

DOI: 10.12264/JFSC2024-0262

不同饲料蛋白质和脂肪水平对梭鲈幼鱼生长及肝脏健康的影响

赵杰^{1,2}, 郑先虎^{1,2}, 孙志鹏², 王连生², 范泽², 王荻², 刘洋², 刘天奇², 张渴新², 鲁翠云^{1,2}

1. 上海海洋大学水产与生命学院, 农业农村部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306;
2. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 淡水鱼类育种国家地方联合工程实验室, 农业农村部淡水水产生物技术与遗传育种重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150070

摘要: 为探究不同饲料蛋白质和脂肪水平及其互作对梭鲈(*Sander lucioperca*)幼鱼生长、肝脏组织形态、抗氧化酶活性及免疫相关基因表达的影响, 实验设计 2 个蛋白质水平(51%、54%)和 3 个脂肪水平(12%、15%、18%)共 6 种饲料, 对梭鲈幼鱼[(1.16±0.01) g]进行 8 周养殖实验。结果表明: 饲料脂肪水平的升高能够显著提高梭鲈幼鱼的终末体重(FBW)和特定生长率(SGR) ($P<0.05$), 但饲料蛋白质和脂肪水平对 FBW 和 SGR 无显著交互作用。饲料蛋白质水平为 51%时, 梭鲈幼鱼 FBW 和 SGR 在脂肪水平为 18%时最大; 饲料蛋白质水平为 54%时, 梭鲈幼鱼 FBW 和 SGR 在脂肪水平为 15%时最大。随着饲料脂肪水平的增加, 全鱼粗蛋白质含量逐渐降低($P<0.05$), 粗脂肪含量先增加后降低。饲料蛋白质水平为 54%, 脂肪水平为 18%时观察到明显的肝细胞空泡变性, 其他饲料组无异常。饲料蛋白质水平为 51%时, 随着饲料脂肪水平的升高, 梭鲈幼鱼过氧化氢酶、谷胱甘肽和超氧化物歧化酶活性显著升高($P<0.05$); 饲料蛋白质水平为 54%时, 随着饲料脂肪水平的升高, 梭鲈幼鱼过氧化氢酶活性显著升高($P<0.05$)。随着饲料脂肪水平的升高, 肝脏补体基因(*c3*、*c4* 和 *c5*)和抑炎细胞因子相关基因(*tgf-β*)的表达水平显著升高($P<0.05$), 促炎细胞因子相关基因(*il-1β*、*il8* 和 *tnf-β*)的表达水平显著降低($P<0.05$)。综上, 适宜的饲料脂肪水平会提高梭鲈幼鱼生长性能, 节约蛋白质用量, 但过高脂肪水平则会增加肝脏病变的风险, 建议梭鲈幼鱼饲料蛋白质和脂肪水平为 51%和 18%。

关键词: 梭鲈; 蛋白质; 脂肪; 生长性能; 肝脏抗氧化; 肝脏炎症; 肝脏组织学

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)02-0168-13

水产饲料中营养物质对促进动物生长和健康至关重要。蛋白质和脂肪作为饲料中最主要的营养来源, 其添加水平对不同阶段鱼类的生长和健康影响较大。蛋白质是水产饲料的主要成分之一, 可为机体维持生命活动提供所需的氨基酸, 鱼体缺乏蛋白质会导致生长受阻、免疫性能降低^[1]。摄入蛋白质过多, 超出鱼体利用能力, 会导致其利用效率降低, 并对肝脏等组织产生代谢压力^[2-3]。脂肪是肉食性鱼类重要的能量来源, 适量添加脂

肪可减少蛋白质原料的使用^[4]。脂肪添加水平不足会导致营养物质缺乏, 降低生长性能^[5]。而脂肪添加水平过高会导致鱼体代谢紊乱, 出现脂肪过度沉积, 损伤机体健康, 影响鱼肉品质^[6-7]。因此, 确定饲料蛋白质和脂肪的最适需求能有效地提高鱼体对蛋白质和脂肪的利用效率, 提高养殖效益, 降低养殖成本, 促进水产养殖业可持续发展。

