

Weng Z K, Zeng Q, Zhang L K, *et al.* Different feeding patterns on growth and muscle quality in *Micropterus salmoides* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(11): 102506. [翁泽鵬, 曾琪, 张凌康, 等. 不同投喂水平对大口黑鲈生长及肌肉品质的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(11): 102506.]

不同投喂水平对大口黑鲈生长及肌肉品质的影响

翁泽鵬¹ 曾琪¹ 张凌康¹ 孙悦佳² 杨军² 李莉娟¹ 顾泽茂^{1,3} 袁军法^{1,3}

(1. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070; 2. 湖北省宜昌市水产技术推广站, 宜昌 443008; 3. 农业农村部水生动物疫病专业实验室, 武汉 430070)

摘要: 为探究不同投喂水平对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)生长与肌肉品质的影响, 研究设计饱食投喂(SF)、中度限食投喂(70%, MFR)和高度限食投喂(30%, HFR)三种投喂模式养殖大口黑鲈。经过28d饱食投喂, 与70%限食投喂组相比, SF组饲料利用率降低32.99% ($P<0.05$), 肝体指数和脾体指数分别增加22.63%和180% ($P<0.05$), 空壳重降低6.97% ($P<0.05$); 肌肉水分含量降低, 粗脂肪含量增加58.09%, 粗蛋白含量降低3.77% ($P<0.05$), 总氨基酸含量降低21.40% ($P<0.05$); 肌肉硬度增加31.29% ($P<0.05$), 肌纤维间隙增大, 明暗带色泽黯淡, 大量肌间脂肪蓄积, 肌肉生长促进基因 $myog$ 和 $myf6$ 显著下调($P<0.05$), 生长抑制基因 $mstn$ 显著上调($P<0.05$), 肝脏和肌肉脂肪合成相关基因显著上调($P<0.05$)。而与70%限食投喂组相比, 30%限食投喂组特定生长率显著降低90.86% ($P<0.05$), 饲料利用率显著降低82.23% ($P<0.05$); 肌肉粗蛋白含量降低9.63%, 总氨基酸含量升高15.45% ($P<0.05$); $myog$ 显著下调($P<0.05$), 肌纤维存在不同程度的断裂。总之, 适度限食改善大口黑鲈肌肉品质, 提高饲料利用率, 减少饲料耗费, 促进群体健康, 降低养殖成本, 为推进养殖方式提效节粮提供新途径。

关键词: 投喂水平; 饱食投喂; 生长; 肌肉品质; 大口黑鲈

中图分类号: S965.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2025)11-102506-10

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0153 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0153



养殖规模扩大及养殖模式和结构改变, 用于饲料的粮食用量逐年增加, 饲料粮供应日趋紧张, 农业农村部印发了《农业农村部关于实施养殖业节粮行动的意见》, 提出持续推进饲料粮减量替代^[1]。同时, 在水产集约化养殖中, 普遍存在饱食投喂甚至过度投喂, 引起鱼肉品质降低, 包括营养成分损失、质构改变及风味下降^[2]。发展可持续的健康养殖与我国粮食安全休戚相关, 平衡水产品的产量和质量及推动养殖业节粮降耗已成为可持续水产养殖的重要议题。但现阶段的研究多聚焦于提高产量, 关注鱼肉品质改善的研究较少^[3-5]。

目前, 改善水产动物肌肉品质的常用方法包括长期禁食、活性物质添加和营养调控。长期禁食是指对成鱼采用15—30d的禁食, 通过调节以粗脂肪为代表的营养物质含量、代谢腥味物质和抗生

素达到改善鱼肉品质的目的, 俗称“吊水”或“瘦身”。然而长期禁食使鱼类陷入饥饿状态, 损耗体重, 甚至导致大量死亡^[6-8]。活性物质添加是指通过添加促进脂质代谢和改善生理机能的化合物来提升鱼肉品质。如在饲料中添加左旋肉碱能促进大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的脂肪酸代谢, 从而改变肌肉的质构特性, 最终改善肌肉品质^[9,10]。营养调控是指通过改变饲料的营养组分配比改善鱼肉品质^[11], 添加不同比例黄粉虫粉替代豆粕可显著降低尼罗罗非鱼肌肉脂肪含量, 提升肌肉黏性^[12]。然而这些改善肌肉品质的方法因损耗大、成本高、饲料消耗量大等原因推广受限, 有必要从养殖源头提高水产品品质, 推动水产业可持续发展。

饵料投喂作为集约化水产养殖的重要环节, 投

收稿日期: 2025-04-28; 修订日期: 2025-05-12

基金项目: 国家现代农业产业技术体系专项(CARS-46)资助 [Supported by the Fund for CARS (CARS-46)]

作者简介: 翁泽鵬(2001—), 男, 学士; 主要研究方向为水产动物免疫与肌肉品质提升。E-mail: 3104644992@qq.com

通信作者: 袁军法(1978—), 男, 博士; 主要研究方向为水生动物医学与健康养殖。E-mail: jfyuan@mail.hzau.edu.cn

喂水平影响养殖对象消化酶活性、N存储、水质和免疫状态。随着投喂水平的增加,养殖对象消化道中的淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶的活性显著升高,生长性能逐步达到峰值;但增加到一定水平时,消化酶活性将逐渐停滞,生长性能趋于稳定。在投喂水平过高时,消化酶活性反而降低,生长性能开始降低^[13]。投喂水平控制在饱食量的80%—90%能平衡生长与氮存储效率,促进养殖对象对氮的利用^[14],投喂过量降低饲料氮利用率并污染水环境^[15]。养殖对象仅能利用20%—25%的饲料蛋白质,合理控制投喂水平可减少残饵和粪便的排泄量,缩短饲料在水体中的停留时间,降低水体氨氮和亚硝酸盐含量,避免水体富营养化^[16]。同时过高的投喂水平容易对肝脏产生胁迫作用,加速鱼体肝脂蓄积,形成脂肪肝^[17],而投喂水平过低降低鱼体白细胞数量,抑制白细胞吞噬活性^[18]。但不同投喂水平对养殖对象肌肉品质的影响研究较少。饲料成本约占养殖成本70%,通过调整投喂水平改善肌肉品质,降低饲料投入,可为开发提效节粮养殖方法提供科学依据。

大口黑鲈是重要的淡水经济鱼类之一。我国的大口黑鲈养殖产量从2018年的43.2万吨已增长至2023年的88.8万吨。高脂高蛋白饲料的长期投喂易导致大口黑鲈脂肪沉积,从而导致肌肉品质和风味受损。已有的投喂策略研究主要集中于大口黑鲈生长、氮利用和繁殖性能等研究,本研究旨在探究不同投喂水平对大口黑鲈生长和肌肉品质的影响,探索兼顾生长、肌肉品质和养殖效益的健康养殖方法,为水产养殖业饲料粮减量提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料与伦理声明

本实验所用的大口黑鲈购自湖北省黄石市阳新县率洲农场。在实验前将所有实验鱼转入华中农业大学水产基地圆形养殖桶中暂养,养殖桶高1.15 m,直径1.60 m,水位控制在0.90 m,养殖方式为静水养殖。在暂养期间采用丰华饲料实业有限公司提供的配合饲料投喂,该饲料的营养成分包括50.2%粗蛋白、12.1%粗脂肪、14.6%粗灰分和8.3%淀粉。每天投喂2次,分别在8:00和18:00进行,每次投喂量以达到鱼类表观饱和为标准,暂养周期为7d。本研究采用的所有方法均符合中国实验动物的有关规定,并获得了华中农业大学的正式批准(HZAUFI-2023-0023)。

1.2 实验方法

在暂养结束后将450尾初始体重为(80±2.43) g的大口黑鲈随机分成3个实验组,每组3个重复,每

个重复设置50尾样本。饱食组(SF)投喂至表观饱食,投喂量约为实验鱼体重的5%;中度限食组(MFR)投喂量设定为饱食组(SF)的70%,高度限食组(HFR)提供饱食组的30%饲料量,投喂实验持续28d。在养殖期间,溶解氧和pH分别保持在4.80—6.40 mg/L和7.60—8.00,水温控制在(28.00±2.00)℃,按照14h光照/10h黑暗循环的自然光照饲养。每天观察实验鱼的健康状况,以虹吸管吸出箱底粪便,并换约1/5的水。

