

doi: 10.7541/2024.2023.0348

饲料蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼生长、血清生化指标及肝脏抗氧化能力的影响

张姚铮泰¹ 谢凯¹ 石勇¹ 李新平² 肖调义¹ 胡毅^{1*} 戴济鸿^{1*}

(1. 湖南农业大学水产学院, 长沙 410128; 2. 西双版纳土著鱼类研究繁育中心, 西双版纳 666109)

摘要: 设计蛋白质水平(34%、38%、42%)和脂肪水平(5%、8%、11%)的3×3交互实验, 共配制9种实验饲料, 投喂初始体重为(29.96±0.08) g的丝尾鳢(*Hemibagrus wyckiioides*)幼鱼8周, 探究饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢生长、血清生化指标及肝脏抗氧化能力的影响。实验结果表明: 丝尾鳢平均增重率和蛋白质效率随饲料蛋白和脂肪水平的升高而升高。P42L11组增重率最高、饲料系数最低, 但与P38L8、P38L11、P42L8组间并无显著性差异($P>0.05$); P38L11组蛋白质效率最高, 但与P34L11、P38L8、P42L8、P42L11组间并无显著性差异($P>0.05$)。11%脂肪组丝尾鳢平均脏体比、体脂肪含量及血清总胆固醇、甘油三酯、高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇含量最高, 显著高于5%脂肪组($P<0.05$)。油红染色结果表明, 11%脂肪组出现肝脏脂肪蓄积, 且血清平均谷丙转氨酶活性和谷草转氨酶活性显著高于5%和8%脂肪组($P<0.05$)。肠道平均消化酶活力、肝脏抗氧化酶活力及丙二醛含量随着饲料蛋白和脂肪水平的升高而升高。综上所述, 适度提高饲料蛋白和脂肪水平能够增加丝尾鳢增重率, 降低饲料系数。42%蛋白水平下虽然能够获得更高的增重率, 但会导致蛋白质效率降低, 高脂肪水平则会引起肝脏脂肪异常沉积和肝损伤。因此, 在此实验条件下, 丝尾鳢饲料的最佳蛋白水平在38%左右, 不宜超过42%; 最佳脂肪水平在8%左右, 不宜超过11%。

关键词: 蛋白质; 脂肪; 生长性能; 血清生化指标; 抗氧化能力; 丝尾鳢

中图分类号: S965.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)06-0968-11



蛋白质是维持鱼类生长发育和各项生理活动的基础营养物质^[1]。饲料中蛋白质含量是评价饲料质量的重要指标, 当饲料中缺乏蛋白质时, 会导致鱼类营养不足、生长缓慢、免疫应答水平降低等, 影响经济价值^[2]; 饲料蛋白质含量过高时, 超过鱼类的利用能力, 导致蛋白质利用效率下降、肝、肠等器官代谢负荷加重、氮排放增加引起环境污染等。此外, 由于蛋白质原料价格昂贵, 饲料蛋白质含量过高时, 造成原料的浪费, 降低养殖收益^[3]。脂肪是鱼类饲料中重要的能量成分。大量研究表明, 饲料中添加一定剂量的脂肪能够提高鱼体生长和蛋白质的利用效率, 具有蛋白质节约效应^[4]。然而,

饲料中脂肪含量过高会导致鱼体脂质代谢紊乱、免疫和抗氧化功能下降, 从而抑制鱼类生长^[5]。因此, 探究饲料中蛋白质和脂肪的最适水平能够更好地满足鱼类的营养需求, 提高养殖效益, 减少资源浪费, 并促进水产养殖的可持续发展。

丝尾鳢(*Hemibagrus wyckiioides*)隶属鲴形目、鲴科、鳢属, 原产于老挝、泰国、越南等东南亚各国, 在国内主要分布在云南省境内的澜沧江下游支流^[6]。因其体色鲜艳、无肌间刺、肉质洁白细嫩、抗病力强、耐低氧、生长速度快等特点, 成为云南名优土著经济鱼类之一, 养殖前景非常广阔。近年来, 由于在丝尾鳢人工繁殖和育苗技术方面的重大

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2023-12-20

基金项目: 云南省重大科技专项-云南名优土著鱼类设施化养殖利用关键技术创新项目(202202AE090033)资助 [Supported by the Major Science and Technology Project of Yunnan-Key Technology Innovation Project of Facility Aquaculture Utilization of Famous Indigenous Fish of Yunnan (202202AE090033)]

作者简介: 张姚铮泰(1998—), 男, 硕士研究生; 主要从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: 2280233533@qq.com

通信作者: 胡毅, E-mail: huyi740322@163.com 戴济鸿, E-mail: 429022456@hunau.edu.cn *共同通信作者

突破, 以及多种养殖模式的广泛推广, 丝尾鳢养殖业取得了巨大的发展, 并获得了良好的经济和社会效益^[7]。然而, 目前丝尾鳢营养与饲料研究基础薄弱、市场上暂无专用人工配合饲料。关于丝尾鳢仔稚鱼(1.96 g)和较小规格幼鱼(14.88 g)的蛋白脂肪水平组合需求已有研究报道^[8, 9], 但缺乏对大规格幼鱼的营养研究。此外, 上述实验是在室内水族箱进行, 与实际生产实践中池塘养殖模式下的环境差异较大。规格、品种和饲养环境是鱼类蛋白质和脂肪需求量的重要影响因素^[10]。因此, 本研究以较大规格丝尾鳢幼鱼为研究对象, 采用池塘网箱养殖模式, 设计不同蛋白质和脂肪水平的人工配合饲料, 探究其对丝尾鳢生长性能、血清生化指标及肝脏抗氧化能力的影响, 为开发高效环保的丝尾鳢人工配合饲料提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

实验采用了秘鲁蒸汽鱼粉、豆粕和菜粕作为主要蛋白质来源, 购自张家界新瑞生物科技有限公司, 同时使用鱼油作为脂肪来源, 购自佛山市顺德区绅艾利贸易有限公司。根据Lin等^[9]在丝尾鳢幼鱼(14.88 g)上的研究结果发现43%蛋白质水平和10%脂肪水平生长表现最佳。此外, Deng等^[11, 12]分别单独探究了丝尾鳢仔稚鱼(3.2 g)最适蛋白和脂肪水平分别为42%和11%。一般来说, 由于仔稚鱼和小规格幼鱼新陈代谢旺盛、组织器官快速建立, 相较于大规格鱼, 需要更多的蛋白、脂肪以满足生长发育需求^[13, 14]。本实验所使用的是初始体重为(29.96±0.08) g的大规格丝尾鳢幼鱼。综合上述原因分析, 大规格丝尾鳢幼鱼的最适蛋白和脂肪水平应该低于42%和11%, 所以, 本研究以蛋白42%和脂肪11%为最高蛋白脂肪水平, 在Deng等^[11, 12]对丝尾鳢仔稚鱼蛋白和脂肪需求的探究中发现: 蛋白水平低于34%时, 脂肪水平低于5.5%时, 丝尾鳢仔稚鱼的生长和饲料利用率出现了显著降低。因此, 综合各个实验确定了蛋白和脂肪水平的下限为34%和5%。在此上限和下限的范围里, 分别设置了3个不同蛋白质水平(34%、38%、42%)和3个不同脂肪水平(5%、8%、11%)的处理组, 制备了9种不同配方的饲料。这些不同组合的饲料被命名为34P5L、34P8L、34P11L、38P5L、38P8L、38P11L、42P5L、42P8L和42P11L, 其中“P”表示实验饲料蛋白质水平, “L”表示实验饲料脂肪水平, 具体配方见表1。实验原料粉碎后过60目筛, 然后按照配方混合搅拌, 加水加油, 最后通过鱼料专用制粒机(SZLH420b)制成直

径5 mm、长度2—3 mm的颗粒, 晾干至饲料水分含量少于10%, 置于-20℃冰箱中保存备用。每个实验组分为3个平行, 每个平行包括30尾实验鱼。

1.2 饲养与管理

实验鱼来自西双版纳土著鱼类研究繁育中心同批次统一规格的丝尾鳢, 实验在该繁育中心进行, 在池塘内搭建(1.5 m×1.5 m×1.5 m)网箱进行实验, 将810尾健康、规格整齐的丝尾鳢幼鱼(29.96±0.08) g随机分入27个网箱中, 每个网箱30尾。实验鱼在网箱中驯化1周后开始正式实验, 日投喂2次(8:00; 17:00), 投喂量为丝尾鳢体重的3%—5%, 每7d调整投喂量, 在实验期间, 记录日摄食量、天气情况及相关水化学指标等, 养殖实验持续8周。养殖期间的水温为(27±3)℃, 溶解氧高于6.5 mg/L, 氨氮含量低于0.5 mg/L。