梭鲈(*Sander lucioperca*)隶属鲈形目(Perciformes)、梭鲈属(*Sander*), 具有肉质细嫩、无肌间

收稿日期: 2024-09-18; 修订日期: 2024-12-21。

基金项目: 国家水产种质资源平台项目(FGRC18537); 中央级科研院所基本业务费项目(2023TD22); 黑龙江省种业创新发展项目: 鳊鲈种质资源评价与规模化繁育技术体系构建。

作者简介: 赵杰(2000–), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: zj_18984290736@yeah.net

通信作者: 鲁翠云, 副研究员, 研究方向为水产动物种质资源评价与分子育种研究。E-mail: lucuiyun@hrfri.ac.cn

刺、营养价值高等优点,成为欧亚地区极具潜力的淡水养殖鱼类^[8]。目前全球梭鲈年产量超过2万t,梭鲈供应仍以捕捞为主,虽已在罗马尼亚、丹麦、荷兰等多个国家和地区进行养殖,但养殖产量仅为4.29千t^[9],优质配合饲料的缺乏是制约其养殖发展的瓶颈问题。目前,对梭鲈营养需求的研究较少,Schulz等^[10]在脂肪水平为10%时,以增重率和饲料转化率为评测指标,发现梭鲈幼鱼 $[(1.05\pm 0.05)\text{ g}]$ 对饲料蛋白质的需求为52.9%~57.7%,表明梭鲈作为肉食性鱼类对饲料蛋白质的需求较高。同时该团队还设计了3个脂肪水平(9%、13%和17%)、2个蛋白质水平(47%和54%)6种饲料,对梭鲈幼鱼 $[(1.35\sim 1.40)\text{ g}]$ 进行实验,结果发现脂肪水平为17%、蛋白质水平为47%梭鲈幼鱼特定生长率最高^[11]。而王岩^[12]总结大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)对饲料蛋白质的需求研究,指出早期研究明显低估了肉食性鱼类对饲料蛋白质的需求,使用低蛋白质饲料进行长期饲养不能获得理想的生长性能。可见,现有的评估结果可能存在需求量偏低的现象,采取较高的蛋白质水平可能获得更好的生长性能。

黑龙江水产研究所收集了新疆乌伦古湖、宁夏腾格里湖、乌苏里江等地区梭鲈活体,在评估群体遗传背景的基础上^[13],以生长和易驯食配合饲料为目标,选育出梭鲈快速生长品系F₃,其生长速度快,苗种规格统一,转口饲料驯化率达70%以上^[14-15]。目前在梭鲈养殖中多采用大口黑鲈、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)等肉食性鱼类商品饲料,因物种间差异对饲料营养素需求也有差异,在梭鲈生产中发现内脏脂肪积累,生长规格差异较大等现象,亟需确定梭鲈最适营养需求。此外,已开展的梭鲈幼鱼对蛋白质和脂肪的需求研究仅以生长数据作为测评指标,尚需明确饲料蛋白质和脂肪对梭鲈健康的影响,以及蛋白质和脂肪的交互作用。本研究用不同蛋白质和脂肪水平的实验饲料喂养梭鲈F₃幼鱼,旨在评估不同蛋白质和脂肪水平饲料对梭鲈幼鱼生长的影响,进一步探究其对肝脏组织形态和健康的影响,确定梭鲈幼鱼中饲料蛋白质和脂肪的适宜水平,解析两者的

交互作用,为推动梭鲈幼鱼高效饲料研发和养殖产业的快速健康发展提供支持。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