1.3 形态观察与生长性能测定

在实验期间,每隔1周每组取样3尾,观察不同样本胃充塞情况,使用游标卡尺测量体长和全长,记录体重、肝重、内脏重、脾重、胃重和空壳重,综合评判生长效果。根据饲料消耗量计算饲料效率,评判饲料利用率。

特定生长率(%/d)=100×(ln(终末体重)-ln(初始体重))/投喂天数

饲料效率(%)=(终末体重-初始体重)/摄食量×100

肥满度(g/cm³)=(体重/体长³)×100

肝体指数=(肝脏重/体重)×100

脏体指数=(内脏重/体重)×100

脾体指数=(脾脏重/体重)×100

1.4 营养成分测定

在28d养殖实验结束后,每组随机采集10尾鱼,使用MS222麻醉,采集背部肌肉,进行肌肉成分分析。将肌肉样本放入105℃的干燥箱内持续干燥15 h,测定肌肉水分含量。通过氯仿/甲醇(2/1, v/v)法测定肌肉中的脂质含量。肌肉样品中的总蛋白质经过硫酸消化后采用凯氏定氮法测定。采用氨基酸自动分析仪(Hitachi L-8900, 日本)测定各组鱼背部肌肉氨基酸组成及含量,采用气相色谱仪测定各组鱼背部肌肉脂肪酸组成及含量。

1.5 异味物质测定

根据《生活饮用水标准检验方法 第8部分:有机物指标》(GB/T 5750.8-2023)相关要求测定大口黑鲈背部肌肉中土臭素和2-甲基异茨醇含量。

1.6 肌肉质构特性分析(TPA)

在28d养殖实验结束后,每个处理随机取样6尾鱼,麻醉后取背部白色肌肉样本。将鱼肌肉样本切割成1.0 cm×1.0 cm×0.5 cm的小块。2h内利用质构仪检测肌肉的质构特性。选用P36/R探头测定肌肉硬度、黏性、咀嚼性、回复性、弹性和凝聚力。测试条件:测试前速率2.0 mm/s,测试速率2.0 mm/s,测试后速率1.0 mm/s,压缩距离20 mm,停留时间2 mm/s,压缩程度75%。循环次数2次。

1.7 肌肉的组织学分析

在28d养殖实验结束后, 取各组鱼背部肌肉样本制备组织切片, 经HE染色, 以全自动玻片扫描系统进行玻片扫描, ImageViewerG观察图像。以Image-Pro Plus 6.0软件随机选取3个部位同比例放大测定肌原纤维直径、面积和数量。

1.8 肌肉组织的电镜观察

在28d养殖实验结束后, 取各组鱼背部肌肉样本, 以2.5%的戊二醛溶液固定, 制备超薄切片用于透射电镜观察, 制备方法参照张静静等^[19]。

1.9 RNA提取、cDNA合成和定量PCR (qPCR)

在28d养殖实验结束后, 每个处理组取6尾鱼的肌肉和肝脏样本, 提取总RNA, 以RT-qPCR分析肌纤维生长和脂代谢相关基因的转录。使用TRIzol (Cwbio, 中国)提取0.1 g所述组织的总RNA。用NanoDrop 2000 (Thermo Scientific, 美国)分析RNA的浓度和质量。根据说明书使用HiScript[®]逆转录酶将总RNA反转成cDNA (Vazyme Biotech, 中国), 并在20 μ L反应中加入10 μ L AceQ[®] qPCR SYBR Green Master Mix和0.5 μ L各指定引物进行定量PCR扩增。扩增反应条件: 96 $^{\circ}$ C 3 min, 96 $^{\circ}$ C 30s, 56 $^{\circ}$ C 60s, 72 $^{\circ}$ C 90s, 35个循环, 72 $^{\circ}$ C 10min。本研究使用的引物详见表1。使用 β -actin作为内参对基因转录进行归一化处理, 并通过2^{- $\Delta\Delta C_t$} 方法计算基因相对表达量。

1.10 数据分析

采用SPSS (21.0版)进行统计分析和组间差异比较。在两组数据的显著性判定上, 运用双尾Student's *t*检验方法; 而针对多个测试组间的显著差异分析, 则采用基于Turkey检验的方差分析

表1 荧光定量PCR引物序列

Tab. 1 Primers used in quantitative PCR detecting system

基因Gene	引物Primer (5'—3')
<i>myog</i>	TCTCCACACGTCTTCCACTC TAGTTGTCCCTCCCTCGTA
<i>mstn</i>	AGACGGGAACAGGCACAT GCAGCCACACAGTCAACAC
<i>myod</i>	CCTGCCGCTGATGATTCTAT AGTCGTCCGGCTTCAGTA
<i>igfl</i>	CTTCAAGAGTGCGATGTGC GCCATAGCCTGTTGGTTTACTG
<i>myf6</i>	GGCCAGTCATGAGTACCACT TCACAATGGATGACAGACGC
<i>cpt1</i>	CCTGGTGGGTTTATGGTAGTG CGACAACAGGCACCTTAGGA
<i>acc2</i>	AGTCTCTGGGCACGACCTAT CAGCTCTGTGAAGGTGAGCA
<i>ppar α</i>	CCACCGCAATGGTCGATATG TGCTGTTGATGGACTGGGAAA
<i>ppar γ</i>	CCTGTGAGGGCTGTAAGGGTTT TTGTTGCGGGACTTCTTGTA
<i>scd</i>	TATCTTTGAATGGGCTCGTG GGGGTTGATGTTCTTGTCGT
<i>β-actin</i>	GCTATGTGGCTCTTGACTTCGA CCGTCAGGCAGCTCATAGCT

(ANOVA)方法。* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

2 结果

2.1 不同投喂水平影响大口黑鲈生长、饲料利用和形态学参数

在实验期间对饱食组(SF)、中度限食组(MFR)和高度限食组(HFR)的样本进行称重, 并评估饲料效率和鱼体形态变化。如表2所示, 随着投喂量的减少, 胃重逐渐降低($P<0.05$)。与MFR组相比, SF组终末体重、特定生长率、肥满度无显著差异, HFR组显著降低, 其中特定生长率降低90.86% ($P<0.05$)。与MFR组相比, SF组和HFR组的饲料效率分别显著降低32.99%和82.23%; 空壳重分别显著降低6.97%和37.23% ($P<0.05$)。与MFR组相比, SF组脏体指数和肝体指数分别显著升高42.67%和22.63%, HFR组显著降低($P<0.05$)。与MFR组相比, SF组和HFR组的脾体指数分别显著升高180%和120%。与MFR组相比, SF组体长和全长无显著差异, HFR组显著降低($P<0.05$)。上述结果表明, 饱食投喂组饲料耗费增加, 适度限食可促进饲料利用, 稳定生长, 高度限食组生长受阻。

2.2 不同投喂水平对大口黑鲈背部肌肉营养成分及异味物质的影响

营养成分是评价肌肉品质的关键指标。由表3

表2 不同投喂水平下大口黑鲈生长、饲料利用和形态学参数
Tab. 2 Growth, feed utilization, and morphological parameters of *Micropterus salmoides* under different feeding levels