1.3 样本采集及指标测定

在养殖实验结束后, 禁食24h, 统计数量及重量以计算生长指标。然后, 我们从每个实验箱中随机选择了4条丝尾鳢, 使用丁香油进行麻醉处理, 随后使用2 mL注射器从尾部静脉抽取血液。这些采集的血液样本被混合后置于无菌离心管中, 在4℃条件下静置过夜, 之后以3000 r/min的速度离心10min。提取上层血清并存放在-80℃的冰箱中, 以备后续使用。另外每箱随机选取4尾丝尾鳢, 测量其体长和体质量。随后将其迅速放在冰盘上进行解剖, 将丝尾鳢的内脏团、肝脏和肠道分离出来, 清理肠道内容物及周边脂肪并同肝脏放入标记好的1.5 mL离心管中, 将离心管液氮速冻后储存在-80℃的冰箱中备用。同时, 每箱中取3尾丝尾鳢冷冻在-20℃的冰箱中作为全鱼样品, 并用于后续的体成分测定。

生长性能指标

存活率(Survival rate, SR, %)= $N_t/N_0 \times 100$

增重率(Weight gain rate, WGR, %)=($W_t - W_0$)/ $W_0 \times 100$

饲料系数(Feed conversion ratio, FCR)= $W_f/(W_t - W_0)$

蛋白质效率(Protein efficiency ratio, PER)=($W_t - W_0$)/($W_f \times CP$) $\times 100$

肥满度(Condition factor, CF, g/cm³)= $W/L^3 \times 100$

肝体比(Hepatosomatic index, HSI)= $W_h/W \times 100$

脏体比(Viscerosomatic index, VSI)= $W_v/W \times 100$

式中, N_t 为单个网箱丝尾鳢终末尾数; N_0 为单个网箱丝尾鳢初始尾数; W_0 为单个网箱丝尾鳢初始体质量(g); W_t 为单个网箱丝尾鳢终末体质量(g); W_f 为饲料总投喂量(g); CP为饲料中粗蛋白质含量(%);

W 为单条丝尾鳢体重(g); W_h 为单条丝尾鳢肝脏重(g); W_v 为单条丝尾鳢内脏重(g); L 为单条丝尾鳢体长(cm)。

体成分测定 鱼体水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分含量分别采用105℃烘箱干燥恒重法(GB/T5009.3-2003)、凯氏定氮法(GB/T5009.5-1985)、索氏抽提法(GB/T5009.6-1985)和550℃马弗炉(GB/T5009.4-1985)进行测定。

肠道消化酶活性测定 肠道样品解冻后匀浆,并用离心机3500 r/min离心10min,取上清液保存待测。测定丝尾鳢肠道胰蛋白酶(Trypsin, TPS)、脂肪酶(Lipase, LPS)、淀粉酶(Amylase, AMS)活性,试剂盒购自南京建成生物工程研究所,所用仪器为UV-5200型分光光度计。

血清指标的测定 测定丝尾鳢血清高密度脂蛋白胆固醇(High-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(Low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、甘油三酯(Triglyceride, TG)、总胆固醇(Total cholesterol, TC)、谷草转氨酶(Glutamic oxalacetic transaminase, GOT)、谷丙转氨酶(Glutamate pyruvic transaminase, GPT)和尿素

氮(Blood urea nitrogen, BUN)含量,试剂盒购自南京建成生物工程研究所,所用仪器为Thermo-1510型酶标仪。

肝脏组织形态的观察 将肝脏组织置于冰冻切片机中制作5 μm冰冻切片,油红染液浸染10min,蒸馏水复洗。60%异丙醇洗去多余的染液,蒸馏水洗。使用Mary氏苏木素复染3—8min,蒸馏水洗。最后使用甘油或甘油明胶封片。通过光学显微镜镜检,进行图像分析,可观察到脂滴沉积的情况,再通过image-Pro Plus定量结果。

肝脏抗氧化指标测定 肝脏样品解冻后匀浆,并用离心机3500 r/min离心10min,取上清液保存待测。测定丝尾鳢肝脏丙二醛(Malondialdehyde, MDA)、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、谷胱甘肽(Glutathione, GSH)、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GPX)抗氧化酶活性,试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

1.4 数据统计与分析

首先使用Excel 2019对实验结果进行统计,用SPSS 24.0进行双因素方差分析(Two-way ANOVA),

表1 饲料组成及营养水平(干物质)

Tab. 1 Composition of the diets and nutrition level (dry matter; %)

项目 Item	组别Group								
	34P5L	34P8L	34P11L	38P5L	38P8L	38P11L	42P5L	42P8L	42P11L
原料Ingredient									
秘鲁蒸汽鱼粉Peruvian fish meal	20.00	20.00	20.00	25.00	25.00	25.00	30.00	30.00	30.00
豆粕Soybean meal	10.00	10.00	10.00	12.50	12.50	12.50	15.00	15.00	15.00
菜籽粕Rapeseed meal	10.00	10.00	10.00	12.50	12.50	12.50	15.00	15.00	15.00
啤酒酵母Brewer yeast	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
小麦粉Wheat flour	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20	26.20
麦麸Wheat bran	25.96	22.96	19.96	16.16	13.16	10.16	6.36	3.36	0.36
鱼油Fish oil	1.00	4.00	7.00	0.80	3.80	6.80	0.60	3.60	6.60
磷酸二氢钙Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
氯化胆碱Choline	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
防霉剂Mould inhibitor ¹	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
抗氧化剂Antioxidant ²	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
预混料Vitamin and mineral premix ³	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
合计Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平Nutrient level ⁴									
粗蛋白质Crude protein	34.25	34.01	33.82	38.43	37.96	37.49	42.83	42.31	41.91
粗脂肪Crude lipid	5.03	8.03	11.13	4.93	7.94	11.06	4.85	7.86	11.03
粗灰分Ash	7.74	7.68	7.57	7.89	7.76	7.63	8.19	8.05	7.93

注: ¹防霉剂主要成分是丙酸钙; ²抗氧化剂主要成分是乙氧基喹啉; ³预混料来源于青岛玛斯特生物技术有限公司,成分参考实验室前期研究^[15]; ⁴实测值

Note: ¹The main component of mould inhibitor is calcium propionate; ²The main component of antioxidant is ethoxyquinoline; ³The premix is sourced from Qingdao Master Biotechnology Co., LTD., and the composition is referred to the previous research of the laboratory; ⁴Measured values

再采用Duncan检验进行事后多重比较分析组间的差异显著性, 显著性水平为 $P<0.05$, 实验数据用“平均值 $\pm$ 标准误”表示。

2 结果

2.1 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼生长性能的影响

与P34组相比, P38和P42组的增重率和蛋白质效率显著升高($P<0.05$), 饲料系数显著降低($P<0.05$), 且P38与P42组无显著差异($P>0.05$); 与L5组相比, L8组和L11组的增重率和蛋白质效率显著升高($P<0.05$), 饲料系数显著降低($P<0.05$), 并且L8与L11组无显著差异($P>0.05$)。肝体比和肥满度与饲料蛋白质和脂肪水平成正比; 脏体比与饲料脂肪水平成正比, L11组显著高于L5组($P<0.05$)。饲料蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢的生长性能指标均无显著交互影响($P>0.05$; 表 2)。

2.2 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼体成分的影响

饲料蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢鱼体粗蛋白质

有显著交互影响($P<0.05$); 然而对于水分、粗脂肪和粗灰分饲料蛋白质和脂肪水平无显著交互影响($P>0.05$)。当饲料蛋白质水平升高时, 丝尾鳢鱼体粗蛋白质含量显著上升($P<0.05$), 水分和粗灰分含量呈下降趋势, P38与P42组粗蛋白质含量显著高于P34组($P<0.05$), 且P42组显著高于P38组($P<0.05$); P34组水分和粗灰分含量显著高于P38和P42组($P<0.05$)。当饲料脂肪水平升高时, 丝尾鳢鱼体粗脂肪含量显著上升($P<0.05$), 水分含量显著下降($P<0.05$; 表 3)。