基于已有研究和预实验结果,本实验设置51% (P51)和54% (P54)2个蛋白质水平,12% (L12)、15% (L15)、18% (L18)3个脂肪水平,共6个实验组,分别命名为P51L12、P51L15、P51L18、P54L12、P54L15和P54L18。蛋白质原料主要为鱼粉、鸡肉粉、玉米蛋白粉、大豆浓缩蛋白和谷朊粉,脂肪原料主要为鱼油和大豆卵磷脂,实验饲料配方与营养成分见表1。饲料原料分别过60目筛,按比例称取并逐级稀释混匀,最后加入鱼油、大豆卵磷脂和水充分混匀,经制粒机(HKJ-218,同力粮食机械)制成直径1.5 mm的颗粒,于烘箱中60℃避光烘干至水分小于10%,分装后-20℃保存。

1.2 实验鱼

实验鱼来自黑龙江水产研究所呼兰实验场,驯化转口配合饲料后于养殖水槽中暂养2周。随机选取健康幼鱼 $[(1.16\pm 0.01)\text{ g}]$ 2700尾,平均分至18个圆形流水养殖系统(直径1.2 m,养殖体积500 L)中,每缸150尾。

1.3 饲养管理

共设6个实验组,每组3个平行,分别投喂6种实验饲料。流水养殖系统设置在室外大棚中,流量200 L/h,水温 $(23\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$,氨氮含量 $<0.4\text{ mg/L}$,氧泵持续充气。每天两次(7:00, 17:00)饱食投喂,持续56 d。每天清缸一次,清除水体及缸壁、缸底粘附的粪便及杂物。

生产性能指标测定方法如下:

存活率(SR, %)= $100\%\times(\text{终末尾数}/\text{初始尾数})$;

特定生长率(SGR, %)= $100\%\times(\ln \text{终末体重}-\ln \text{初始体重})/\text{养殖天数}$;

肝体比(HSI, %)= $100\%\times \text{肝脏重}/\text{体重}$;

肥满度(CF, g/cm^3)= $100\%\times \text{体重}/(\text{体长})^3$ 。

1.4 样品采集

养殖实验结束后,每个平行随机捞取30尾实验鱼,200 mg/L的MS-222麻醉后称取体重。称重

表 1 实验饲料配方及营养成分表(干物质)
Tab. 1 Formulation and nutrition composition of the trial diets (dry matter)

原料 ingredient	P51L12	P51L15	P51L18	P54L12	P54L15	P54L18	%
鱼粉 fish meal	51.50	51.50	51.50	55.00	55.00	55.00	
鸡肉粉 poultry meal	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	
玉米蛋白粉 corn gluten meal	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	
大豆浓缩蛋白 soy protein concentrate	8.13	8.13	8.13	9.13	9.13	9.13	
谷朊粉 wheat gluten	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	
淀粉 starch	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	
小麦粉 wheat flour	2.20	2.20	2.20	0.00	0.00	0.00	
鱼油 fish oil	4.55	7.55	10.55	4.25	7.25	10.25	
磷脂油 lecithin oil	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
多维+多矿 premix-V+M*	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
氯化胆碱 choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
纤维素 cellulose	8.00	5.00	2.00	6.00	3.00	0.00	
三氧化二钇 marker (Y ₂ O ₃)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	
海藻酸钠 sodium alginate	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
2,6-二叔丁基对甲酚 BHT	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
营养水平 nutrient level**							
水分 moisture	8.09	8.46	8.56	7.18	7.93	8.11	
粗蛋白质 crude protein	51.11	51.05	51.13	54.08	54.14	53.99	
粗脂肪 crude lipid	12.01	15.07	18.07	11.96	15.11	18.07	
碳水化合物 carbohydrates	8.55	8.59	8.46	7.47	7.36	7.42	
粗灰分 crude ash	11.68	11.73	11.78	12.41	12.46	12.41	
能量 energy***	18.28	19.48	20.66	18.77	20.01	21.16	
蛋能比(g/kJ) P/E	27.96	26.51	24.75	28.81	27.06	25.52	