项目Item	中度限食组 MFR	饱食组SF	高度限食组 HFR
胃重Gastric weight (g)	2.42 $\pm$ 0.18 ^b	2.86 $\pm$ 0.40 ^c	1.33 $\pm$ 0.78 ^a
初始体重 Initial weight (g)	81.38 $\pm$ 0.75	80.88 $\pm$ 0.93	80.33 $\pm$ 0.74
终末体重 Final weight (g)	132.80 $\pm$ 0.65 ^b	130.23 $\pm$ 1.33 ^b	84.21 $\pm$ 2.43 ^a
特定生长率 SGR (%/d)	1.75 $\pm$ 0.04 ^b	1.70 $\pm$ 0.02 ^b	0.16 $\pm$ 0.09 ^a
空壳重Carcass weight (g)	120.91 $\pm$ 2.18 ^c	112.48 $\pm$ 1.62 ^b	75.90 $\pm$ 2.90 ^b
摄食量Intake (g)	26.13 $\pm$ 0.01 ^b	37.33 $\pm$ 0.01 ^a	11.20 $\pm$ 0.01 ^c
饲料效率Feed efficiency (%)	196.82 $\pm$ 0.04 ^c	132.19 $\pm$ 0.02 ^b	34.72 $\pm$ 0.19 ^a
肥满度CF (g/cm ³)	2.70 $\pm$ 0.10 ^b	2.60 $\pm$ 0.20 ^b	2.54 $\pm$ 0.11 ^a
脏体指数VSI	9.96 $\pm$ 0.11 ^b	14.21 $\pm$ 0.30 ^c	8.48 $\pm$ 1.28 ^a
肝体指数HSI	2.43 $\pm$ 0.09 ^b	2.98 $\pm$ 0.06 ^c	1.37 $\pm$ 0.09 ^a
脾体指数SBI	0.05 $\pm$ 0.01 ^a	0.14 $\pm$ 0.01 ^c	0.11 $\pm$ 0.01 ^b
全长Total length (cm)	19.57 $\pm$ 0.28 ^b	19.02 $\pm$ 0.26 ^b	17.58 $\pm$ 0.79 ^a
体长Body length (cm)	17.03 $\pm$ 0.20 ^b	17.13 $\pm$ 0.19 ^b	14.93 $\pm$ 0.15 ^a

注: 同行不同字母表示具有显著差异($P<0.05$); 下同

Note: Different letters indicate significant differences in the same row ($P<0.05$); the same applies below

所示,随着投喂水平逐渐降低,肌肉中水分含量逐渐升高($P<0.05$),粗脂肪含量逐渐降低($P<0.05$),其中SF组的粗脂肪含量较MFR组增加58.09%。与MFR组相比, SF组和HFR组的粗蛋白的含量显著降低,其中SF组降低3.77%, HFR组降低9.63% ($P<0.05$)。与MFR组相比, SF组和HFR组肌肉粗灰分含量降低,但无显著性差异。

大口黑鲈背部肌肉的脂肪酸检测结果显示, 3组共检出31种脂肪酸, 包括15种饱和脂肪酸(SFA)、6种单不饱和脂肪酸(MUFA)、10种多不饱和脂肪酸(PUFA)、4种n-3型多不饱和脂肪酸、4种n-6型多不饱和脂肪酸。由表4所示, 与MFR组相比, SF组肌肉饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、n-6型多不饱和脂肪酸显著降低($P<0.05$), n-3型多不饱和脂肪酸、EPA+DHA、n-3/n-6和多不饱和脂肪酸显著升高($P<0.05$); HFR组n-6型多不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸显著升高, n-3/n-6显著降低。

大口黑鲈背部肌肉共检出16种氨基酸, 包括7种必需氨基酸和7种非必需氨基酸, 2种半必需氨基酸(表5)。与MFR组相比, SF组肌肉总氨基酸含量显著降低21.40%, HFR组升高15.45%; SF组必需氨基酸、半必需氨基酸、非必需氨基酸、鲜味氨基酸、苦味氨基酸和甜味氨基酸含量显著降低, HFR组显著升高($P<0.05$)。SF和HFR组必需氨基酸占非必需氨基酸的百分比(TEAA/TNEAA)高于MFR组,

表3 不同投喂水平下大口黑鲈肌肉常规营养成分

Tab. 3 Muscle common nutrient composition of *Micropterus salmoides* muscle at different feeding levels (g/100 g)

营养成分Nutrient composition	中度限食组MFR	饱食组SF	高度限食组HFR
水分Moisture	78.25±0.01 ^b	77.52±0.01 ^a	78.51±0.01 ^c
粗脂肪Crude fat	4.70±0.01 ^b	7.43±0.09 ^c	3.6±0.06 ^a
粗蛋白Crude protein	19.63±0.42 ^c	18.89±0.09 ^b	17.74±0.02 ^a
粗灰分Crude ash	0.06±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01

表4 不同投喂水平下大口黑鲈肌肉脂肪酸组成比较

Tab. 4 Muscle fatty acid composition of *Micropterus salmoides* muscle at different feeding levels (g/100 g)

脂肪酸Fatty acid	中度限食组MFR	饱食组SF	高度限食组HFR
饱和脂肪酸ΣSFA	0.35±0.01 ^b	0.30±0.01 ^a	0.35±0.01 ^b
单不饱和脂肪酸ΣMUFA	0.33±0.01 ^b	0.30±0.01 ^a	0.34±0.01 ^b
多不饱和脂肪酸ΣPUFA	0.43±0.01 ^a	0.44±0.00 ^a	0.461±0.00 ^b
EPA+DHA	0.15±0.01 ^a	0.18±0.01 ^b	0.15±0.01 ^a
n-3型多不饱和脂肪酸Σn-3	0.16±0.01 ^a	0.19±0.01 ^b	0.17±0.01 ^a
n-6型多不饱和脂肪酸Σn-6	0.26±0.01 ^b	0.24±0.01 ^a	0.29±0.01 ^c
Σn-3/Σn-6	0.63±0.01 ^b	0.80±0.01 ^c	0.59±0.01 ^a

SF组必需氨基酸占总氨基酸的百分比(TEAA/TAA)高于MFR组和HFR组, SF组非必需氨基酸占总氨基酸的百分比(TNEAA/TAA)低于MFR组和HFR组, SF组鲜味氨基酸占总氨基酸的百分比(FAA/TAA)低于MFR组和HFR组, SF组苦味和甜味氨基酸占总氨基酸的百分比(BAA/TAA)均高于MFR组和HFR组, 但无显著性差异。3组大口黑鲈背部肌肉样本均未检出土臭素和2-甲基异戊醇。

2.3 不同投喂水平影响大口黑鲈背部肌肉质构特性

质构特性是评价肌肉口感的关键指标, 本研究

表5 不同投喂水平下大口黑鲈肌肉氨基酸组成比较

Tab. 5 Muscle amino acid composition of *Micropterus salmoides* at different feeding levels (g/100 g)

