油); PFD. 诱食剂组(0.6 g/kg DMPT+鱼油); PFT. 牛磺酸组(5 g/kg牛磺酸+植物蛋白+鱼油); PFC. 胆固醇组(5 g/kg胆固醇+植物蛋白+鱼油); PSH. 豆油组(植物蛋白+豆油); PSC. 豆油胆固醇组(植物蛋白+胆固醇+豆油); PFA. 综合组(植物蛋白+0.6 g/kg DMPT+5 g/kg牛磺酸+5 g/kg胆固醇+鱼油)

Note: FFH. fish meal+fish oil; PFH. plant protein+fish oil; PFD. plant protein+fish oil+DMPT; PFT. plant protein+fish oil+taurine; PFC. plant protein+fish oil+cholesterol; PSH. plant protein+soybean oil; PSC. plant protein+soybean oil+cholesterol; PFA. plant protein+fish oil+DMPT+taurine+cholesterol

1.5 肌肉质构测定

肌肉质构检测参数包括: 硬度、黏附性、内聚性、弹性、胶黏性及咀嚼性。均采用质构仪(TMS-Pilot, FTC, 美国)和75 mm的圆盘挤压探头(TMS-75mm, FTC, 美国)进行测定。参数设置: 形变比30%, 测试速度1 mm/s, 接触感应力1 gf。

1.6 统计分析

所有数据使用SPSS 22.0软件进行统计分析。试验结果采用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行差异显著性检验, 然后进行独立样本 t 检验。本研究所有数据表示为的平均值($n=3$)和标准差, 星号表示处理组间的差异显著($P<0.05$)。所有处理组分别与FFH和PFH进行比较。此外, 对PSH组和PSC组单独进行 t 检验, 以评估在大豆油和全植物性饲料中添加胆固醇后的影响。

2 结果

2.1 肌肉营养成分

由图1可知, PFS、PFD、PFT、PFC、PFA和PSH组肌肉的水分含量与PFH组无显著差异($P>0.05$), 但PFA组水分含量显著低于FFH组($P<0.05$)。所有处理组的粗蛋白含量相较FFH及PFH组无显著差异($P>0.05$)。PFD、PFT、PFC和PSH组脂肪含量显著低于PFH组($P<0.05$), PFA和PFS组则与PFH组无显著差异($P>0.05$)。PSC组脂肪含量与PSH组无显著差异($P>0.05$), 但PFH、PFC、PFA和PSH组脂肪含量显著高于FFH组($P<0.05$)。

2.2 肌肉质构指标

由图2可知, PSC组肌肉硬度最高, PFH组硬度最低。PFS、PFT、PFC、PFA和PSH组硬度显著高于PFH组($P<0.05$), 而PFD与PFH组无显著差异($P>0.05$)。PFS组肌肉黏附性最高, PFC组最低。PFS和PFD组黏附性显著高于PFH组($P<0.05$), 而其他处理组与PFH组无显著差异($P>0.05$)。所有处理组肌肉内聚性均无显著差异($P>0.05$)。PSH组肌肉弹性最高, PFT组弹性最低。相较PFH组, PSH组弹性显著提高($P<0.05$), 而PFD、PFT、PFC、PFA和PFS组相较PFH组无显著差异($P>0.05$)。PSH、PFD、PFT、PFC、PFA和PFS组肌肉胶黏性显著高于PFH组($P<0.05$)。在所有处理组中, PFH组肌肉咀嚼性最低, PSH、PFD、PFC、PFA和PFS组显著高于PFH组($P<0.05$), 而PFT与PFH组间无显著差异($P>0.05$)。PSH与PSC组相比, 两组间仅弹性有显著差异($P<0.05$), 其他指标均无显著差异($P>0.05$)。与FFH组相比, PFH、PFD、PFT和PFC组硬度显著降低($P<0.05$), 而其他组与FFH组无显著差异($P>0.05$)。PFH、PFT、PFC、PFA、PSH和PSC组黏附性显著低于FFH组($P<0.05$)。PFD组内聚性显著低于FFH组($P<0.05$), 其他处理组与FFH组无显著差异($P>0.05$)。PFC和PSH组弹性与FFH组无显著差异($P>0.05$), 而其他处理组均显著低于FFH组($P<0.05$)。PFH、PFD和PFT组的胶黏性显著低于FFH组($P<0.05$), 其他处理组则与FFH组无显著差异($P>0.05$)。PFA和PSC组咀嚼性与FFH组无显著差异($P>0.05$),