注: *多维+多矿(mg/kg or IU/kg): 维生素 A 750000 IU; 维生素 D3 200000 IU; 维生素 E 6000 mg; 维生素 K3 2000 mg; 维生素 B1 1200 mg; 维生素 B2 1200 mg; 维生素 B12 8 mg; 维生素 C 21000 mg; D-泛酸钙 2000 mg; 烟酰胺 9000 mg; 叶酸 370 mg; D-生物素 15 mg; 肌醇 10000 mg; 硫酸镁 6000 mg; 硫酸锌 4000 mg; 硫酸锰 2500 mg; 硫酸铜 2500 mg; 硫酸亚铁 2500 mg; 硫酸钴 160 mg; 碘酸钙 200 mg; 亚硒酸钠 40 mg. **营养水平为实测值. ***能量值按 NRC (2011)所述, 根据碳水化合物(17.2 kJ/g)、蛋白质(23.6 kJ/g)、脂肪(39.5 kJ/g)所含能量值计算所得.

Note: * Premix-V+M (mg/kg or IU/kg diet): VA 750000 IU; VD3 200000 IU; VE 6000 mg; VK3 2000 mg; VB1 1200 mg; VB2 1200 mg; VB12 8 mg; VC 21000 mg; D-calcium pantothenate 2000 mg; niacinamide 9000 mg; folic acid 370 mg; D-biotin 15 mg; inositol 10000 mg; MgSO₄ 6000 mg; ZnSO₄ 4000 mg; MnSO₄ 2500 mg; CuSO₄ 2500 mg; FeSO₄ 2500 mg; CoSO₄ 160 mg; Ca(IO₃)₂ 200 mg; Na₂SeO₃ 40 mg. ** Nutrient level was measured values. *** Calculated using the mean values for carbohydrates (17.2 kJ/g), proteins (23.6 kJ/g), and lipids (39.5 kJ/g) according to NRC (2011).

后, 6 尾鱼保存至-20 ℃冰箱, 用于全鱼常规营养组成测定; 6 尾鱼冰上解剖, 小心分离肝脏并称重, 部分肝脏样品于 4%多聚甲醛中固定, 用于组织切片观察; 9 尾鱼冰上快速采集肝脏, 并保存至液氮中, 用于肝脏中基因表达水平和酶活性测定。

1.5 常规营养成分测定

饲料和全鱼基本营养成分的测定参照 AOAC^[16]的标准进行; 采用 105 ℃烘干至恒重法(GB/T6435-2014)测定样品水分; 采用凯氏定氮法(GT/T6432-1994)测定粗蛋白质含量; 采用索氏脂肪抽提法(GB/T6433-2006)测定粗脂肪含量; 采用马弗

炉焚烧法(GB/T6438-2007)测定灰分。

1.6 肝脏组织学观察

取 4%多聚甲醛固定后的肝脏组织, 经乙醇梯度脱水, 石蜡包埋, 制成 5 μm 的切片, 苏木精和伊红染色(H&E 染色), 并以中性树胶封定制片, 于光学显微镜下观察肝脏组织形态并拍照。

1.7 抗氧化指标测定

肝脏抗氧化指标包括: 超氧化物歧化酶(SOD; A001-3-2)、谷胱甘肽(GSH; A006-2-1)、过氧化氢酶(CAT; A007-1-1)、丙二醛(MDA; A003-1-2)、总抗氧化能力(T-AOC; A015-2-1), 使用南京建成生物

工程研究所(<http://www.njjcbio.com/>)商用试剂盒测定。严格按照说明书操作测定各项指标,并根据其提供的算法,计算各种酶活性及活性物质含量。

1.8 基因表达水平测定

取 80 mg 左右的肝组织样品,利用 TRIzol 试剂(Invitrogen, Carlsbad, CA, USA)提取总 RNA,经 PrimeScriptTMRT 试剂盒(Perfect Real Time, TaKaRa, Dalian, China)逆转录为 cDNA 后,保存于 -80 ℃。实时荧光定量 PCR 采用 TB Green Premix Ex Taq II (Tli RNaseH Plus)试剂盒(TaKaRa, Dalian, China)和 Applied Biosystems 7500 RealTime PCR 系统(ABI, Waltham, MA, USA)进行,反应体系 20 μL,包括 10 μL TB green Premix