氨基酸Amino acid	中度限食组MFR	饱食组SF	高度限食组HFR
天门冬氨酸Asp ^{C D}	0.73±0.04 ^b	0.54±0.04 ^a	0.89±0.02 ^c
苏氨酸Thr ^{A E}	0.33±0.01 ^b	0.27±0.01 ^a	0.40±0.02 ^c
丝氨酸Ser ^{C E}	0.28±0.01 ^a	0.24±0.14 ^a	0.34±0.02 ^b
谷氨酸Glu ^{C D}	1.09±0.03 ^b	0.76±0.05 ^a	1.24±0.01 ^c
甘氨酸Gly ^{C D}	0.38±0.01 ^b	0.29±0.01 ^a	0.38±0.01 ^b
丙氨酸Ala ^{C D}	0.45±0.01 ^b	0.38±0.02 ^a	0.48±0.02 ^b
缬氨酸Val ^{A F}	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.02±0.01 ^c
蛋氨酸Met ^{A F}	0.49±0.01 ^b	0.41±0.02 ^a	0.57±0.03 ^c
异亮氨酸Ile ^{A F}	0.37±0.01 ^b	0.29±0.01 ^a	0.42±0.01 ^c
亮氨酸Leu ^{A F}	0.60±0.01 ^b	0.48±0.01 ^a	0.67±0.01 ^c
酪氨酸Tyr ^{C F}	0.21±0.01 ^b	0.18±0.01 ^a	0.27±0.01 ^c
苯丙氨酸Phe ^{A F}	0.30±0.01 ^b	0.24±0.02 ^a	0.35±0.01 ^c
赖氨酸Lys ^{A E}	0.69±0.04 ^b	0.54±0.01 ^a	0.81±0.01 ^c
组氨酸His ^{B F}	0.18±0.01 ^b	0.15±0.01 ^a	0.22±0.01 ^c
精氨酸Arg ^{B F}	0.41±0.01 ^b	0.35±0.01 ^a	0.49±0.01 ^c
脯氨酸Pro ^{C E}	0.21±0.01 ^b	0.18±0.01 ^a	0.23±0.01 ^c
总氨基酸TAA	6.73±0.08 ^b	5.29±0.02 ^a	7.77±0.10 ^c
必需氨基酸TEAA	3.39±0.04 ^b	2.72±0.06 ^a	3.95±0.05 ^c
半必需氨基酸THEAA	0.59±0.02 ^b	0.50±0.01 ^a	0.70±0.01 ^c
非必需氨基酸TNEAA	3.35±0.08 ^b	2.57±0.05 ^a	3.82±0.07 ^c
鲜味氨基酸FAA	2.64±0.07 ^b	1.96±0.06 ^a	2.98±0.03 ^c
苦味氨基酸BAA	2.58±0.03 ^b	2.11±0.07 ^a	3.00±0.04 ^c
甜味氨基酸SAA	1.51±0.05 ^b	1.22±0.02 ^a	1.78±0.05 ^c
TEAA/TNEAA	83.64±2.64	86.93±3.40	84.93±1.48
TEAA/TAA	41.54±0.76	42.08±0.76	41.75±0.36
TNEAA/TAA	49.70±0.65	48.49±1.01	49.18±0.43
FAA/TAA	39.22±0.67	37.12±1.16	38.38±0.34
BAA/TAA	38.32±0.17	39.85±1.31	38.66±0.40
SAA/TAA	22.45±0.80	23.03±0.47	22.96±0.34

注: ^A必需氨基酸; ^B半必需氨基酸; ^C非必需氨基酸; ^D鲜味氨基酸; ^E甜味氨基酸; ^F苦味氨基酸

Note: ^Aessential amino acid; ^Bsemi-essential amino acid; ^Cnon-essential amino acid; ^Dfresh amino acid; ^Esweet amino acids; ^Fbitter amino acids

评价了不同投喂水平对大口黑鲈肌肉质构特性的影响。由表 6 所示, 与 MFR 组相比, SF 组肌肉硬度、胶着性、咀嚼性、回复性和凝聚力显著升高 ($P<0.05$), 其中硬度升高 31.29%; HFR 组除凝聚力显著升高外, 其余指标显著降低 ($P<0.05$)。SF 组和 HFR 组弹性较 MFR 组显著降低。

2.4 不同投喂水平影响大口黑鲈背部肌肉肌纤维生长相关基因转录

评估不同投喂水平对大口黑鲈背部肌肉肌纤维生长相关基因转录的影响(图 1)。与 MFR 组相比, SF 组和 HFR 组肌纤维生长促进基因 *myog* 显著下调 1.35 和 2.86 倍(图 1a), SF 组 *myf6* 显著下调 3.44 倍(图 1b; $P<0.05$); 与 MFR 组相比, SF 组肌纤维生长抑制基因 *mstn* 显著上调 2.58 倍(图 1c; $P<0.05$), HFR 组无显著变化; 不同组别肌纤维生长调节基因 *igf1* 和生长促进基因 *myod* 转录无显著性差异(图 1d 和 1e)。

2.5 不同投喂水平影响大口黑鲈背部肌肉形态和微观结构

不同投喂水平大口黑鲈背部肌肉组织横截面如图 2a 所示。与 MFR 组相比, HFR 组肌肉纤维密度增加, 纤维间距缩小, 肌纤维结构损坏, 融合成块; SF 组肌肉纤维密度降低, 纤维间距不断拉大, 大量肌间脂肪蓄积。定量分析肌纤维特征, SF 组相比

MFR 组肌纤维面积和直径降低(图 2b 和 2c; $P<0.05$), 且肌纤维数量减少(图 2d; $P<0.05$)。与 MFR 组(47.45%)相比, SF 组(73.47%)较小直径($\leq 80 \mu\text{m}$)的纤维直径比例显著增加($P<0.05$), 而 SF 组(10.61%)较大直径($\geq 80 \mu\text{m}$)的纤维直径比例显著低于 MFR 组(33.03%, 图 2e; $P<0.05$), 而在 0—20 μm 的纤维直径比例无显著差异(图 2f—h)。电镜观察发现 MFR 组肌纤维规则完整, 肌纤维之间及肌纤维与肌间脂肪之间排列紧密, 明暗带镶嵌排列, Z 线和 M 线排列整齐, 三联管结构完整。HFR 组肌纤维束收缩, 明暗带分布混乱, Z 线和 M 线聚团, 肌纤维间隙变大, 肌纤维束产生不同程度的断裂, 甚至出现明显的裂痕。SF 组肌纤维虽规则完整, 但明带界限模糊, 肌小节间隙增大, 肌纤维间大量肌间脂肪分布聚集(图 2a)。

2.6 不同投喂水平影响大口黑鲈脂质代谢

肌肉脂肪含量显著影响肌肉质构特征。为探究不同投喂水平对肌肉脂肪沉积的影响, 本研究分析不同组别的背部肌肉和肝脏中脂质代谢相关基因的表达水平。与 MFR 组相比, SF 组肌肉 *ppar* γ 、*acc2*、*scd* 分别显著上调 2.28、1.98 和 1.24 倍 ($P<0.05$; 图 3a—c), 不同投喂水平对肌肉 *ppar* α 和 *cpt1* 转录的影响并不显著(图 3d—e)。肝脏脂质代谢方面, 与 MFR 组相比, SF 组肝脏 *acc2*、*scd* 分别显著上调 9.43 倍和 46.86 倍(图 3f—g; $P<0.05$), *ppar* γ 无显著变化; HFR 组 *ppar* γ 显著下调 1.70 倍(图 3h; $P<0.05$)。与 MFR 组相比, SF 组和 HFR 组的 *ppar* α 分别显著上调 2.12 和 1.99 倍 ($P<0.05$), *cpt1* 分别显著上调 2.11 和 1.47 倍 ($P<0.05$; 图 3i—j)。上述结果说明不同投喂水平显著影响大口黑鲈肌肉和肝脏脂肪合成相关基因(*ppar* γ 、*acc2*、*scd*)的转录。

3 讨论

饲料粮消费在我国粮食总消费中占比较大, 推动节粮降耗是促进养殖业降本增效、保障国家粮

表 6 不同投喂水平下大口黑鲈肌肉质构特性

Tab. 6 Muscle textural characteristics of *Micropterus salmoides*

项目 Item	中度限食组 MFR	饱食组 SF	高度限食组 HFR
硬度 Hardness (g)	4649.75 $\pm$ 96.95 ^b	6104.49 $\pm$ 52.01 ^c	3296.31 $\pm$ 47.69 ^a
胶着性 Gumminess	2145.63 $\pm$ 74.21 ^b	2633.99 $\pm$ 114.25 ^c	1544.52 $\pm$ 26.42 ^a
咀嚼性 Chewiness (MJ)	1021.96 $\pm$ 15.77 ^b	1225.23 $\pm$ 12.60 ^c	726.97 $\pm$ 66.91 ^a
回复性 Resilience	0.27 $\pm$ 0.01 ^b	0.30 $\pm$ 0.02 ^c	0.21 $\pm$ 0.01 ^a
弹性 Springiness (mm)	0.77 $\pm$ 0.01 ^c	0.65 $\pm$ 0.02 ^b	0.48 $\pm$ 0.02 ^a
凝聚力 Cohesiveness (%)	0.37 $\pm$ 0.01 ^a	0.44 $\pm$ 0.01 ^c	0.41 $\pm$ 0.01 ^b