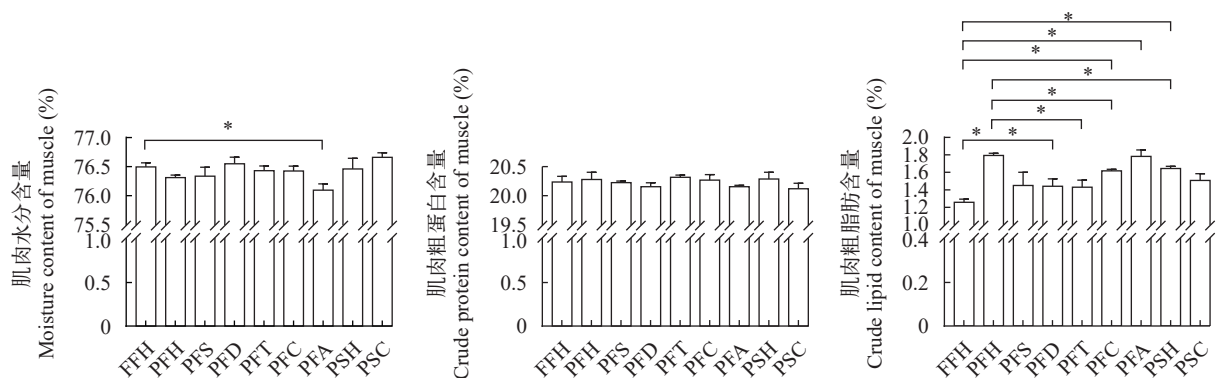


图1 不同实验饲料对大口黑鲈肌肉组成的影响

Fig. 1 Effects of different diets on muscle composition of *Micropterus salmoides*

采用两两比较方式, “*”表示两组间具有显著差异($P<0.05$); FFH. 鱼粉对照组(鱼粉+鱼油); PFH. 全植物蛋白组(植物蛋白+鱼油); PFS. 软化不限食组(植物蛋白+鱼油+软化不限食); PFD. 诱食剂组(Br-DMPT+鱼油); PFT. 牛磺酸组(植物蛋白+牛磺酸+鱼油); PFC. 胆固醇组(植物蛋白+胆固醇+鱼油); PFA. 综合组(植物蛋白+Br-DMPT+牛磺酸+胆固醇+鱼油+软化处理); PSH. 豆油组(植物蛋白+豆油); PSC. 豆油胆固醇组(植物蛋白+胆固醇+豆油); 下同

“*” indicate significant different ($P<0.05$) between mean values; FFH. fish meal+fish oil; PFH. plant protein+fish oil; PFS. plant protein+fish oil+soften process; PFD. plant protein+fish oil+DMPT; PFT. plant protein+fish oil+taurine; PFC. plant protein+fish oil+cholesterol; PFA. plant protein+fish oil+DMPT+taurine+cholesterol; PSH. plant protein+soybean oil; PSC. plant protein+soybean oil+cholesterol+soften process; The same applies below

而其余处理组均显著低于FFH组($P<0.05$)。

2.3 肌肉营养成分与各质构指标间的相关性分析

由表 3 可知, 硬度、胶黏性、咀嚼性分别与肌肉脂肪含量呈现显著负相关关系($P<0.05$), 黏附性与肌肉脂肪含量呈现极显著负相关关系($P<0.01$)。肌肉硬度、黏附性、内聚性、弹性、胶黏性和咀嚼性与肌肉水分及蛋白含量相关性不显著($P>0.05$)。

2.4 肌肉质构指标间的相关性分析

由表 4 可知, 肌肉硬度与弹性、胶黏性及咀嚼性呈现显著正相关关系($P<0.05$)。弹性与胶黏性和咀嚼性呈现显著正相关关系($P<0.05$)。胶黏性与咀嚼性呈现显著正相关关系($P<0.05$)。黏附性、内聚