Ex Taq II、6 μL 无酶水、0.4 μL ROX Reference Dye II、2 μL cDNA 模板、0.8 μL 正向引物和 0.8 μL 反向引物。选用 *gapdh* 为内参基因,采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法对基因相对表达水平进行计算。分别选取补体相关基因(*c3*、*c4*、*c5*)、炎症因子相关基因(*il-1β*、*il8*、*tnf-β*、*tgf-β*)和脂质代谢相关基因(*ppary*、*g6pd*、*lpl*)进行检测。具体引物信息见表 2。

1.9 数据统计

数据用平均值±标准差($\bar{x}\pm SD$)表示。采用 SPSS 19.0 软件对实验数据进行单因素(one-way ANOVA)和双因素(two-way ANOVA)方差分析,Duncan 检验组间差异显著性。 $P<0.05$ 表示组间差异显著。

表 2 引物信息列表
Tab. 2 Primer information list

基因 gene		引物序列(5'-3') primer sequence (5'-3')	产物长度/bp product length	序列号 accession number
<i>gapdh</i>	F	GGACCCATGAAGGGCATTCT	243	XM_031299603
	R	TGGCATAGTGACGTGACGAG		
<i>c3</i>	F	TTGGTGATGTGAGAGGAGCAG	151	XM_036000405.1
	R	GGCAGACGCCTTTCCAGATA		
<i>c4</i>	F	CTGTATTTCAGCGCCAGGT	141	XM_031317252
	R	ACGTTTCCTTCAGGTGAGTCG		
<i>c5</i>	F	TCCGACAATCCCAGTATGCG	87	XM_031302142.2
	R	ACTGGACTCTGTGACCACCT		
<i>il-1β</i>	F	TGCAGTCTGTGGCTAACCTG	159	XM_031287947
	R	TTCTCTTCACGCCTGTGGAC		
<i>il8</i>	F	GATGAGTCTGAGAAGCCTGGG	122	XM_031286001.2
	R	TCTCGTCGCAATGAGAGTTGG		
<i>tnf-β</i>	F	TGGCCCTTGTTTAGGAGGC	82	XM_031313322.2
	R	GTCTGGCCTGGTTGTGTCAT		
<i>tgf-β</i>	F	TTTTGGCCCTGTACCAGCAT	102	XM_031285154.2
	R	GCCTGCCACGTAATAGAGG		
<i>ppary</i>	F	GCATGTCACACAACGCCATT	116	XM_031301651.2
	R	CCTTAGATCTGCTGCCTCCG		
<i>g6pd</i>	F	TTGGATTGACAGTGATGGGA	215	XM_031316780.2
	R	CCGTCTCTGTACAACCACCATA		
<i>lpl</i>	F	GTGCCAATGTGATCGTGGTG	241	XM_031307241.2
	R	GCGGGATCCATACCTGTGAT		

注: *gapdh*: 甘油醛-3-磷酸脱氢酶; *c3*: 补体 C3; *c4*: 补体 C4; *c5*: 补体 C5; *il-1β*: 白介素 1β; *il8*: 白介素 8; *tnf-β*: 肿瘤坏死因子 β; *tgf-β*: 转化生长因子 β; *ppary*: 过氧化物酶体增殖物激活受体 γ; *g6pd*: 6-磷酸葡萄糖脱氢酶; *lpl*: 脂蛋白脂酶。
Note: *gapdh*: glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase; *c3*: complement C3; *c4*: complement C4; *c5*: complement C5; *il-1β*: interleukin 1, beta; *il8*: interleukin 8; *tnf-β*: tumor necrosis factor β; *tgf-β*: transforming growth factor-β; *ppary*: peroxisome proliferators-activated receptors γ; *g6pd*: glucose-6-phosphate dehydrogenase; *lpl*: lipoprotein lipase.