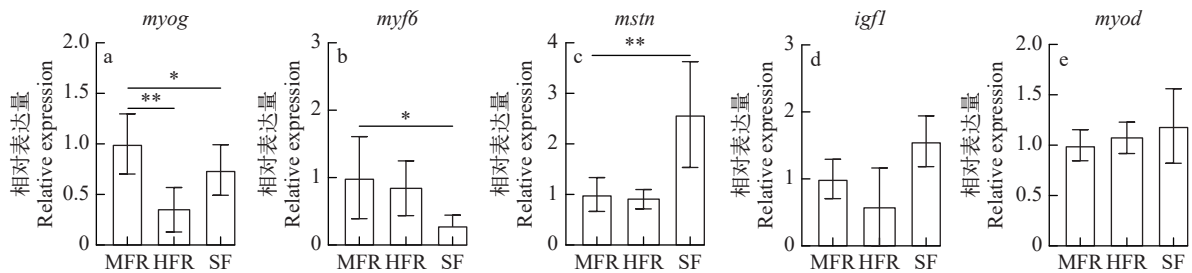


图 1 不同投喂水平下大口黑鲈肌肉生长基因表达

Fig. 1 Gene expression of muscle growth in *Micropterus salmoides* at different feeding levels

a. *myog*; b. *myf6*; c. *mstn*; d. *igf1*; e. *myod*; “*”表示具有显著差异 ($P<0.05$); “**”表示差异极显著 ($P<0.01$); 下同

a. *myog*; b. *myf6*; c. *mstn*; d. *igf1*; e. *myod*; “*” indicates significant differences ($P<0.05$); “**” indicates extremely significant differences ($P<0.01$); the same applies below

食安全和畜禽水产品供应安全的重要举措。本研究探究了不同投喂水平对大口黑鲈生长和肌肉品质的影响,发现饱食投喂组和适度限食组生长速率相似,但饱食投喂显著降低肌肉品质,适度限食可提高饲料利用率、减少饲料粮投入和改善肌肉品质,其结果为建立资源节约、绿色低碳的养殖生产体系提供了新思路。

3.1 不同投喂水平对大口黑鲈生长的影响

比较不同投喂水平对大口黑鲈体重、肥满度、特定生长率和饲料效率的影响,发现投喂水平控制在饱食量的70%时,大口黑鲈可通过提升饲料利用率保持与饱食组同等的生长性能,而饱食投喂降低大口黑鲈对饲料的利用效率。研究表明适度限食可通过增强肠道消化酶活性、上调GH-IGF-I轴及增强与葡萄糖转运和脂肪酸 β -氧化相关基因的表达提高生长性能^[20],也可通过缓解氧化应激和炎症,增强胰岛素敏感性,促进碳水化合物利用,提高饲料效率^[21]。但朱健^[14]发现在85%的投喂水平

下,大口黑鲈幼鱼的生长性能与饱食组无差异,Zhang等^[22]发现投喂水平控制在70%时,黄颡鱼幼鱼的生长性能显著增加,提示最适投喂水平与养殖阶段和养殖品种相关。内脏、肝或脾占体重的比例通常可反应机体的健康状况^[23—25]。本研究中饱食投喂组与70%投喂组比较,脏体指数、肝体指数、腹脂指数和脾体指数显著升高,提示热量过度摄入引起大口黑鲈器官负担,大量脂肪蓄积,损害鱼体健康。空壳重反映鱼体净重和肌肉含量,饱食投喂使得大口黑鲈的空壳重降低和脏体指数升高,可能与大口黑鲈蛋白质和脂代谢失衡有关^[26]。与此一致,随着投喂水平的增加,大口黑鲈肌肉脂肪合成基因表达上调,脂肪沉积速度加快。上述研究说明适度限食不仅对成鱼的生长速率无明显影响,还能改善鱼体健康。这提示在保障安全供给的基础上,适度降低投喂水平,可促进饲料粮节约降耗。后续有必要研究大口黑鲈不同生长阶段的最适投喂水平,兼顾生长与肌肉品质,建立大口黑鲈

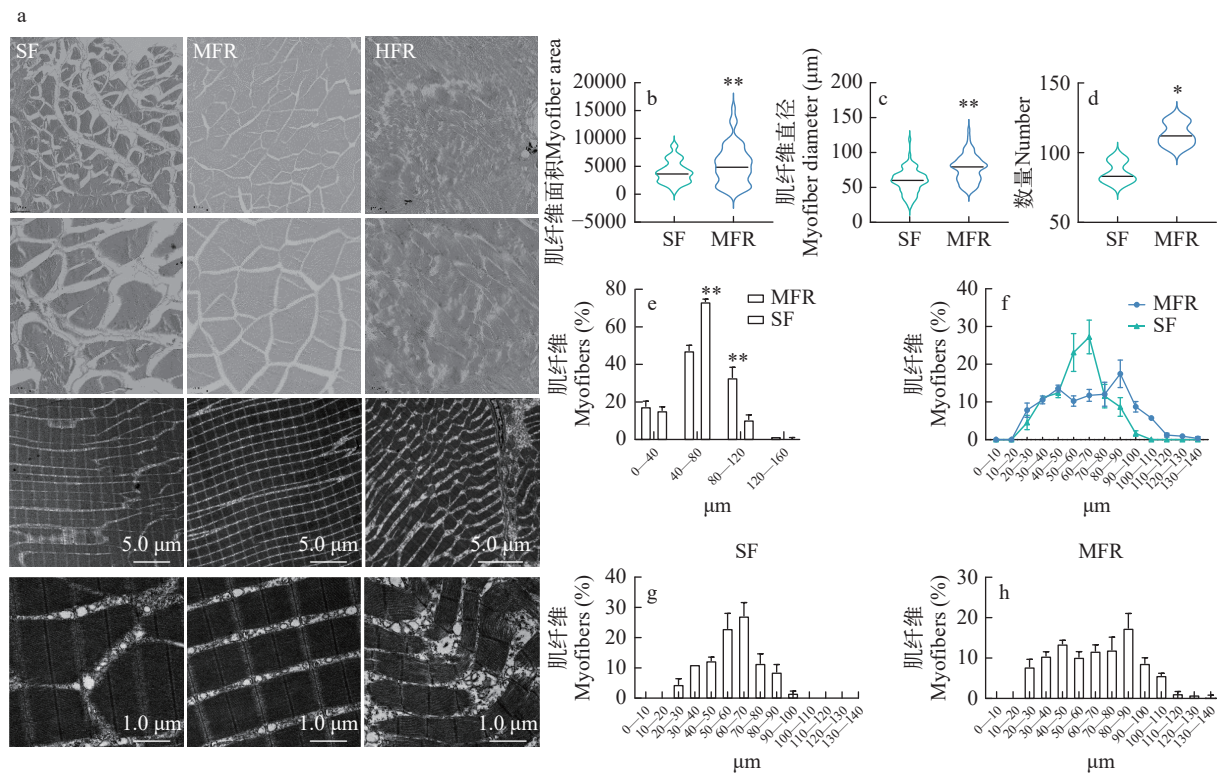


图2 不同投喂水平下大口黑鲈肌肉形态和微观结构

Fig. 2 Muscle morphology and microstructure of *Micropterus salmoides* under different feeding levels

a. 肌肉组织切片与电镜观察; b. 肌纤维面积; c. 肌纤维直径; d. 肌纤维数量; e. 两组肌纤维直径直方图; f. 肌纤维直径分布; g—h. 单组肌纤维直径直方图; 因HFR组肌纤维结构损坏, 故此处仅对SF组和MFR组进行肌纤维特征分析; “*”表示具有显著差异($P<0.05$)

a. myocyte structure; b. myofiber area; c. myofiber diameter; d. number of myofibers; e. histogram of myofiber diameters comparing the two groups; f. distribution of myofiber diameters; g—h. histograms of myofiber diameters of single groups; Due to the structural damage of muscle fibers of the HFR group, only the SF and MFR groups are subjected to muscle fiber characterization; “*” indicates significant differences ($P<0.05$)