性与其他3个指标相关性不显著($P>0.05$)。

3 讨论

肌肉的质构特性是养殖动物肌肉品质评价的重要组成部分, 包括硬度、黏附性、内聚性、弹性、胶黏性和咀嚼性等多个参数^[20]。通常认为, 硬度能够体现养殖鱼类肌肉的软硬程度, 反映出鱼肉抵抗弹性形变、塑形变形或被破坏的能力; 黏附性指探头脱离肌肉样本所需要的能量, 黏附性升高表明咀嚼时鱼肉与口腔之间的黏度增加; 内聚性指咀嚼时, 鱼肉紧密连接以保持完整的性状, 反映出肌肉内部结合键的强度; 弹性反映鱼肉在外力作用下

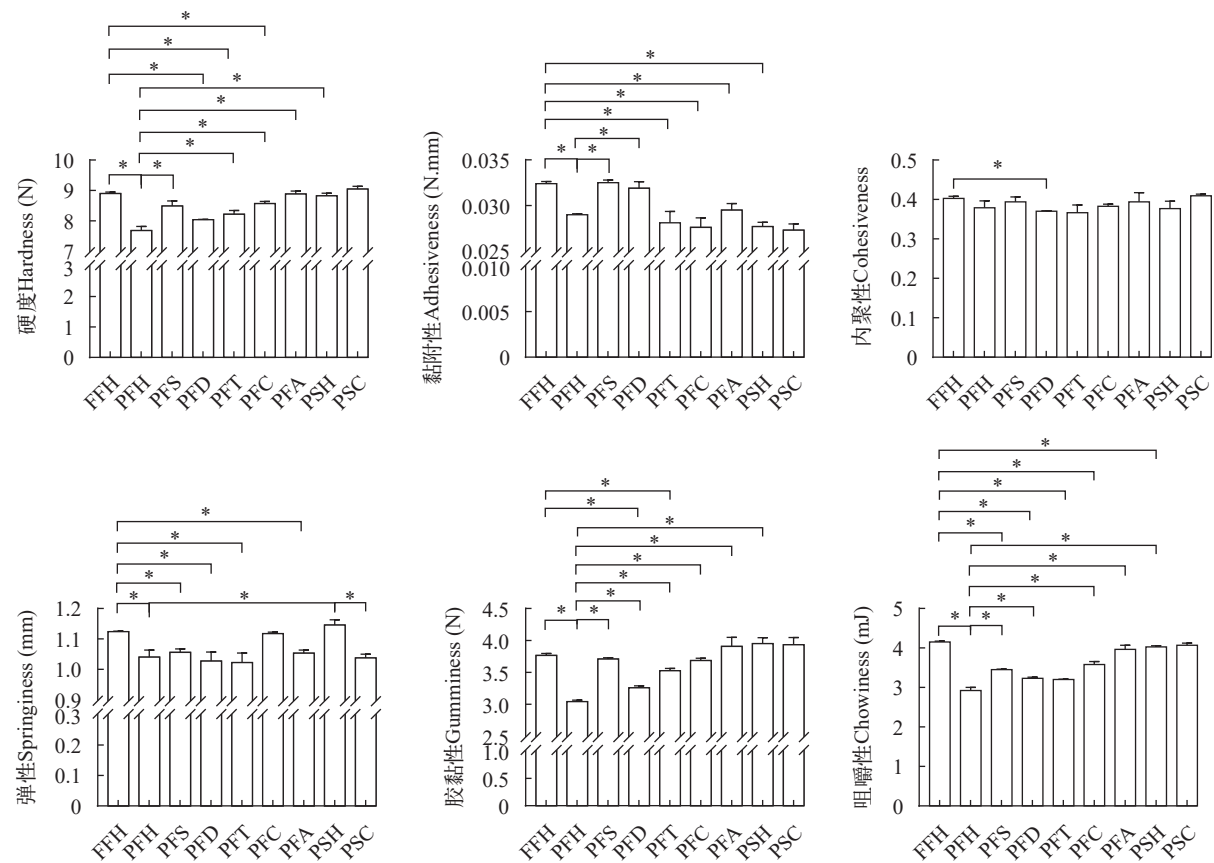


图 2 不同实验饲料对大口黑鲈肌肉质构指标的影响
Fig. 2 Muscle texture indices of *Micropterus salmoides* fed experimental diet