2 结果与分析

2.1 饲料蛋白和脂肪水平对生长性能的影响

同一脂肪水平下, 饲料蛋白质水平对梭鲈终末体重(FBW)和特定生长率(SGR)等生长指标无显著影响, 而在同一蛋白质水平下, 饲料脂肪水平显著影响梭鲈 FBW 和 SGR, L15 组的 FBW 和 SGR 显著高于 L12 组($P<0.05$)。饲料蛋白质水平为 51%时, L18 组的 FBW 和 SGR 显著高于 L12 组($P<0.05$); 饲料蛋白质水平为 54%时, L18 组肝体比(HSI)显著高于 L15 组。双因素方差分析表明, 饲料蛋白质和脂肪交互对梭鲈的生长指标无显著影响($P>0.05$)。具体情况见表 3。

2.2 饲料蛋白和脂肪水平对全鱼常规营养组成的影响

单因素方差分析表明, 饲料蛋白质水平对全鱼粗蛋白质、粗脂肪、水分和灰分无显著影响; 全鱼粗蛋白质和水分在 L12 组显著高于 L15 和 L18

组($P<0.05$)。饲料蛋白质水平为 51%时, L12 和 L15 组粗蛋白质显著高于 L18 组($P<0.05$); 饲料蛋白质水平为 54%时, L12 组粗蛋白质显著高于 L15 和 L18 组($P<0.05$)。双因素方差分析表明, 饲料脂肪水平对全鱼粗蛋白质、水分和灰分有显著影响。具体情况见表 4。

2.3 肝脏组织学观察

饲料蛋白质水平为 51%时, 3 个脂肪水平添加组肝细胞健康, 无明显空泡化现象。饲料蛋白质水平为 54%时, 可观察到在 L18 组肝细胞肿大, 出现明显空泡化, 且细胞核向细胞的边缘移动, 出现病变及功能损伤倾向, 而 L12 和 L15 组无明显病变现象。具体情况见图 1。

2.4 饲料蛋白和脂肪水平对肝脏抗氧化水平的影响

相同脂肪水平下, 饲料蛋白质水平 51%组 CAT 和 GSH 均显著高于蛋白质水平 54%组($P<0.05$), 而 MDA、SOD 和 T-AOC 均无显著差异。

表 3 饲料蛋白质和脂肪水平对梭鲈幼鱼生长指标的影响
Tab. 3 Effect of dietary protein and lipid level on growth indices of juvenile *Sander lucioperca*

组别 group	初始体重/g IBW	终末体重/g FBW	存活率/% SR	特定生长率/(%/d) SGR	肝体比/% HSI	肥满度/(g/cm ³) CF
P51L12	1.15±0.01	10.56±0.10 ^A	98.13±0.96	3.96±0.02 ^A	1.47±0.06 ^A _B	0.77±0.02
P51L15	1.16±0.01	11.85±0.64 ^{AB}	99.79±0.21	4.15±0.09 ^{AB}	1.46±0.14 ^A _B	0.78±0.03
P51L18	1.16±0.00	12.36±0.54 ^B	99.38±0.36	4.22±0.08 ^B	1.61±0.12 ^B	0.78±0.01
P54L12	1.17±0.01	11.25±0.63 ^{AB}	98.75±0.62	4.04±0.10 ^{AB}	1.29±0.16 ^A _B	0.76±0.01
P54L15	1.16±0.02	12.04±0.07 ^{AB}	99.79±0.21	4.18±0.03 ^{AB}	1.20±0.15 ^A	0.79±0.01
P54L18	1.17±0.00	11.35±0.28 ^{AB}	98.96±1.04	4.16±0.05 ^{AB}	1.62±0.03 ^B	0.74±0.02
饲料蛋白质水平/% dietary protein level						
51	1.16±0.00	11.59±0.36	99.10±0.40	4.11±0.05	1.51±0.06	0.78±0.01
54	1.16±0.01	11.55±0.24	99.17±0.39	4.09±0.04	1.41±0.09	0.76±0.01
饲料脂肪水平/% dietary lipid level						
12	1.16±0.01	10.91±0.32 ^X	98.44±0.53 ^X	4.00±0.05 ^X	1.38±0.09	0.77±0.01
15	1.16±0.01	11.95±0.29 ^Y	99.79±0.13 ^Y	4.17±0.04 ^Y	1.39±0.11	0.78±0.01
18	1.16±0.00	11.86±0.35 ^{XY}	99.17±0.05 ^{XY}	4.14±0.05 ^{XY}	1.62±0.05	0.76±0.01
two-way ANOVA (<i>P</i> -values)						
蛋白质 protein	0.27	0.90	0.90	0.78	0.36	0.31
脂肪 lipid	0.66	0.07	0.16	0.06	0.17	0.48
交互 interaction	0.66	0.19	0.73	0.23	0.74	0.43