全周期的精准投喂模式。

3.2 不同投喂水平对大口黑鲈肌肉品质的影响

随着集约化养殖的发展, 养殖水产品面临着肉质松散、土腥味较重等问题。饱食投喂高脂饲料使罗非鱼鱼体脂肪沉积, 通过诱导肌细胞内质网应激导致肌肉品质受损^[27]。本研究证实饱食投喂引起大口黑鲈肌肉粗脂肪含量增加, 水分、粗蛋白、总脂肪酸和总氨基酸含量降低, 表明高的投喂量会加速肌肉脂肪的蓄积, 这与针对草鱼、鲟等品种的研究结果一致^[28, 29]。适度限食可增加大口黑鲈肌肉水分、粗蛋白质和总氨基酸含量, 说明适当降低投喂量可通过促进鱼类对脂肪的利用而节约蛋白质和氨基酸, 而水分含量的增加可能与饥饿效应有关^[30]。值得注意的是, 30%投喂组的大口黑鲈粗蛋白质含量显著降低, 提示过度限食时大口黑鲈会动用蛋白质供能, 导致肌肉蛋白质大量损耗, 严重影响鱼体生长^[31]。但决定肌肉风味的鲜味、甜味和苦味氨基酸含量均增加, 这与生产实际中采用长时间停食暂养提升肌肉风味的报道一致^[32]。同时本研究发现饱食投喂显著降低大口黑鲈肌肉必需氨基酸、半必需氨基酸、非必需氨基酸和饱和脂肪酸含量, 而限食可增加氨基酸含量, 调节脂肪酸组成。但限食降低了肌肉中多不饱和脂肪酸含量, 增加单不饱和脂肪酸含量。多不饱和脂肪酸在促生

长和抗感染方面发挥重要作用, 单不饱和脂肪酸可降低血脂、保护心血管健康和改善胰岛素敏感性, 两种脂肪酸的平衡对肌肉品质提升十分重要, 后续可进一步探索限食的时间和程度, 从养殖源头提升肌肉品质, 保障优质水产品的供应^[33]。同时本研究虽然对异味物质进行检测, 但3组含量均低于最低检测水平, 这可能与养殖水源和养殖方式有关, 土臭素和2-甲基异茨醇主要来源于藻类、放线菌等微生物的代谢产物, 本次实验全程在室内养殖桶中进行, 水质较好, 藻类和放线菌数量不及室外养殖^[34]。

肌肉硬度、胶着性、咀嚼性、回复性、弹性和凝聚力等质构特性可直接反映肌肉的口感。其中硬度作为反映剪切力的核心指标与弹性、黏附性和咀嚼性等指标密切相关。本研究证实饱食投喂增加肌肉硬度、咀嚼性、胶着性、凝聚性和回复性, 降低肌肉弹性。在哺乳动物和鱼类中, 肌肉硬度与肌纤维生长和直径大小呈负相关^[35], 与肌肉粗脂肪含量呈正相关^[36], 弹性与肌肉中肌动蛋白、肌球蛋白及弹性蛋白的含量正相关^[37]。本研究发现饱食投喂增加肌肉硬度与肌肉粗脂肪含量上升相关。与此一致, 饱食投喂使大口黑鲈肌肉和肝脏脂肪合成相关基因(*ppar* γ 、*acc2*、*scd*)转录水平显著上调。肌肉组织与超微结构观察显示, 饱食投喂使肌纤维间隙增大, 纤维直径缩小, 肌纤维密度降

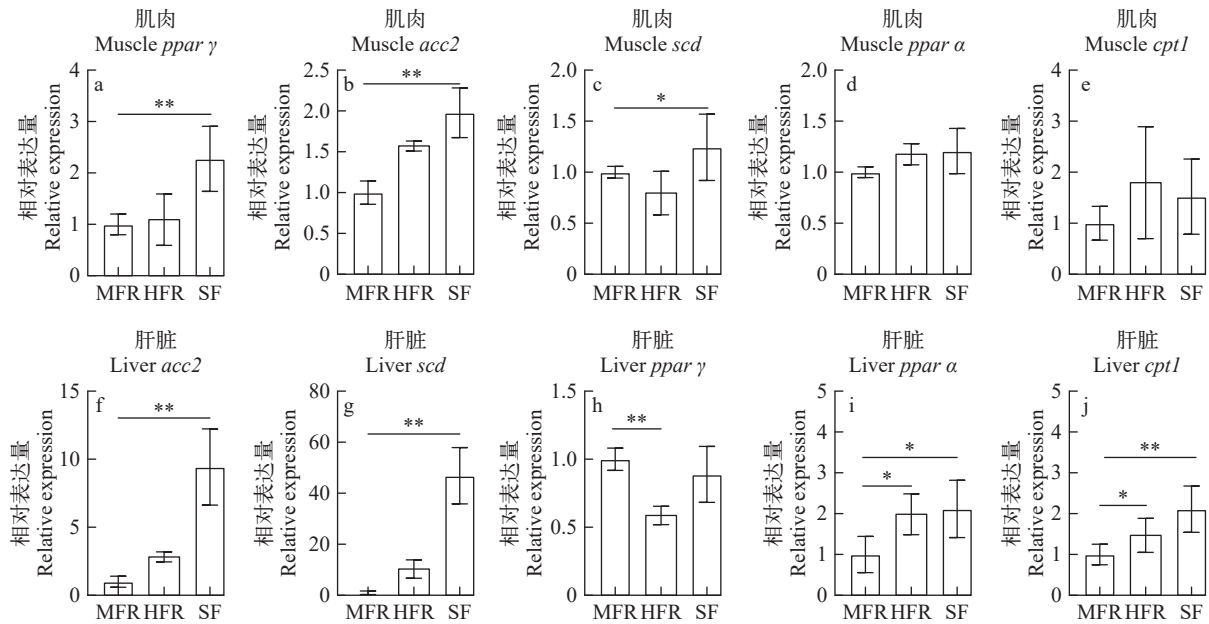


图3 不同投喂水平下大口黑鲈脂质代谢

Fig. 3 Lipid metabolism in *Micropterus salmoides* under different feeding levels

a. 肌肉*ppar* γ ; b. 肌肉*acc2*; c. 肌肉*scd*; d. 肌肉*ppar* α ; e. 肌肉*cpt1*; f. 肝脏*acc2*; g. 肝脏*scd*; h. 肝脏*ppar* γ ; i. 肝脏*ppar* α ; j. 肝脏*cpt1*; “*”表示具有显著差异($P < 0.05$); “**”表示具有极显著差异($P < 0.01$)

a. muscle *ppar* γ ; b. muscle *acc2*; c. muscle *scd*; d. muscle *ppar* α ; e. muscle *cpt1*; f. liver *acc2*; g. liver *scd*; h. liver *ppar* γ ; i. liver *ppar* α ; j. liver *cpt1*; “*” indicates significant differences ($P < 0.05$); “**” indicates extremely significant differences ($P < 0.01$)

低,肌间脂肪成团蓄积^[38]。而适度限食可降低肌肉硬度,增加肌肉弹性,同时降低肌肉咀嚼性、胶着性和韧性的损失,这与肌纤维结构完整、色泽明亮、较大直径肌纤维的比例增大等组织结构观察结果一致。高度限食组肌肉除凝聚力外,其他质构参数均显著降低,可能与肌肉粗蛋白被过度消耗供能有关。生肌调节因子家族(MRFs)和肌肉生长抑制素(MSTN)负责调控肌纤维的生长发育^[39],*myod*、*myf6*和*myog*属于生肌调节因子家族,正向调控肌纤维生长,而*mstn*负向调控肌纤维生长发育。本研究中饱食投喂显著抑制*myod*和*myf6*的表达,促进了*mstn*的表达,提示饱食投喂可能是通过抑制肌纤维生长发育降低肌纤维密度,从而损害鱼体的肌肉质构。研究显示GH/IGF轴与肌肉生长相关,饱食投喂是否通过GH/IGF轴抑制肌纤维生长有待进一步研究^[40]。总之,饱食投喂可降低大口黑鲈肌肉口感,适度限食可提高大口黑鲈肌肉嫩度,提升大口黑鲈肌肉品质。