表 3 大口黑鲈肌肉营养成分与各质构指标的相关性分析

指标Index	相关系数Correlation coefficient					
	硬度Hardness	黏附性Adhesiveness	内聚性Cohesiveness	弹性Springiness	胶黏性Gumminess	咀嚼性Chewiness
水分Moisture	0.067	-0.145	0.452	0.097	0.029	0.073
蛋白Protein	-0.269	0.077	-0.016	0.161	-0.206	-0.237
脂肪Lipid	-0.517*	-0.615**	-0.319	-0.047	-0.529*	-0.497*

注: *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$); 下同
Note: “*” indicate significant different ($P<0.05$), “**” indicate extreme significant different ($P<0.01$); The same applies below

变形后恢复能力。通常新鲜鱼肉弹性较高,而变质后的鱼肉则弹性较差。因此,弹性也是评价鱼肉新鲜程度的重要参考;咀嚼性则是评价肌肉质构特性的综合性指标。模拟咀嚼鱼肉样品时所需的咬劲,是肌肉硬度、细胞间凝聚力和弹性等综合作用的结果^[21, 22]。本实验发现相比于鱼粉饲料,用全植物蛋白饲料饲喂50d后,导致大口黑鲈肌肉的硬度、黏附性、弹性、胶黏性和咀嚼性均显著降低。于晓彤等^[23]的研究也发现类似结果,用高比例的豆粕和大豆浓缩蛋白替代饲料中的鱼粉(80%和100%)饲喂草鱼后,其肌肉的硬度、黏性、咀嚼性、回弹力、滴水损失及剪切力均出现显著降低。

此外,鱼肉质构特性与鱼体营养成分具有一定的相关性。已有研究报道,肌肉的硬度与水分含量呈负相关,与脂肪含量呈正相关关系,内聚性与肌肉的粗蛋白含量呈负相关关系,胶黏性与粗脂肪含量呈正相关关系,与蛋白含量呈负相关关系^[24]。而本实验的结果发现大口黑鲈肌肉的硬度、黏附性、胶着性和咀嚼性则与脂肪含量呈现显著的负相关。该结果可能是由于脂肪优先沉积在肌肉的结缔组织中,过多的脂肪沉积进而引发大口黑鲈肌肉质构参数变化所导致^[25]。由此可见,饲喂全植物蛋白饲料降低了大口黑鲈肌肉的硬度、黏附性、弹性、胶黏性和咀嚼性等质构指标,从而引起肌肉品质的下降,其原因可能与全植物蛋白饲料提高大口黑鲈肌肉脂肪含量有关。

在草鱼中的研究发现,饲料中添加Br-DMPT显著提高了鱼体肌肉营养价值和风味物质含量,且肌肉的剪切力随Br-DMPT的添加量呈现先降后升的趋势^[10]。邹青等^[26]研究发现在饲料中添加DMPT显著降低了吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)肌肉脂肪含量。本实验亦发现相似结果,在饲料中添加Br-DMPT显著降低大口黑鲈肌肉的脂肪含量,提高肌肉黏附性、胶黏性和咀嚼性,表明DMPT具有改善因饲料中全植物蛋白所引起的大口黑鲈肌肉品质降低的效果。饲料中添加牛磺酸显著提高了大