2.3 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼肠道消化酶的影响

饲料蛋白质水平和脂肪水平对丝尾鳢肠道胰蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶无显著交互影响($P>0.05$)。随着饲料蛋白质和脂肪水平的提高, 丝尾鳢肠道胰蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶活性均呈上升趋势。P38与P42组的胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶活性显著高于P34组($P<0.05$), 且P42组胰蛋白酶和脂肪酶活性显著高于P38组($P<0.05$); L8和L11组的脂肪酶和淀粉酶活性显著高于L5组($P<0.05$), 且L11组脂肪酶活性显著高于L8组($P<0.05$; 表 4)。

表 2 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼生长性能的影响

Tab. 2 Effects of dietary protein and lipid levels on growth of juvenile *Hemibagrus wyckioides*

组别 Group	终末均重 FBW (g)	增重率 WGR (%)	饲料系数 FCR	蛋白质 效率PER	存活率 SR (%)	肝体比 HSI	脏体比 VSI	肥满度 CF (g/cm ³)
P34L5	78.47 $\pm$ 1.40 ^a	161.86 $\pm$ 4.96 ^a	1.95 $\pm$ 0.04 ^d	1.51 $\pm$ 0.03 ^a	96.67 $\pm$ 1.93	1.95 $\pm$ 0.09	16.85 $\pm$ 0.81	1.55 $\pm$ 0.08
P34L8	83.34 $\pm$ 1.75 ^{ab}	178.52 $\pm$ 5.66 ^{ab}	1.74 $\pm$ 0.07 ^c	1.69 $\pm$ 0.07 ^{ab}	97.78 $\pm$ 1.11	2.13 $\pm$ 0.11	17.05 $\pm$ 0.83	1.63 $\pm$ 0.02
P34L11	91.03 $\pm$ 1.64 ^{bc}	204.03 $\pm$ 5.87 ^{bc}	1.56 $\pm$ 0.04 ^b	1.88 $\pm$ 0.05 ^{bc}	93.33 $\pm$ 1.93	2.24 $\pm$ 0.14	18.01 $\pm$ 0.44	1.56 $\pm$ 0.04
P38L5	86.88 $\pm$ 1.85 ^{bc}	189.15 $\pm$ 5.99 ^{abc}	1.63 $\pm$ 0.05 ^{bc}	1.61 $\pm$ 0.05 ^a	97.78 $\pm$ 1.11	2.11 $\pm$ 0.10	16.35 $\pm$ 0.12	1.70 $\pm$ 0.05
P38L8	104.19 $\pm$ 3.94 ^d	248.33 $\pm$ 13.07 ^d	1.27 $\pm$ 0.06 ^a	2.07 $\pm$ 0.10 ^c	96.67 $\pm$ 1.93	2.13 $\pm$ 0.07	17.12 $\pm$ 0.13	1.56 $\pm$ 0.02
P38L11	105.10 $\pm$ 3.85 ^d	250.19 $\pm$ 12.84 ^d	1.24 $\pm$ 0.06 ^a	2.14 $\pm$ 0.12 ^c	98.89 $\pm$ 1.11	2.19 $\pm$ 0.14	17.59 $\pm$ 0.72	1.61 $\pm$ 0.04
P42L5	93.36 $\pm$ 3.43 ^c	211.68 $\pm$ 11.73 ^c	1.49 $\pm$ 0.09 ^b	1.62 $\pm$ 0.10 ^a	96.67 $\pm$ 1.93	2.17 $\pm$ 0.10	16.13 $\pm$ 0.76	1.53 $\pm$ 0.09
P42L8	105.82 $\pm$ 2.95 ^d	252.84 $\pm$ 9.54 ^d	1.25 $\pm$ 0.06 ^a	1.92 $\pm$ 0.10 ^{bc}	96.67 $\pm$ 1.93	2.20 $\pm$ 0.03	16.82 $\pm$ 0.49	1.62 $\pm$ 0.04
P42L11	109.79 $\pm$ 0.75 ^d	267.31 $\pm$ 1.53 ^d	1.19 $\pm$ 0.02 ^a	1.99 $\pm$ 0.04 ^c	94.44 $\pm$ 1.11	2.37 $\pm$ 0.07	18.40 $\pm$ 0.50	1.74 $\pm$ 0.06
饲料蛋白质水平 Dietary protein level (%)								
P34	84.28 $\pm$ 2.00 ^a	181.47 $\pm$ 6.72 ^a	1.75 $\pm$ 0.06 ^b	1.70 $\pm$ 0.06 ^a	95.93 $\pm$ 1.08	2.11 $\pm$ 0.07	17.30 $\pm$ 0.40	1.58 $\pm$ 0.03
P38	98.72 $\pm$ 3.41 ^b	229.22 $\pm$ 11.46 ^b	1.38 $\pm$ 0.07 ^a	1.94 $\pm$ 0.09 ^b	97.78 $\pm$ 0.79	2.14 $\pm$ 0.05	17.02 $\pm$ 0.28	1.62 $\pm$ 0.03
P42	102.99 $\pm$ 2.81 ^b	243.94 $\pm$ 9.42 ^b	1.31 $\pm$ 0.05 ^a	1.84 $\pm$ 0.07 ^b	95.93 $\pm$ 0.93	2.25 $\pm$ 0.05	17.12 $\pm$ 0.45	1.63 $\pm$ 0.05
饲料脂肪水平 Dietary lipid level (%)								
L5	86.23 $\pm$ 2.46 ^a	187.56 $\pm$ 8.27 ^a	1.69 $\pm$ 0.07 ^b	1.58 $\pm$ 0.04 ^a	97.04 $\pm$ 0.87	2.08 $\pm$ 0.06	16.44 $\pm$ 0.34 ^a	1.59 $\pm$ 0.04
L8	97.78 $\pm$ 3.92 ^b	226.56 $\pm$ 13.01 ^b	1.42 $\pm$ 0.09 ^a	1.89 $\pm$ 0.07 ^b	97.04 $\pm$ 0.87	2.16 $\pm$ 0.04	17.00 $\pm$ 0.28 ^{ab}	1.61 $\pm$ 0.02
L11	101.97 $\pm$ 3.07 ^b	240.51 $\pm$ 10.30 ^b	1.33 $\pm$ 0.06 ^a	2.00 $\pm$ 0.05 ^b	95.56 $\pm$ 1.11	2.26 $\pm$ 0.07	18.00 $\pm$ 0.31 ^b	1.64 $\pm$ 0.04
Two-way ANOVA								
饲料蛋白Dietary protein	0	0	0	0.005	0.293	0.217	0.843	0.497
饲料脂肪Dietary lipid	0	0	0	0	0.447	0.098	0.015	0.567
交互Interaction	0.268	0.246	0.530	0.496	0.362	0.816	0.821	0.056

注: 数据表述为均值 $\pm$ 标准误, 同列同指标数据的肩标字母不同代表差异显著($P<0.05$), 下同

Note: Values are presented as means $\pm$ SE. Letters in the same row with the same superscript or absence of superscripts indicate no significant difference ($P<0.05$). The same applies below

表 3 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼体成分的影响(干重基础)

Tab. 3 Effects of dietary protein and lipid levels body composition of juvenile *H. wyckioides* (dry weight basis)

组别 Group	水分 Moisture (%)	粗蛋白质 Crude protein (%)	粗脂肪 Crude lipid (%)	粗灰分 Crude ash (%)
P34L5	71.36±0.39 ^c	52.73±0.68 ^a	28.33±0.83 ^a	10.60±0.28
P34L8	70.07±0.28 ^{cd}	53.04±0.28 ^{ab}	33.73±0.50 ^b	10.56±0.60
P34L11	68.61±0.46 ^b	53.12±0.55 ^{ab}	37.22±0.88 ^c	10.05±0.68
P38L5	70.60±0.15 ^{de}	54.49±0.73 ^{abc}	31.58±0.42 ^b	10.07±0.17
P38L8	69.26±0.04 ^{bc}	54.97±0.57 ^{bcd}	33.65±0.80 ^b	9.64±0.20
P38L11	67.67±0.33 ^a	56.33±0.60 ^{cde}	36.35±0.77 ^c	9.17±0.05
P42L5	69.81±0.25 ^{cd}	56.69±0.63 ^{de}	31.54±1.14 ^b	9.61±0.18
P42L8	69.37±0.21 ^{bc}	57.99±0.74 ^e	33.81±1.06 ^b	9.42±0.36
P42L11	67.51±0.06 ^a	54.71±0.43 ^{bc}	37.86±0.08 ^c	9.26±0.07
饲料蛋白质水平 Dietary protein level (%)				
P34	70.01±0.44 ^b	52.96±0.27 ^a	33.09±1.35	10.40±0.29 ^b
P38	69.18±0.44 ^a	55.26±0.42 ^b	33.86±0.77	9.63±0.15 ^a
P42	68.90±0.36 ^a	56.46±0.57 ^c	34.40±1.03	9.43±0.13 ^a
饲料脂肪水平 Dietary lipid level (%)				
L5	70.59±0.26 ^c	54.63±0.67	30.48±0.69 ^a	10.09±0.18
L8	69.57±0.16 ^b	55.33±0.77	33.73±0.41 ^b	9.87±0.27
L11	67.93±0.24 ^a	54.72±0.53	37.14±0.40 ^c	9.50±0.24
Two-way ANOVA				
饲料蛋白 Dietary protein	0	0	0.151	0.009
饲料脂肪 Dietary lipid	0	0.317	0	0.146
交互 Interaction	0.484	0.010	0.106	0.933