4 结论

本研究表明饱食投喂加剧大口黑鲈肌肉脂肪蓄积,抑制肌肉生长,改变肌肉质构,降低肌肉品质;适度限食提高大口黑鲈饲料利用率,可在维持生长的前提下改善肌肉品质,促进群体健康,降低养殖成本,为推进养殖方式提效节粮提供了新的途径。(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Liu Y M, Yang H. Vigorously Promote the Breeding Industry to Save Food, Reduce Consumption, Reduce Costs and Increase Efficiency [N]. China Animal Husbandry and Veterinary News, 2025-01-19(001). [刘一明, 杨惠. 大力推动养殖业节粮降耗降本增效 [N]. 中国畜牧兽医报, 2025-01-19(001).]
- [2] Lv H B, Ma Y Y, Hu C T, et al. The individual and combined effects of hypoxia and high-fat diet feeding on nutrient composition and flesh quality in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Food Chemistry*, 2021(343): 128479.
- [3] Cai W, Fu L, Liu H, et al. Dietary yeast glycoprotein supplementation improves the growth performance, intestinal health and disease resistance of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed low-fishmeal diets [J]. *Frontiers in Immunology*, 2023(14): 1164087.
- [4] Li M, Chen B, Peng K, et al. Effects of cottonseed protein on growth performance, serum biochemical indexes, antioxidant enzyme activities, and intestinal and liver morphology of *Micropterus salmoides* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(12): 7915-7929. [李敏, 陈冰, 彭凯, 等. 棉籽蛋白对大口黑鲈生长性能、血清生化指标、抗氧化酶活性及肠道和肝脏形态结构的影响 [J]. 动物营养学报, 2024, 36(12): 7915-7929.]
- [5] Yu M H, Fu X Z, Luo X, et al. Effects of N-carbamylglutamate on growth, liver function, intestinal structure and intestinal flora of *Micropterus salmoides* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2025, 49(4): 152-163. [余明海, 付小哲, 罗霞, 等. N-氨甲酰谷氨酸对大口黑鲈生长、肝功能、肠道结构及其菌群影响 [J]. 水产学报, 2025, 49(4): 152-163.]
- [6] Lv H, Hu W, Xiong S, et al. Depuration and starvation improves flesh quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(9): 3196-3206.
- [7] Li J, Qin Y, Jiang M J, et al. Effects of starvation on body mass, resting metabolic rate, and hematological indices of *Oreochromis niloticus* [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2022, 39(6): 39-45. [李健, 覃悦, 蒋美君, 等. 饥饿对尼罗罗非鱼体质量、静止代谢率和血液学指标的影响 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2022, 39(6): 39-45.]
- [8] Wang L Y, Liu D L, Deng T, et al. Lean aquaculture pattern on muscel quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(4): 23-31. [王刘永, 刘德露, 邓婷, 等. 瘦身养殖模式对草鱼肌肉品质的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(4): 23-31.]
- [9] Chen Y, Sun Z, Liang Z, et al. Addition of l-carnitine to formulated feed improved growth performance, antioxidant status and lipid metabolism of juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. *Aquaculture*, 2020(518): 734434.
- [10] Morash A J, McClelland G B. Regulation of carnitine palmitoyltransferase (CPT) I during fasting in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) promotes increased mitochondrial fatty acid oxidation [J]. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2011, 84(6): 625-633.
- [11] Wang L, Xia Y T, Hu A, et al. Effects of vitamin C supplementation on antioxidant capacity and muscle quality of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) after fasting [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2024, 44(1): 28-34. [汪兰, 夏雨婷, 胡澳, 等. 维生素C对禁食黄颡鱼抗氧化能力和肌肉品质的影响 [J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(1): 28-34.]
- [12] Zhang L, Wu H X, Li W J, et al. Partial replacement of soybean meal by yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) meal influences the flesh quality of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Animal Nutrition*, 2023(12): 108-115.
- [13] Tang H Q, Zhang J D, Chen G, et al. Combined effects of breeding density, feeding frequency and feeding level on specific growth rate, feed conversion rate and pepsin activity of juvenile hybrid groupers (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂) [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2018, 38(1): 22-31. [唐怀庆, 张健东, 陈刚, 等. 养殖密度、投喂频率和投喂水平对珍珠龙胆石斑鱼特定生长率、饲料转化率和胃蛋白酶活力的协同影响 [J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(1): 22-31.]

- [14] Zhu J. Effect of different feeding strategies on growth, feed utilization and liver health of largemouth bass *Micropterus salmoides* [D]. Chongqing: Southwest University, 2022: 22-23. [朱健. 不同投喂模式对大口黑鲈生长、饲料利用和肝脏健康的影响探究 [D]. 重庆: 西南大学, 2022: 22-23.]
- [15] Wu J N, Bao T, Wang M J, *et al.* Effects of feeding rate on gaseous nitrogen loss and feed nitrogen utilization in a rice-yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) co-culture system [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, **39**(4): 749-757. [吴俊男, 鲍婷, 王梦杰, 等. 投喂率对稻-黄颡鱼共作系统气态氮散失和饲料氮利用率的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2022, **39**(4): 749-757.]
- [16] Rao Y, Xu X D, Ding L Y, *et al.* Effects of different feeding quantity on water quality and breeding of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) in biofloc system [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2020(4): 51-54. [饶毅, 徐先栋, 丁立云, 等. 不同饲料投喂量下生物絮团技术对草鱼养殖及水质的影响 [J]. 湖南农业科学, 2020(4): 51-54.]
- [17] Chen P, Zhao Y, Yang Y J, *et al.* Effects of high feeding rate hepatic antioxidant, immune function and lipid metabolism in juvenile largemouth bronze gudgeon (*Coreius guichenoti*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, **35**(9): 5870-5885. [陈沛, 赵煜, 杨元金, 等. 高投饲率对圆口铜鱼幼鱼肝脏抗氧化、免疫功能和脂质代谢的影响 [J]. 动物营养学报, 2023, **35**(9): 5870-5885.]
- [18] Duan S X, Gao S Y, Xu X L, *et al.* The impact of feeding rates on the growth, stress response, antioxidant capacity, and immune defense of Koi (*Cyprinus carpio* var. koi) [J]. *Fishes*, 2025, **10**(4): 181.
- [19] Zhang J J, Wang Y B, Qiao G D, *et al.* Comparison of antioxidant capacity in tissues, muscle ultrastructure and related gene expression of *Larimichthys crocea* with different anti-flowing abilities [J]. *Marine Fisheries*, 2025, **47**(1): 20-28. [张静静, 王亚冰, 乔光德, 等. 不同抗流能力大黄鱼组织抗氧化能力、肌肉超微结构及相关基因表达的比较研究 [J]. 海洋渔业, 2025, **47**(1): 20-28.]
- [20] Xu C, Liu W B, Wang B K, *et al.* Restricted feeding benefits the growth performance and glucose homeostasis of blunt snout bream *Megalobrama amblycephala* fed high-carbohydrate diets [J]. *Aquaculture Reports*, 2020(18): 100513.
- [21] Salminen A, Hyttinen J M T, Kaarniranta K. AMP-activated protein kinase inhibits NF- κ B signaling and inflammation: impact on healthspan and lifespan [J]. *Journal of Molecular Medicine*, 2011, **89**(7): 667-676.
- [22] Zhang L, Zhao Z, Xiong D, *et al.* Effects of ration level on growth, nitrogenous excretion and energy budget of juvenile yellow catfish, *Pelteobagrus fulvidraco* (Richardson) [J]. *Aquaculture Research*, 2011, **42**(7): 899-905.
- [23] Helgesson S, Tarai S, Langner T, *et al.* Spleen volume is independently associated with non-alcoholic fatty liver disease, liver volume and liver fibrosis [J]. *Heliyon*, 2024, **10**(8): e28123.
- [24] Bu X, Lian X, Zhang Y, *et al.* Effects of feeding rates on growth, feed utilization, and body composition of juvenile *Pseudobagrus ussuriensis* [J]. *Aquaculture International*, 2017, **25**(5): 1821-1831.
- [25] Liu W, Wen H, Jiang M, *et al.* Effects of feeding rate and feeding frequency on performance and liver health for juvenile generically improved farmed tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2019, **49**(2): 84-93. [刘伟, 文华, 蒋明, 等. 投喂率和投喂频率对吉富罗非鱼幼鱼生长和肝脏健康的影响 [J]. 淡水渔业, 2019, **49**(2): 84-93.]
- [26] Che M X, Lu Z Y, Liu L, *et al.* Dietary lysophospholipids improves growth performance and hepatic lipid metabolism of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Animal Nutrition*, 2023, **13**(0): 426-434.
- [27] Zhang Z Y, Limbu S M, Zhao S H, *et al.* Dietary l-carnitine supplementation recovers the increased pH and hardness in fillets caused by high-fat diet in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Food Chemistry*, 2022(382): 132367.
- [28] Chu Z P, Jin J L, Chen X H, *et al.* Effects of different feeding rates and frequencies on the growth performance, body composition, and biochemical parameters of juvenile hybrid sturgeon [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, **27**(2): 177-185. [褚志鹏, 金佳利, 陈细华, 等. 不同投喂率和投喂频率对大杂交鲟幼鱼生长、体成分和生化指标的影响 [J]. 中国水产科学, 2020, **27**(2): 177-185.]
- [29] Gong Y L, Chen W J, Han D, *et al.* Effects of food restriction on growth, body composition and gene expression related in regulation of lipid metabolism and food intake in grass carp [J]. *Aquaculture*, 2017(469): 28-35.
- [30] Zhong J X, Li J W, Xie X Y, *et al.* Effects analysis of starvation on morphology and muscle nutrients composition of *Aristichthys nobilis* [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2019, **38**(8): 3515-3520. [钟金香, 李俊伟, 顾晓勇, 等. 饥饿处理对鳙鱼形态和肌肉营养成分的影响分析 [J]. 基因组学与应用生物学, 2019, **38**(8): 3515-3520.]
- [31] Liu M H, Luo H Z, Fu R B, *et al.* Biochemical composition, amino acid and fatty acid composition in juvenile of *Miichthys miiuy* under short-time starvation [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(2): 230-235. [柳敏海, 罗海忠, 傅荣兵, 等. 短期饥饿胁迫对鳊鱼生化组成、脂肪酸和氨基酸组成的影响 [J]. 水生生物学报, 2009, **33**(2): 230-235.]
- [32] Cao H J, Cao Y N, Ma L, *et al.* Patterns of texture quality changes in grass carp during slimming aquaculture process and their mechanisms [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, **50**(19): 216-222. [曹涵锦, 曹英楠, 马良, 等. 瘦身养殖过程中草鱼质构品质变化规律及其机制 [J]. 食品与发酵工业, 2024, **50**(19): 216-222.]
- [33] Xue S. A review of the current knowledge of fatty acid contents, composition and physiological functions of animal-derived intramuscular phospholipids [J]. *Meat Research*, 2016, **30**(9): 40-44. [薛山. 动物源肌肉内磷脂及