菱鲆(*Scophthalmus maximus*)幼鱼肌肉的硬度、黏附性、弹性及咀嚼性^[27]。Shi等^[28]在东方红鲮鲃(*Takifugu rubripes*)的研究中发现添加牛磺酸显著降低肌肉脂肪含量。本实验亦发现相似结果,全植物蛋白饲料中添加牛磺酸显著降低了肌肉的脂肪含量,并提高肌肉硬度和胶黏性。这可能是由于牛磺酸增加了与脂肪代谢相关的酶类的活性,促进了脂肪氧化分解的速率^[29]。此外,本实验结果发现全植物蛋白饲料中添加胆固醇显著降低大口黑鲈肌肉脂肪含量,提高大口黑鲈肌肉硬度、胶黏性和咀嚼性。胆固醇是胆汁酸合成的前体物质,因此胆固醇的添加可以促进大口黑鲈胆汁酸合成及脂质代谢,从而减少鱼体脂肪沉积。已有研究发现饲料中添加一定浓度的胆汁酸可降低大口黑鲈肌肉的粗脂肪含量^[30],该结论可验证本实验的结果。Mustafa Yildiz等^[31]的研究发现相比于鱼油,全植物油(芝麻油、葵花籽油和亚麻籽油)显著降低了虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)肌肉的脂肪含量。本研究也发现相似的结果,全植物蛋白饲料中以豆油替代鱼油可显著降低大口黑鲈肌肉粗脂肪含量,鱼油和豆油中的脂肪酸组成不同,而养殖鱼类机体对不同脂肪酸的储积有偏好性,这可能是不同油源导致大口黑鲈肌肉粗脂肪含量不同的潜在原因。豆油组大口黑鲈肌肉粗脂肪显著的降低,进而引起肌肉硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性等质构特性的提高。综上所述,采用在饲料中添加DMPT、牛磺酸、胆固醇及以豆油替代鱼油等策略均可部分改善因长期摄入全植物蛋白后引起大口黑鲈肌肉品质下降的问题。而在非营养性优化方面,本实验的结果表明采用饲料软化措施对大口黑鲈肌肉的营养组成成分并无显著的影响。然而,饲料软化可显著提高大口黑鲈肌肉的硬度、黏附性、胶黏性和咀嚼性。这个现象表明非营养性优化可作为调控养殖鱼类品质性状的潜在策略,其具体影响机制需进一步探究。此外,对全植物蛋白饲料进行综合优化对大口黑鲈肌肉的营养成分无显著影响,但可增加肌肉的

表 4 大口黑鲈肌肉质构各指标间相关性分析
Tab. 4 Correlation analysis of muscle texture indices of *Micropterus salmoides* fed experimental diet

指标Index	相关系数Correlation coefficient					
	硬度Hardness	黏附性Adhesiveness	内聚性Cohesiveness	弹性Springiness	胶黏性Gumminess	咀嚼性Chewiness
硬度	1.000	-0.213	0.308	0.445*	0.846**	0.911**
黏附性	-	1.000	0.121	-0.047	-0.347	-0.216
内聚性	-	-	1.000	-0.289	0.134	0.357
弹性	-	-	-	1.000	0.454*	0.457*
胶黏性	-	-	-	-	1.000	0.863**
咀嚼性	-	-	-	-	-	1.000