2.4 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼血清生化指标的影响

饲料蛋白质和脂肪水平对HDL-C、LDL-C、TG、TC、GOT、GPT、BUN等血清生化指标均无显著交互影响($P>0.05$)。随着饲料蛋白质水平的提高,丝尾鳢血清中总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、尿素氮(BUN)、谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)呈上升趋势,但GOT、GPT和BUN趋势不显著($P>0.05$),P38与P42组TC、TG和LDL-C含量显著高于P34组($P<0.05$),HDL-C含量在P42组显著上升($P<0.05$);随着饲料脂肪水平的提高,血清中TC、TG、LDL-C、HDL-C、GOT和GPT呈上升趋势,在L11组均显著上升($P<0.05$;表5)。

2.5 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼肝脏切片油红染色影响

在肝脏油红染色后,在同一蛋白水平下,与L5和L8脂肪组相比,L11脂肪组肝脏脂滴的体积和数量显著增加($P<0.05$);在同一脂肪水平下,随着饲料

蛋白质水平的提高,肝脏脂滴的变化不明显($P>0.05$;图1)。

2.6 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼肝脏抗氧化能力的影响

饲料蛋白质和脂肪水平对肝脏中SOD有显著交互影响($P<0.05$),对肝脏中GPX、GSH、CAT和MDA无显著交互影响($P>0.05$)。随着饲料蛋白质水平的提高,丝尾鳢肝脏中谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)、谷胱甘肽(GSH)和超氧化物歧化酶(SOD)活性呈上升趋势,与P34组相比,P38与P42组GPX、GSH、SOD活性显著上升($P<0.05$),且P42组GPX活性显著高于P38组($P<0.05$);随着饲料脂肪水平的提高,肝脏中GPX、GSH、SOD、CAT和MDA活性均呈上升趋势,L8和L11组GSH、SOD和CAT活性显著高于L5组($P<0.05$),L11组GPX和MDA含量显著高于L5与L8组($P<0.05$;表6)。

3 讨论

3.1 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼生长性能、体成分及肠道消化酶的影响

蛋白质含量是影响鱼类生长性能的关键因素,

表 4 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼消化酶活性的影响
Tab. 4 Effects of dietary protein and lipid levels on digestive enzymes activities of juvenile *H. wyckioides*

组别Group	胰蛋白酶TPS (U/μg prot)	脂肪酶LPS (U/g prot)	淀粉酶AMS (U/g prot)
P34L5	2.10±0.02 ^{ab}	10.57±0.34 ^a	0.53±0.04 ^a
P34L8	2.11±0.08 ^{ab}	12.67±0.39 ^a	0.64±0.06 ^{ab}
P34L11	1.93±0.03 ^a	17.44±1.21 ^b	0.73±0.05 ^{abc}
P38L5	2.19±0.05 ^{bc}	18.17±0.72 ^b	0.72±0.04 ^{abc}
P38L8	2.22±0.07 ^{bc}	20.76±0.46 ^c	0.80±0.05 ^{bc}
P38L11	2.34±0.02 ^{bcd}	24.84±0.64 ^c	0.81±0.09 ^{bc}
P42L5	2.31±0.11 ^{bcd}	22.26±0.88 ^{cd}	0.64±0.07 ^{ab}
P42L8	2.42±0.05 ^{cd}	23.89±1.20 ^{de}	0.83±0.09 ^{bc}
P42L11	2.54±0.15 ^d	26.28±0.63 ^e	0.93±0.08 ^c
饲料蛋白质水平Dietary protein level (%)			
P34	2.05±0.04 ^a	13.56±1.08 ^a	0.64±0.04 ^a
P38	2.25±0.03 ^b	21.26±1.02 ^b	0.78±0.04 ^b
P42	2.42±0.06 ^c	24.14±0.75 ^c	0.80±0.06 ^b
饲料脂肪水平Dietary lipid level (%)			
L5	2.20±0.05	17.00±1.75 ^a	0.63±0.04 ^a
L8	2.25±0.06	19.11±1.72 ^b	0.76±0.05 ^b
L11	2.27±0.10	22.86±1.44 ^c	0.82±0.05 ^b
Two-way ANOVA			
饲料蛋白Dietary protein	0	0	0.015
饲料脂肪Dietary lipid	0.513	0	0.008
交互Interaction	0.103	0.357	0.657

通常来说,在一定范围内饲料蛋白质水平的升高会带来生长性能的提升^[16]。在丝尾鳢仔稚鱼(1.96 g)对蛋白脂肪需求的研究中,饲料蛋白水平(44%和39%)并未显著影响丝尾鳢的生长性能^[8]。在较小规格的丝尾鳢(14.88 g)的蛋白脂肪需求研究中,丝尾鳢增重率随着饲料中蛋白水平的升高(37%、43%和49%),呈现先升高后降低的趋势,在43%组生长达到最佳水平^[9]。然而,研究结果表明,随着饲料蛋白质水平的升高,较大规格丝尾鳢幼鱼的生长性能并未出现拐点,而是呈上升趋势,在42%蛋白水平时最高。一方面,这可能是由于幼鱼经历快速生长阶段,需要更多的蛋白质维持机体的能量消耗以及支持肌肉和组织的生长^[17,18]。鱼体粗蛋白含量的结果也印证了这一观点,即随着饲料蛋白质含量的提高,全鱼粗蛋白含量增加,蛋白质沉积的增加最终表现为增重率的上升。另一方面,与在室内水族箱中的养殖模式相比,池塘网箱养殖可能使丝尾鳢获得更多的活动空间,增加了用于能量消耗的蛋白质支出^[19]。在鞍带石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus*)、线鳢(*Channa striata*)中也发现了类似的研究结果^[20,21]。然而,虽然较高的蛋白水平能够促进丝尾鳢的生长,但与38%蛋白水平相比,42%蛋白水

平的蛋白质利用效率降低。脂肪是水产动物的主要能量源^[22]。在本实验中,随着饲料脂肪水平的升高,丝尾鳢生长性能和饲料利用率呈上升趋势。值得注意的是,无论在仔稚鱼和较小规格的丝尾鳢研究中,鱼体的生长性能均随饲料脂肪水平的升高而呈上升趋势。此外,在饲料蛋白质水平相同的情况下,丝尾鳢幼鱼全鱼粗脂肪、脏体比、肝体比均随脂肪水平升高而升高,这可能预示着丝尾鳢能够消化吸收并沉积较高水平的饲料脂肪^[23]。此外,饲料脂肪也显现出了对蛋白质的节约效应,如P38L8组丝尾鳢增重率显著高于P42L5组。这与草金鱼(*Carassius auratus*)^[24]、丝背细鳞鲃(*Stephanolepis cirrhifer*)^[25]和多鳞鱖(*Sillago sihama*)^[26]的研究结果相一致。蛋白质效率随着饲料中脂肪水平的升高而逐渐增加,这与许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)研究中的结果类似,这表明饲料脂肪水平的升高能够节约蛋白质促进丝尾鳢的生长^[27]。

肠道消化酶活力能够在一定程度上反应鱼类对饲料中营养物质的消化状态^[28]。在本实验中,丝尾鳢幼鱼肠道胰蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶活性均随着饲料中蛋白质和脂肪水平升高呈上升趋势,说明尾鳢能够产生更多的消化酶分解饲料中高水平

表5 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼血清生化指标的影响

Tab. 5 Effects of dietary protein and lipid levels on serum biochemical indexes of juvenile *H. wyckioides*