- 其脂肪酸含量、组成与生理功效研究进展 [J]. 肉类研究, 2016, **30**(9): 40-44.]
- [34] Huang C H, Leng R D. A review of studies on typical off-flavor substances in fish and meat [J]. *Meat Research*, 2020, **34**(3): 88-93. [黄春红, 冷瑞丹. 肉类食品中典型异味物质研究进展 [J]. 肉类研究, 2020, **34**(3): 88-93.]
- [35] Periago M J, Ayala M D, López-Albors O, *et al.* Muscle cellularity and flesh quality of wild and farmed sea bass, *Dicentrarchus labrax* L [J]. *Aquaculture*, 2005, **249**(1-4): 175-188.
- [36] Chou Y M, Yue Y H, Tong B B, *et al.* The effect of fish meal replacement by earthworm by-products on the growth and muscle quality of largemouth bass (*Micropterus Salmoides*) [J]. *Freshwater Fisheries*, 2024, **54**(5): 33-42. [仇艳铭, 乐玉华, 童彬彬, 等. 蚯蚓渣粉替代鱼粉对大口黑鲈生长和肌肉品质的影响 [J]. 淡水渔业, 2024, **54**(5): 33-42.]
- [37] Xiong M, Wu Z L, Lin X D. Meat quality characteristics of spotted knifejaw (*Oplegnathus punctatus*) cultured under different aquaculture modes [J]. *Food Science*, 2016, **37**(3): 17-21. [熊铭, 吴祖亮, 林向东. 不同养殖模式斑石鲷的鱼肉品质特性分析 [J]. 食品科学, 2016, **37**(3): 17-21.]
- [38] Miljkovic-Gacic I, Wang X, Kammerer C M, *et al.* Fat infiltration in muscle: new evidence for familial clustering and associations with diabetes [J]. *Obesity*, 2008, **16**(8): 1854-1860.
- [39] Abdel Rahman A N, Van Doan H, Elsheshtawy H M, *et al.* Dietary *Salvia officinalis* leaves enhances antioxidant-immune-capacity, resistance to *Aeromonas sobria* challenge, and growth of *Cyprinus carpio* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022(127): 340-348.
- [40] He Y H, Li X, Shi J. Advances of fish muscle growth [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, **48**(9): 3-23. [何玉慧, 李响, 石军. 鱼类肌肉生长研究进展 [J]. 水产学报, 2024, **48**(9): 3-23.]

DIFFERENT FEEDING PATTERNS ON GROWTH AND MUSCLE QUALITY IN *MICROPTERUS SALMOIDES*

WENG Ze-Kun¹, ZENG Qi¹, ZHANG Ling-Kang¹, SUN Yue-Jia², YANG Jun², LI Li-Juan¹,
GU Ze-Mao^{1,3} and YUAN Jun-Fa^{1,3}

(1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Yichang Fisheries Technology Promotion Station, Yichang 443008, China; 3. National Aquatic Animal Diseases Para-reference Laboratory (HZAU), Wuhan 430070, China)

Abstract: With the expansion of aquaculture production and transformations in farming models and structures, it has become an important issue for balancing the output and quality of aquatic products, and promoting resource efficiency and cost-effectiveness in aquaculture. To investigate the effects of different feeding patterns on growth performance and muscle quality in *Micropterus salmoides*, three feeding strategies were implemented: satiation feeding (SF), moderate feed restriction (70%, MFR), and high feed restriction (30%, HFR). After 28d of satiation feeding, compared to the MFR group, the SF group showed a 32.99% decrease in feed utilization ($P<0.05$), a 22.63% and 180% increase in liver body index and spleen body index, respectively ($P<0.05$). Additionally, a 6.97% decrease in empty shell weight ($P<0.05$), a decrease in muscle moisture content, a 58.09% increase in crude fat content, a 3.77% decrease in crude protein content ($P<0.05$), a 21.40% decrease in total amino acid content ($P<0.05$), and a 31.29% increase in muscle hardness ($P<0.05$). The myofiber interstitials increased, the bright and dark bands of muscle fibers became less distinct, and substantial interstitial fat accumulated. The muscle growth-promoting genes *myog* and *myf6* were significantly down-regulated ($P<0.05$), the growth-inhibiting gene *mstn* was significantly up-regulated ($P<0.05$), and the genes related to liver and muscle fat synthesis were significantly up-regulated ($P<0.05$). Compared with the the MFR group, the specific growth rate of the HFR group was significantly reduced by 90.86% ($P<0.05$) and an 82.23% decrease in feed utilization rate ($P<0.05$). The muscle crude protein content reduced by 9.63%, while the total amino acid content increased by 15.45% ($P<0.05$). The *myog* gene was significantly down-regulated ($P<0.05$), and muscle fibers showed varying degrees of damage. In conclusion, moderate food restriction can enhance the muscle quality of *M. salmoides*, improve feed utilization, reduce feed consumption, promote group health, reduce farming costs, and provide a new breeding mode for enhancing efficiency and conserving feed resources.

Key words: Feeding pattern; Satiation feeding; Growth; Muscle quality; *Micropterus salmoides*