硬度、胶黏性和咀嚼性等质构特性,该结果表明对全植物蛋白进行综合优化可在一定程度上改善大口黑鲈的肌肉质构特性。

4 结论

本研究结果表明,大口黑鲈肌肉脂肪含量与肌肉硬度、黏附性、胶着性和咀嚼性呈负相关关系。与鱼粉饲料相比,饲喂全植物蛋白饲料显著提高了肌肉粗脂肪含量,降低肌肉硬度、黏附性、弹性、胶黏性和咀嚼性等质构特性引起大口黑鲈肌肉品质的下降。在全植物蛋白饲料中添加DMPT、牛磺酸、胆固醇及用豆油替代鱼油等营养性优化措施均能显著降低大口黑鲈肌肉脂肪含量,进而部分改善鱼肉的质构特性(硬度、黏附性、咀嚼型等参数)。对全植物蛋白饲料进行软化的非营养性优化方式也可改善鱼肉的肌肉硬度、黏附性、胶黏性和咀嚼性等质构特性。本实验的结果可为全植物蛋白饲料在水产养殖中的应用及大口黑鲈产业的可持续发展提供参考依据。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Xu X Y, Yang H, Zhang C Y, *et al.* Effects of replacing fishmeal with cottonseed protein concentrate on growth performance, flesh quality and gossypol deposition of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture*, 2022(548): 1-15.
- [2] Yang X Y, Song Z L, Zhi X Y, *et al.* Effects of replacing fish meal with enzyme-digested poultry by-product meal on muscle quality and expression of muscle growth-related factors of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, **33**(12): 6999-7011. [杨烜懿, 宋紫菱, 植心妍, 等. 酶解鸡肉粉替代鱼粉对珍珠龙胆石斑鱼肌肉营养品质及肌肉生长相关基因表达的影响 [J]. *动物营养学报*, 2021, **33**(12): 6999-7011.]
- [3] Zhang X, Yao W X, Li X Q, *et al.* Effects of cottonseed protein concentrate substituting fish meal in practical diet on growth performance and flesh quality of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, **35**(4): 2465-2477. [张鑫, 姚文祥, 李小勤, 等. 实用饲料中棉籽浓缩蛋白替代鱼粉对凡纳滨对虾生长性能和肌肉品质的影响 [J]. *动物营养学报*, 2023, **35**(4): 2465-2477.]
- [4] Miao Y T, Zhong W Q, Lu B X, *et al.* The effect of fish meal replacement with low-gossypol cottonseed meal on the flesh quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, **54**(4): 65-73. [苗玉涛, 钟宛清, 卢宝鑫, 等. 脱酚棉籽粕替代鱼粉对卵形鲳鲹肌肉品质的影响 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, **54**(4): 65-73.]
- [5] Zhang L. A comparative study of dietary lipid sources on growth, fillet quality and nutrient retention in juvenile yellow drum (*Nibea albiflora*) [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2023: 20. [张蕾. 饲料脂肪源对黄姑鱼幼鱼生长、肌肉品质和营养保留的比较研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2023: 20.]
- [6] Chen Y T, Jia X W, Qian P C, *et al.* Effects of dietary different lipid sources on growth performance, serum biochemical parameters and muscle quality of black carp (*Mylopharyngodon piceus*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, **34**(7): 4657-4673. [陈艳婷, 贾小巍, 钱鹏丞, 等. 饲料中不同脂肪源对青鱼生长性能、血清生化指标及肌肉品质的影响 [J]. *动物营养学报*, 2022, **34**(7): 4657-4673.]
- [7] Rhodes M A, Zhou Y, Salze G P, *et al.* Development of plant-based diets and the evaluation of dietary attractants for juvenile Florida pompano, *Trachinotus carolinus* L [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, **23**(5): 1065-1075.
- [8] Kortner T M, Gu J, Krogdahl Å, *et al.* Transcriptional regulation of cholesterol and bile acid metabolism after dietary soyabean meal treatment in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2013, **109**(4): 593-604.
- [9] Xu H, Ye Y T. Research progress of aquatic food attractants [J]. *Scientific Fish Farming*, 2013(6): 74-75. [胥辉, 叶元土. 水产诱食剂的研究进展 [J]. *科学养鱼*, 2013(6): 74-75.]
- [10] Liu X W, Feng L, Jiang W D, *et al.* (2-Carboxyethyl) dimethylsulfonium Bromide (Br-DMPT) improves muscle flesh quality and antioxidant status of on-growing grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fed non-fish meal diets [J]. *Aquaculture*, 2020(521): 735065.
- [11] Gong X H, Lin H, Zhang L M, *et al.* Effects of Dimethyl-β-Propiothetin on the ingestion and growth of *Labidochromis caeruleus* [J]. *Fishery Modernization*, 2008, **35**(4): 55-57. [宫向红, 林洪, 张利民, 等. 水产诱食剂溴化DMPT对慈鲷的诱食及促生长作用 [J]. *渔业现代化*, 2008, **35**(4): 55-57.]
- [12] Xue F, Chen W, Zhou W R, *et al.* Changes of digestive enzyme activities in the intestine of *Carassius auratus gibelio* carp fed with dimethyl-β-Propiothetin (DMPT) added diet [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2007, **23**(2): 114-118. [薛飞, 陈魏, 周维仁, 等. 饲料中添加二甲基-β-丙酸噻亭(DMPT)后异育银鲫肠消化酶的活性变化 [J]. *江苏农业学报*, 2007, **23**(2): 114-118.]
- [13] Xing S, Liang X, Wang H, *et al.* The impacts of physical properties of extruded feed on the digestion kinetics, gastrointestinal emptying and stomach water fluxes of spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) [J]. *Aquaculture*, 2023(570): 739442.
- [14] Rahman M M, Li X, Sharifuzzaman S M, *et al.* Dietary