组别 Group	总胆固醇 TC (mmol/L)	甘油三酯 TG (mmol/L)	低密度脂 蛋白胆固醇 LDL-C (mmol/L)	高密度脂 蛋白胆固醇 HDL-C (mmol/L)	谷草转氨酶 GOT (U/L)	谷丙转氨酶 GPT (U/L)	尿素氮 BUN (mmol/L)
P34L5	7.13±0.60 ^a	7.21±0.54 ^a	7.93±0.21 ^a	2.30±0.02 ^{ab}	30.44±0.85 ^a	3.27±0.26 ^a	5.10±0.39
P34L8	7.14±0.16 ^a	7.97±0.06 ^{ab}	8.06±0.30 ^{ab}	2.24±0.06 ^a	31.34±0.56 ^{abc}	4.08±0.18 ^{abcd}	5.34±0.54
P34L11	7.75±0.18 ^{ab}	8.23±0.24 ^{bc}	8.36±0.22 ^{abc}	2.68±0.05 ^{cd}	34.43±0.38 ^{cd}	4.64±0.34 ^{bcd}	4.17±0.25
P38L5	8.75±0.25 ^{bc}	8.03±0.45 ^{ab}	8.46±0.41 ^{abc}	2.58±0.04 ^{bcd}	30.89±0.33 ^{ab}	4.40±0.41 ^{abcd}	4.97±0.40
P38L8	8.97±0.15 ^c	8.13±0.10 ^{ab}	8.79±0.32 ^{abcd}	2.36±0.06 ^{abc}	31.16±0.97 ^{ab}	3.82±0.66 ^{abc}	4.52±0.52
P38L11	10.02±0.50 ^{de}	9.05±0.19 ^{cd}	9.43±0.08 ^d	2.56±0.10 ^{abcd}	37.25±0.27 ^{de}	5.00±0.03 ^{cd}	5.70±0.58
P42L5	8.66±0.26 ^{bc}	8.05±0.28 ^{ab}	8.86±0.15 ^{bcd}	2.38±0.19 ^{abc}	29.71±0.57 ^a	3.40±0.10 ^{ab}	5.98±0.29
P42L8	9.40±0.17 ^{cd}	8.53±0.18 ^{bcd}	8.95±0.07 ^{cd}	2.67±0.15 ^{cd}	33.87±2.22 ^{bc}	4.63±0.55 ^{bcd}	4.88±0.81
P42L11	10.69±0.35 ^e	9.24±0.09 ^d	9.59±0.39 ^d	2.83±0.06 ^d	38.83±1.18 ^e	5.33±0.43 ^d	5.20±0.60
饲料蛋白质水平Dietary protein level (%)							
P34	7.34±0.21 ^a	7.80±0.23 ^a	8.11±0.14 ^a	2.41±0.07 ^a	32.07±0.68	4.00±0.24	4.87±0.27
P38	9.25±0.26 ^b	8.40±0.22 ^b	8.89±0.21 ^b	2.50±0.05 ^{ab}	33.10±1.08	4.41±0.28	5.06±0.31
P42	9.58±0.33 ^b	8.61±0.20 ^b	9.13±0.17 ^b	2.63±0.10 ^b	34.14±1.51	4.45±0.35	5.36±0.34
饲料脂肪水平Dietary lipid level (%)							
L5	8.18±0.33 ^a	7.76±0.26 ^a	8.42±0.19 ^a	2.42±0.07 ^a	30.34±0.35 ^a	3.69±0.23 ^a	5.35±0.24
L8	8.51±0.36 ^a	8.21±0.10 ^a	8.60±0.19 ^a	2.42±0.08 ^a	32.13±0.84 ^b	4.18±0.28 ^a	4.91±0.34
L11	9.48±0.48 ^b	8.84±0.18 ^b	9.12±0.23 ^b	2.69±0.05 ^b	36.84±0.74 ^c	4.99±0.19 ^b	5.02±0.34
Two-way ANOVA							
饲料蛋白 Dietary protein	0	0.007	0	0.039	0.064	0.300	0.515
饲料脂肪 Dietary lipid	0	0.001	0.012	0.004	0	0.002	0.565
交互Interaction	0.354	0.745	0.877	0.060	0.107	0.207	0.190

的蛋白和脂肪, 促进营养物质的吸收利用, 进而提高鱼体生长^[29]。在黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[30]和海鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[31]的研究中也发现, 肠道消化酶的活力随着饲料蛋白和脂肪水平的升高而升高。

3.2 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼血清生化指标的影响

血清中TC、TG、HDL-C和LDL-C水平常用于反映机体脂质代谢状况^[32]。有研究表明, 杂交石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀)血清中TG、TC、HDL-C和LDL-C含量会随着饲料中蛋白质含量的升高而升高^[33]。本实验研究结果与其类似, 蛋白质参与机体多种生理过程, 脂质合成自然也包含在内, 因此, 增加蛋白质的摄入可能导致脂肪合成率的升高, 进而增加了血清中关联脂代谢指标的升高^[34]。此外, 在本研究中, 随着饲料脂肪水平的升高, 丝尾鳢幼鱼血清TG、TC、

HDL-C和LDL-C水平升高, 这与之之前在双棘黄姑鱼(*Nibea diacanthus*)和大黄鱼(*Pseudosciaena crocea* R.)中的研究结果一致^[35, 36]。肝脏是TC和TG代谢的重要器官, 血清TC、TG含量上升可能引起肝脏脂肪含量的上升^[37]。肝脏切片油红O染色结果表明, 饲料中11%脂肪水平增加了丝尾鳢肝脏脂滴数量和体积, 引起脂肪沉积, 这可能是肝体比和脏体比增加的原因。过多脂肪沉积在肝脏中, 能够诱发肝脏纤维化以及肝炎等疾病, 进而影响肝脏正常功能^[38]。谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)含量能够反映肝脏健康状况, 在正常情况下, 这两种酶存在于肝脏细胞中, 当肝脏功能受损时大量释放到血清中, 引起血清中GOT和GOT的升高^[32]。研究结果表明, 丝尾鳢血清GPT、GOT活力在11%脂肪水平组达到最高, 显著高于5%和8%脂肪组, 说明饲料高水平脂肪引起肝脏的脂肪蓄积, 可能诱发了肝脏功能损伤。

3.3 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼肝脏抗氧化能力的影响

鱼类中的抗氧化指标可以用来评估其抗氧化性能, 以及对抗自由基和氧化应激的能力^[39]。细胞在生存和代谢过程中, 由于氧分子的参与, 发生氧化反应, 产生氧自由基。GPX、GSH、SOD、CAT是机体抗氧化系统的重要组成部分, 它们共同协作以清除氧自由基, 有助于维护细胞和生物体的氧化平衡, 减少氧自由基引起的氧化应激和损伤^[40]。在正常情况下, 氧自由基的产生和清除维持在动态平衡中。在某些情况下, 如受到环境压力、病原菌侵袭、营养条件的改变、能够增加鱼体多个组织氧自由基的浓度, 当超过机体抗氧化作用的能力时, 会造成组织和器官的氧化损伤。氧化损伤能够导致细胞膜、蛋白质及DNA的损伤, 并干扰细胞的生理活动^[41]。在本研究中, 丝尾鳢肝脏抗氧化酶活力随着饲料蛋白和脂肪水平的升高而显著提高。一方面, 可能是由于蛋白质的提高为抗氧化酶的合成提供了充足的底物^[42]。另一方面, 蛋白质和脂肪能够发生氧化反应, 其中, 油脂中的不饱和脂肪酸的碳碳双键非常容易发生氧化, 形成饱和脂肪酸^[43]。本研究结果表明, 随着饲料脂肪水平的升高, 丝尾鳢幼鱼肝脏中MDA水平显著升高, MDA是脂肪过氧化反应的产物, 其含量的升高说明脂质过氧化反应加剧^[41]。饲料中蛋白和脂肪水平的升高加速了氧自由基的产生, 鱼体需要通过产生高浓度的过氧化酶, 中和大量产生的氧自由基, 从而导致肝脏抗氧化酶浓度的升高^[44, 45]。与本研究相似的是, 在吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[46]和大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)^[47]研究结果中也发现了肝脏抗氧化

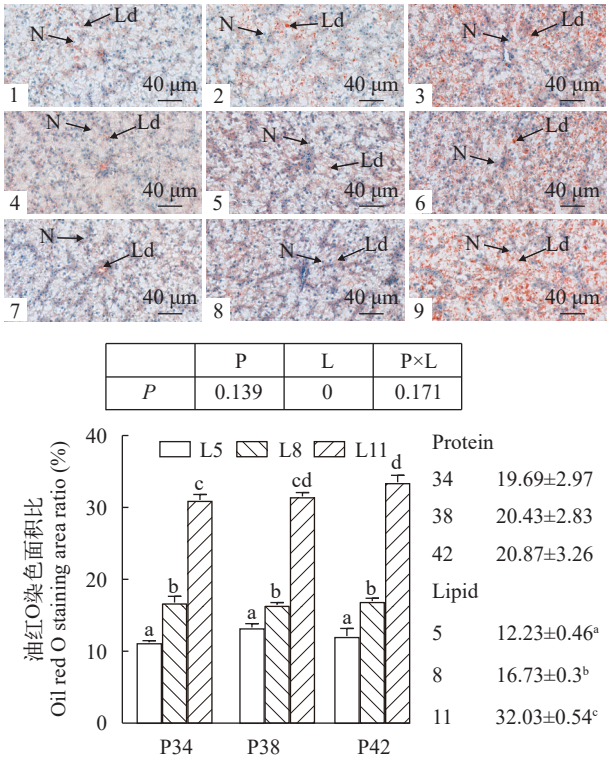


图1 丝尾鳢肝脏油红O染色结果(放大倍数400×)

Fig. 1 Results of liver oil red O staining of juvenile *H. wyckioides* (Amplification factor 400×)

1. P34L5组; 2. P34L8组; 3. P34L11组; 4. P38L5组; 5. P38L8组; 6. P38L11组; 7. P42L5组; 8. P42L8组; 9. P42L11组 Ld. 脂滴, 图示红色区域; N. 细胞核, 图示蓝色小点

1. P34L5 group; 2. P34L8 group; 3. P34L11 group; 4. P38L5 group; 5. P38L8 group; 6. P38L11 group; 7. P42L5 group; 8. P42L8 group; 9. P42L11 group; Ld. lipid droplet, red area in the figure; N. nucleus, blue dots

表 6 饲料中蛋白质和脂肪水平对丝尾鳢幼鱼肝脏抗氧化能力的影响

Tab. 6 Effects of dietary protein and lipid levels on the antioxidant capacity of liver of juvenile *H. wyckioides*

组别 Group	谷胱甘肽过氧化物酶 GPX (U/mg prot)	谷胱甘肽 GSH ($\mu\text{mol/g prot}$)	超氧化物歧化酶 SOD (U/mg prot)	过氧化氢酶 CAT (U/mg prot)	丙二醛 MDA (nmol/mg prot)
P34L5	16.89 $\pm$ 0.39 ^{ab}	18.26 $\pm$ 0.50 ^a	55.67 $\pm$ 1.33 ^a	47.05 $\pm$ 1.52 ^a	0.86 $\pm$ 0.06 ^a
P34L8	16.11 $\pm$ 1.13 ^a	20.39 $\pm$ 1.87 ^{ab}	62.34 $\pm$ 1.21 ^b	52.04 $\pm$ 0.67 ^{bcd}	0.89 $\pm$ 0.03 ^a
P34L11	18.36 $\pm$ 0.69 ^{abc}	20.74 $\pm$ 1.16 ^{abc}	67.29 $\pm$ 0.71 ^{cd}	53.06 $\pm$ 1.34 ^{bcd}	1.11 $\pm$ 0.02 ^c
P38L5	17.75 $\pm$ 0.60 ^{abc}	19.32 $\pm$ 1.09 ^{ab}	63.74 $\pm$ 1.73 ^{bc}	50.95 $\pm$ 1.54 ^{abc}	0.92 $\pm$ 0.04 ^a
P38L8	19.11 $\pm$ 0.54 ^{bcd}	22.28 $\pm$ 1.50 ^{bcd}	67.98 $\pm$ 0.78 ^d	53.75 $\pm$ 1.80 ^{bcd}	0.92 $\pm$ 0.07 ^a
P38L11	21.11 $\pm$ 0.74 ^{de}	24.93 $\pm$ 1.37 ^d	68.27 $\pm$ 0.95 ^d	56.34 $\pm$ 0.69 ^d	1.05 $\pm$ 0.02 ^{bc}
P42L5	19.91 $\pm$ 1.05 ^{cd}	21.96 $\pm$ 0.73 ^{abcd}	66.50 $\pm$ 0.47 ^{cd}	49.41 $\pm$ 0.41 ^{ab}	0.90 $\pm$ 0.01 ^a
P42L8	21.59 $\pm$ 1.20 ^{de}	24.31 $\pm$ 1.22 ^{cd}	68.40 $\pm$ 1.24 ^d	54.28 $\pm$ 2.48 ^{cd}	0.93 $\pm$ 0.02 ^{ab}
P42L11	23.10 $\pm$ 0.66 ^e	25.44 $\pm$ 0.44 ^d	69.62 $\pm$ 1.68 ^d	55.50 $\pm$ 1.30 ^{cd}	1.12 $\pm$ 0.04 ^c
饲料蛋白质水平 Dietary protein level (%)					
P34	17.12 $\pm$ 0.52 ^a	19.80 $\pm$ 0.76 ^a	61.77 $\pm$ 1.77 ^a	50.72 $\pm$ 1.11	0.95 $\pm$ 0.04
P38	19.32 $\pm$ 0.58 ^b	22.17 $\pm$ 1.05 ^b	66.66 $\pm$ 0.96 ^b	53.68 $\pm$ 1.05	0.96 $\pm$ 0.03
P42	21.53 $\pm$ 0.68 ^c	23.91 $\pm$ 0.67 ^b	68.17 $\pm$ 0.77 ^b	53.06 $\pm$ 1.24	0.98 $\pm$ 0.04
饲料脂肪水平 Dietary lipid level (%)					
L5	18.18 $\pm$ 0.58 ^a	19.85 $\pm$ 0.68 ^a	61.97 $\pm$ 1.75 ^a	49.14 $\pm$ 0.85 ^a	0.89 $\pm$ 0.02 ^a
L8	18.94 $\pm$ 0.94 ^a	22.33 $\pm$ 0.96 ^b	66.24 $\pm$ 1.12 ^b	53.36 $\pm$ 0.97 ^b	0.92 $\pm$ 0.02 ^a
L11	20.86 $\pm$ 0.77 ^b	23.70 $\pm$ 0.92 ^b	68.39 $\pm$ 0.68 ^b	54.96 $\pm$ 0.76 ^b	1.09 $\pm$ 0.02 ^b
Two-way ANOVA					
饲料蛋白 Dietary protein	0	0.002	0	0.051	0.690
饲料脂肪 Dietary lipid	0.003	0.003	0	0	0
交互 Interaction	0.570	0.745	0.021	0.939	0.651

酶活性随着饲料中蛋白和脂肪水平的升高而升高。

4 结论

在池塘网箱养殖模式、饲料蛋白(34%、38%、42%)和脂肪(5%、8%、11%)水平下,丝尾鳢增重率随着蛋白和脂肪水平的增加而增加,分别在42%蛋白和11%脂肪组达到最高,但与P38L8、P38L11、P42L8组间并无显著性差异。但38%蛋白质水平获得了最佳的蛋白质效率,11%的脂肪引起丝尾鳢肝脏脂肪沉积,并引起肝脏损伤。丝尾鳢肠道消化酶活力和抗氧化酶活力随着饲料蛋白和脂肪水平的升高而升高。综合生长、蛋白质利用效率和鱼体健康等因素的考量,丝尾鳢饲料的蛋白和脂肪水平建议分别控制在为38%和8%左右。

参考文献:

- [1] Ai Q, Mai K, Li H, *et al.* Effects of dietary protein to energy ratios on growth and body composition of juvenile Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus* [J]. *Aquaculture*, 2004, **230**(1-4): 507-516.
- [2] Qian X Q, Cui Y B, Xie S Q, *et al.* A review on dietary protein requirement for aquaculture fishes [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **26**(4): 410-416. [钱雪桥, 崔奕波, 解绶启, 等. 养殖鱼类饲料蛋白需要量的研究进展 [J]. *水生生物学报*, 2002, **26**(4): 410-416.]
- [3] Barreto-Curiel F, Focken U, D'Abramo L R, *et al.* Assessment of amino acid requirements for *Totoaba macdonaldi* at different levels of protein using stable isotopes and a non-digestible protein source as a filler [J]. *Aquaculture*, 2019(503): 550-561.
- [4] Rahimnejad S, Bang I C, Park J Y, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth performance, feed utilization and body composition of juvenile hybrid grouper, *Epinephelus fuscoguttatus* $\times$ *E. lanceolatus* [J]. *Aquaculture*, 2015(446): 283-289.
- [5] Chatzifotis S, Panagiotidou M, Papaioannou N, *et al.* Effect of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition and serum metabolites of meagre (*Argyrosomus regius*) juveniles [J]. *Aquaculture*, 2010, **307**(1-2): 65-70.
- [6] Liu M D, Chen D Q, Duan X B, *et al.* Ichthyofauna composition and distribution of fishes in Yunnan section of Lancang River [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, **18**(1): 156-170. [刘明典, 陈大庆, 段辛斌, 等. 澜沧江云南段鱼类区系组成与分布 [J]. *中国水产科学*, 2011, **18**(1): 156-170.]
- [7] Xue C J, Tian S K, Li Y M, *et al.* Preliminary report on the domestication and artificial propagation of *Mystus wyckioides* [J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, **31**(4):

- 142-145. [薛晨江, 田树魁, 李永明, 等. 丝尾鳢的驯养及人工繁殖初报 [J]. 水生生态学杂志, 2010, **31**(4): 142-145.]
- [8] Hung L T, Binh V T T, Thanh Truc N T, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth, feed utilization and body composition in red-tailed catfish juveniles (*Hemibagrus wyckioides*, Chaux & Fang 1949) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, **23**(2): 367-374.
- [9] Lin B, Chen L, Zhang J, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth performance, feed utilization, plasma biochemical parameters, and antioxidant capacity of Asian red-tailed catfish (*Hemibagrus wyckioides*) [J]. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2019(71): 11.
- [10] Wu W, Ji H, Yu H, *et al.* Effect of refeeding dietary containing different protein and lipid levels on growth performance, body composition, digestive enzyme activities and metabolic related gene expression of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) after overwinter starvation [J]. *Aquaculture*, 2020(523): 735196.
- [11] Deng J, Zhang X, Bi B, *et al.* Dietary protein requirement of juvenile Asian red-tailed catfish *Hemibagrus wyckioides* [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, **170**(3-4): 231-238.
- [12] Deng J, Zhang X, Sun Y, *et al.* Optimal dietary lipid requirement for juvenile Asian red-tailed catfish (*Hemibagrus wyckioides*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2021(20): 100666.
- [13] Wang L, Zhang W, Gladstone S, *et al.* Effects of isoenergetic diets with varying protein and lipid levels on the growth, feed utilization, metabolic enzymes activities, antioxidative status and serum biochemical parameters of black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*) [J]. *Aquaculture*, 2019(513): 734397.
- [14] Lupatsch I, Kissil G W, Sklan D. Comparison of energy and protein efficiency among three fish species gilthead sea bream (*Sparus aurata*), European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and white grouper (*Epinephelus aeneus*): energy expenditure for protein and lipid deposition [J]. *Aquaculture*, 2003, **225**(1-4): 175-189.
- [15] Xie K, Shi Y, He H, *et al.* Effects of replacement of fish meal by Antarctic krill meal on growth performance, immune indexes and muscle quality of *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, **46**(3): 410-419. [谢凯, 石勇, 何慧, 等. 南极磷虾粉替代鱼粉对黄颡鱼生长、免疫及肌肉品质的影响 [J]. 水产学报, 2022, **46**(3): 410-419.]
- [16] Ma R, Liu X, Meng Y, *et al.* Protein nutrition on sub-adult triploid rainbow trout (1): dietary requirement and effect on anti-oxidative capacity, protein digestion and absorption [J]. *Aquaculture*, 2019(507): 428-434.
- [17] Zhang Y, Sun Z, Wang A, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth, body and plasma biochemical composition and selective gene expression in liver of hybrid snakehead (*Channa maculata* ♀ × *Channa argus* ♂) fingerlings [J]. *Aquaculture*, 2017(468): 1-9.
- [18] Peng S M, Chen L Q, Ye J Y, *et al.* Effects of dietary protein to energy ratios on growth and body composition of juvenile black seabream, *Sparus macrocephalus* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, **12**(4): 465-470. [彭士明, 陈立侨, 叶金云, 等. 饵料蛋白能量比对黑鲷幼鱼生长和体成分的影响 [J]. 中国水产科学, 2005, **12**(4): 465-470.]
- [19] Shi Z N, Chen Y Q. Comparison between cage and aquanum culture modes of tropical fish [J]. *China Fisheries*, 2002(7): 76-65. [施振宁, 陈亚琴. 热带鱼网箱与水族箱养殖模式的对比 [J]. 中国水产, 2002(7): 76-65.]
- [20] Gao Y, Lu S, Wu M, *et al.* Effects of dietary protein levels on growth, feed utilization and expression of growth related genes of juvenile giant grouper (*Epinephelus lanceolatus*) [J]. *Aquaculture*, 2019(504): 369-374.
- [21] Hua K, Koppe W, Fontanillas R. Effects of dietary protein and lipid levels on growth, body composition and nutrient utilization of *Channa striata* [J]. *Aquaculture*, 2019(501): 368-373.
- [22] Glencross B D. Exploring the nutritional demand for essential fatty acids by aquaculture species [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2009, **1**(2): 71-124.
- [23] Gómez-Requeni P, Bedolla-Cázares F, Montecchia C, *et al.* Effects of increasing the dietary lipid levels on the growth performance, body composition and digestive enzyme activities of the teleost pejerrey (*Odontesthes bonariensis*) [J]. *Aquaculture*, 2013(416-417): 15-22.
- [24] Li T L, Xing W, Xu G L, *et al.* Effects of protein and lipid levels in diets on growth performance, ornamental quality and nitrogen and phosphorus excretion of *Carassius auratus* red var [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, **31**(2): 721-731. [李铁梁, 邢薇, 徐冠玲, 等. 饲料蛋白质和脂肪水平对草金鱼生长性能、观赏品质及氮磷排泄的影响 [J]. 动物营养学报, 2019, **31**(2): 721-731.]
- [25] Khosravi S, Lee S M. Optimum dietary protein and lipid levels in juvenile filefish, *Stephanolepis cirrhifer*, feed [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2017, **48**(6): 867-876.
- [26] Liu H, Dong X, Tan B, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth, body composition, enzymes activity, expression of IGF-1 and TOR of juvenile northern whiting, *Sillago sihama* [J]. *Aquaculture*, 2021(533): 736166.
- [27] Cho S H, Kim H S, Myung S H, *et al.* Optimum dietary protein and lipid levels for juvenile rockfish (*Sebastes schlegelii*, Hilgendorf 1880) [J]. *Aquaculture Research*, 2015, **46**(12): 2954-2961.
- [28] Yang L L, Hu Y, Zhu B, *et al.* Effects of *Flammulina velutipes* stembase on growth, digestive enzyme activi-