- threonine requirement of juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. *Aquaculture*, 2021(543): 736884.
- [15] Huang D, Wu Y, Lin Y, *et al.* Dietary protein and lipid requirements for juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2017, **48**(5): 782-790.
- [16] Liu Y, Lu Q, Xi L, *et al.* Effects of replacement of dietary fishmeal by cottonseed protein concentrate on growth performance, liver health, and intestinal histology of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Frontiers in Physiology*, 2021(12): 764987.
- [17] He M, Li X, Poolsawat L, *et al.* Effects of fish meal replaced by fermented soybean meal on growth performance, intestinal histology and microbiota of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, **26**(4): 1058-1071.
- [18] Ren X, Wang Y, Chen J M, *et al.* Replacement of fish-meal with a blend of poultry byproduct meal and soybean meal in diets for largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2018, **49**(1): 155-164.
- [19] Zhang Y, Guo M, Li N, *et al.* New insights into β -glucan-enhanced immunity in largemouth bass *Micropterus salmoides* by transcriptome and intestinal microbial composition [J]. *Frontiers in Immunology*, 2022(13): 1086103.
- [20] Cheng J H, Sun D W, Han Z, *et al.* Texture and structure measurements and analyses for evaluation of fish and fillet freshness quality: a review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, **13**(1): 52-61.
- [21] Dai Z Y, Cui Y N, Wang H H. Changes of textural properties of cultured *Pseudosciaena crocea* muscle under different frozen storage conditions [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2008, **34**(8): 188-191. [戴志远, 崔雁娜, 王宏海. 不同冻藏条件下养殖大黄鱼肉质构变化的研究 [J]. 食品与发酵工业, 2008, **34**(8): 188-191.]
- [22] Xu T T, Ding J P, Lin G L, *et al.* Changes of textural properties of *Pneumatophorus japonicus* muscle from east China sea under different frozen storage conditions [J]. *The Food Industry*, 2012, **33**(7): 100-103. [许婷婷, 丁静萍, 林甘露, 等. 不同贮藏条件下东海鲐鱼肉质构变化研究 [J]. 食品工业, 2012, **33**(7): 100-103.]
- [23] Yu X T, Liang X F, Wang J, *et al.* A comparative study: Effects of different protein sources on flesh quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) and japanese seabass (*Lateolabrax japonicas*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, **28**(7): 2055-2068. [于晓彤, 梁晓芳, 王嘉, 等. 不同蛋白质源对草鱼和花鲈肉质影响的比较研究 [J]. 动物营养学报, 2016, **28**(7): 2055-2068.]
- [24] Hu F, Li X D, Xiong S B, *et al.* Texture properties of freshwater fish and their correlation with nutritional components [J]. *Food Science*, 2011, **32**(11): 69-73. [胡芬, 李小定, 熊善柏, 等. 5种淡水鱼肉的质构特性及与营养成分的相关性分析 [J]. 食品科学, 2011, **32**(11): 69-73.]
- [25] Prasad Thakur D, Morioka K, Itoh Y, *et al.* Lipid composition and deposition of cultured yellowtail *Seriola quinqueradiata* muscle at different anatomical locations in relation to meat texture [J]. *Fisheries Science*, 2003, **69**(3): 487-494.
- [26] Zou Q. The study of effects and mechanisms of seven feeding stimulants on feed intake, growth performance in GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*) [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016: 70. [邹青. 促摄食物质对吉富罗非鱼摄食、生长的影响及机制研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 70.]
- [27] Wijerath Wiriduge H A S, Zhang Y, Liu J, *et al.* Dietary taurine improves muscle growth and texture characteristics in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2020(17): 100305.
- [28] Shi L, Zhao Y, Zhou J, *et al.* Dietary taurine impacts the growth, amino acid profile and resistance against heat stress of tiger puffer (*Takifugu rubripes*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, **26**(5): 1691-1701.
- [29] Richard N, Colen R, Aragão C. Supplementing taurine to plant-based diets improves lipid digestive capacity and amino acid retention of Senegalese sole (*Solea senegalensis*) juveniles [J]. *Aquaculture*, 2017(468): 94-101.
- [30] Zhu L, Cheng J, Wang Z Q, *et al.* Effects of bile acids levels on the growth performance, physical indicators and body composition of juvenile *Micropterus salmoides* [J]. *China Feed*, 2017(1): 28-32. [朱龙, 程洁, 王竹青, 等. 胆汁酸对加州鲈生长性能、形体指数及肌肉营养成分的影响 [J]. 中国饲料, 2017(1): 28-32.]
- [31] Yildiz M, Köse İ, Issa G, *et al.* Effect of different plant oils on growth performance, fatty acid composition and flesh quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture Research*, 2015, **46**(12): 2885-2896.