- ties, intestinal tissue structure, muscle quality and serum biochemical parameters of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, **33**(8): 4569-4579. [杨琳霖, 胡毅, 朱波, 等. 金针菇菇头对草鱼生长、消化酶活性、肠道组织结构、肌肉品质及血清生化指标的影响 [J]. *动物营养学报*, 2021, **33**(8): 4569-4579.]
- [29] Giri S S, Sahoo S K, Sahu A K, *et al.* Effect of dietary protein level on growth, survival, feed utilisation and body composition of hybrid *Clarias* catfish (*Clarias batrachus* × *Clarias gariepinus*) [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2003, **104**(1-4): 169-178.
- [30] Zhao N N, Xu S H, Li Y, *et al.* Effects of protein and lipid on growth and physiological factors of *Pelteobagrus fulvidraco* larvae in industrialized culture [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, **41**(2): 271-284. [赵宁宁, 徐世宏, 李勇, 等. 蛋白质和脂肪对工业培育黄颡鱼仔稚鱼生长和生理因子的影响 [J]. *水产学报*, 2017, **41**(2): 271-284.]
- [31] García-Meilán I, Ordóñez-Grande B, Machahua C, *et al.* Effects of dietary protein-to-lipid ratio on digestive and absorptive processes in sea bass fingerlings [J]. *Aquaculture*, 2016(463): 163-173.
- [32] Hu Y J, Hu Y, Shi Y, *et al.* Effects of dietary methionine on growth, serum biochemical indexes, serum free amino acid and muscle texture of rice field eel (*Monopterus albus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(6): 1155-1163. [胡亚军, 胡毅, 石勇, 等. 不同形式蛋氨酸对黄鳝生长、血清生化、血清游离氨基酸含量及肌肉品质的影响 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(6): 1155-1163.]
- [33] Jiang S, Wu X, Li W, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth, feed utilization, body and plasma biochemical compositions of hybrid grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀) juveniles [J]. *Aquaculture*, 2015(446): 148-155.
- [34] Abdel-Tawwab M, Ahmad M H, Khattab Y A E, *et al.* Effect of dietary protein level, initial body weight, and their interaction on the growth, feed utilization, and physiological alterations of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) [J]. *Aquaculture*, 2010, **298**(3-4): 267-274.
- [35] Li W, Wen X, Huang Y, *et al.* Effects of varying protein and lipid levels and protein-to-energy ratios on growth, feed utilization and body composition in juvenile *Nibea diacanthus* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, **23**(5): 1035-1047.
- [36] Wang X, Li Y, Hou C, *et al.* Physiological and molecular changes in large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea* R.) with high-fat diet-induced fatty liver disease [J]. *Aquaculture Research*, 2015, **46**(2): 272-282.
- [37] Wang A M, Han G M, Feng G N, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth performance, nutrient digestibility and blood biochemical indices of GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, **35**(1): 80-87. [王爱民, 韩光明, 封功能, 等. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼生产性能、营养物质消化及血液生化指标的影响 [J]. *水生生物学报*, 2011, **35**(1): 80-87.]
- [38] Huang Y, Wen X, Li S, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition, fatty acid profiles and antioxidant parameters of juvenile Chu's croaker *Nibea coibor* [J]. *Aquaculture International*, 2016, **24**(5): 1229-1245.
- [39] Xu Z C, Liu H, Xu Q Y, *et al.* Effects of dietary lipid levels on immunity and antioxidant function in Songpu mirror carp at different temperatures [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, **27**(5): 429-435. [许治冲, 刘晖, 徐奇友, 等. 温度和饲料脂肪水平对松浦镜鲤免疫及抗氧化能力的影响 [J]. *大连海洋大学学报*, 2012, **27**(5): 429-435.]
- [40] Zhang C J, Peng S M, Chen C, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on immune and antioxidant function of juvenile *Epinephelus moara* [J]. *Marine Fisheries*, 2016, **38**(6): 634-644. [张晨捷, 彭士明, 陈超, 等. 饲料蛋白和脂肪水平对云纹石斑鱼幼鱼免疫和抗氧化性能的影响 [J]. *海洋渔业*, 2016, **38**(6): 634-644.]
- [41] Yang L, Wu L F, Qu Z H, *et al.* Effects of different dietary protein levels on protein metabolizing enzyme and antioxidant capacity of *Rhynchocypris lagowskii dybowskii* [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2020, **42**(2): 212-218. [杨兰, 吴莉芳, 瞿子惠, 等. 饲料蛋白质水平对洛氏鲮蛋白质代谢酶及抗氧化能力的影响 [J]. *吉林农业大学学报*, 2020, **42**(2): 212-218.]
- [42] Wang C L, Zhao Y L, Zhao J F. Recent advances in chemical protein modification via cysteine [J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2022, **42**(9): 2774-2792. [王长流, 赵永丽, 赵军锋. 基于半胱氨酸的蛋白质化学修饰研究进展 [J]. *有机化学*, 2022, **42**(9): 2774-2792.]
- [43] Wang X X, Zeng B H, Liu L L, *et al.* Effects of feed protein levels on growth, digestive enzyme activities, non-specific immunity and protein metabolism of *Schizothorax o'connori* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(4): 693-706. [王纤纤, 曾本和, 刘乐乐, 等. 饲料蛋白质水平对异齿裂腹鱼生长、消化酶活性、非特异性免疫及蛋白质代谢反应的影响 [J]. *水生生物学报*, 2020, **44**(4): 693-706.]
- [44] Liu Y Y, Yu H B, Wu W Y, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth, body composition, digestive enzyme activities, serum biochemical indexes and antioxidant performance of *Polyodon spathula* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, **42**(12): 1940-1956. [刘阳洋, 于海波, 武文一, 等. 饲料脂肪水平对匙吻鲟生长、体组成、消化酶活性、血清生化及抗氧化性能的影响 [J]. *水产学报*, 2018, **42**(12): 1940-1956.]
- [45] Tang D J, Feng P F, Huang L H, *et al.* Effects of dietary protein levels on growth, digestive enzymes activities and antioxidant ability of hybrid yellow catfish [J]. *Journal of Fisheries Research*, 2023, **45**(3): 280-286. [唐东蛟, 冯鹏

- 霏, 黄亮华, 等. 饲料蛋白质水平对杂交黄颡鱼生长、消化酶活性和抗氧化能力的影响 [J]. 渔业研究, 2023, 45(3): 280-286.]
- [46] Li G B, Li Y, Wang Q M, *et al.* Effects of digestible crude protein and lipid levels on growth performance, metabolism of energy substances and antioxidant capacity of juvenile GIFT Tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(20): 126-135.]
- [47] Guo J L, Zhou Y L, Zhao H, *et al.* Effect of dietary lipid level on growth, lipid metabolism and oxidative status of largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. *Aquaculture*, 2019(506): 394-400.

DIETARY PROTEIN AND LIPID LEVEL ON GROWTH, SERUM BIOCHEMICAL INDEX AND LIVER ANTIOXIDANT CAPACITY OF JUVENILE ASIAN RED-TAILED CATFISH (*HEMIBAGRUS WYCKIODES*)

ZHANG Yao-Zheng-Tai¹, XIE Kai¹, SHI Yong¹, LI Xin-Ping², XIAO Tiao-Yi¹, HU Yi¹ and DAI Ji-Hong¹

(1. Fisheries College, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Xishuangbanna Indigenous Fish Research and Breeding Center, Xishuangbanna 666109, China)

Abstract: A 3×3 interaction experiment was conducted, manipulating protein levels (34%, 38%, 42%) and lipid levels (5%, 8%, 11%). Nine experimental diets were prepared in total. Juvenile Asian red-tailed catfish (*Hemibagrus wyckioides*) with an initial body weight of (29.96±0.08) g were subjected to an 8-week feeding regimen. This study aimed to investigate the effects of dietary protein and lipid levels on growth, serum biochemical parameters, and liver antioxidant capacity. The results indicated an increasing trend in the average weight gain rate and protein efficiency ratio with higher dietary protein and lipid levels. The P42L11 group exhibited the highest weight gain rate, accompanied by the lowest feed coefficient. However, no significant differences were observed in the P42L11 group and the P38L8, P38L11 and P42L8 groups ($P>0.05$). The P38L11 group exhibited the highest protein efficiency, although no significant differences were found when compared to the P34L11, P38L8, P42L8 and P42L11 groups ($P>0.05$). Notably, the 11% lipid group displayed the highest average whole-body lipid content, viscera-body ratio, as well as serum total cholesterol, triglyceride, high-density lipoprotein cholesterol, and low-density lipoprotein cholesterol levels, which were significantly higher than the 5% lipid group. Oil red staining of liver tissues revealed noticeable fat accumulation in the 11% lipid group. Moreover, average serum alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase activities were significantly elevated in the 11% lipid group compared to the 5% and 8% lipid groups ($P<0.05$). Additionally, average intestinal digestive enzyme activity, liver antioxidant enzyme activity, and malondialdehyde (MDA) content increased with higher dietary protein and lipid levels. In summary, within the context of pond cage culture, the weight gain rate of *H. wyckioides* increased proportionally with rising protein and lipid levels. The most favorable outcomes were observed in the 42% protein and 11% lipid groups. However, the 38% protein level yielded the best protein efficiency, while the 11% lipid level led to liver fat deposition and damage. The activities of digestive enzymes and antioxidant enzymes were augmented with higher dietary protein and lipid levels. Considering the factors such as growth, protein utilization efficiency and fish health. The recommended protein level for juvenile *H. wyckioides* feed is approximately 38%, with an upper limit not exceeding 42%. Similarly, the optimal lipid level is around 8%, and it should not exceed 11%.

Key words: Protein; Lipid; Growth performance; Serum biochemical indexes; Antioxidant capacity; *Hemibagrus wyckioides*