OPTIMIZING FULL PLANT PROTEIN FEED THROUGH NUTRITIONAL AND UN-NUTRITIONAL METHODS ON THE COMPOSITIONS AND TEXTURE PROPERTIES OF LARGEMOUTH BASS *MICROPTERUS SALMOIDES* MUSCLE

ZHANG Bao-Ping, DONG Zhi-Yong, KANG Jia-Ming, WANG Bo, CAI Wan-Jie, SHI Bo and ZHANG Yue-Xing

(National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: The effects of optimizing full plant protein feed through nutritional and non-nutritional methods on the compositions and texture properties of largemouth bass muscle were investigated. Nine extruded experimental feeds were formulated, including a fish meal control feed (FFH), full plant protein feed (PFH), softened feed (PFS), DMPT supplemented feed (PFD), taurine supplemented feed (PFT), cholesterol & fish oil feed (PFC), soybean oil feed (PSH), cholesterol & soybean oil feed (PSC), and comprehensive feed (PFA). Twenty-seven tanks of largemouth bass with an initial body weight of (78.1 ± 0.06) g were fed for 50d in an indoor recirculating aquaculture system (RAS). The results indicated that crude fat content in the dorsal muscle of fish from the PFH group was significantly higher than that of the FFH group, while muscle hardness, adhesiveness, springiness, gumminess, and chewiness of fish from the PFH group were significantly lower than those in the FFH group. The muscle crude fat content of fish in the nutrient-optimized groups (PFD, PFT, PFC, PFA, and PSH) were significantly lower than that in the PFH group. Muscle adhesiveness, gumminess, and chewiness were significantly increased in the PFD group; muscle hardness and gumminess were significantly increased in the PFT group; muscle hardness, gumminess, and chewiness were significantly increased in the PFC and PFA groups; and muscle hardness, springiness, gumminess, and chewiness were significantly increased in the PSH group. Regarding the non-nutritional way, compared to the PFH group, muscle hardness, adhesiveness, gumminess, and chewiness were significantly increased in the PFS group. Compared to the PSH group, muscle springiness in the PSC group was significantly reduced. Correlation analysis showed that muscle hardness, adhesiveness, gumminess, and chewiness had a significantly negative correlation with muscle fat content. Muscle hardness showed a significantly positive correlation with adhesiveness, gumminess, and chewiness. Muscle springiness showed a significantly positive correlation with gumminess and chewiness, and muscle gumminess showed a significantly positive correlation with chewiness. These results indicate that optimizing full plant protein feed nutritionally with dietary supplements of DMPT, taurine, cholesterol, or by substituting soybean oil for fish oil, can partially improve the muscle quality of largemouth bass, which may have been impaired by the intake of full plant protein feed previously. The results of the present experiment could potentially benefit the wide application of full plant protein feed and promote the sustainable development of largemouth bass farming.

Key words: Full-plant protein; Muscle compositions; Muscle texture properties; Nutritional optimization; *Micropterus salmoides*