注: 在同一列中, 不同饲料组间有显著差异用 A 和 B 表示($P<0.05$); 在相同蛋白质水平处理下, 不同脂肪水平处理间有显著差异用 X 和 Y 表示($P<0.05$)。

Note: In the same column again, significant differences between different feed groups were indicated by A and B ($P<0.05$); under the same protein level treatment, significant differences between different lipid level treatments were indicated by X and Y ($P<0.05$).

表 4 饲料蛋白质和脂肪水平对梭鲈幼鱼全鱼常规营养组成的影响

Tab. 4 Effect of dietary protein and lipid level on whole fish body composition of juvenile <i>Sander lucioperca</i>				
饲料 diet	水分 moisture	粗蛋白质 crude protein	粗脂肪 crude lipid	灰分 crude ash
P51L12	73.26±0.53 ^B	17.66±0.15 ^B	6.05±0.24	3.56±0.04 ^D
P51L15	71.75±0.28 ^A	17.50±0.19 ^B	6.88±0.82	3.49±0.01 ^{CD}
P51L18	72.36±0.31 ^{AB}	16.98±0.23 ^A	5.54±0.82	3.31±0.02 ^A
P54L12	73.43±0.33 ^B	17.61±0.12 ^B	5.97±0.22	3.46±0.03 ^{BCD}
P54L15	72.58±0.50 ^{AB}	16.95±0.08 ^A	7.02±0.38	3.40±0.06 ^{ABC}
P54L18	72.42±0.27 ^{AB}	16.86±0.11 ^A	6.83±0.29	3.37±0.02 ^{AB}
饲料蛋白质水平/% dietary protein level				
51	72.44±0.31	17.38±0.14	6.16±0.39	3.45±0.04
54	72.81±0.33	17.14±0.13	6.61±0.22	3.41±0.02
饲料脂肪水平/% dietary lipid level				
12	73.35±0.25 ^Y	17.64±0.09 ^Y	6.01±0.15	3.51±0.03 ^Y
15	72.17±0.31 ^X	17.23±0.15 ^X	6.95±0.41	3.45±0.03 ^Y
18	72.39±0.26 ^X	16.92±0.12 ^X	6.18±0.48	3.34±0.02 ^X
双因素方差分析 two-way ANOVA (<i>P</i>)				
蛋白质 protein	0.13	0.09	0.32	0.16
脂肪 lipid	<0.01	<0.01	0.21	<0.01
交互 interaction	0.34	0.26	0.41	0.09

注：在同一列中，不同饲料组间有显著差异用 A、B、C 或 D 表示(*P*<0.05)；在相同蛋白质水平处理下，不同脂肪水平处理间有显著差异用 X 和 Y 表示(*P*<0.05)。
Note: In the same column again, significant differences between different feed groups were indicated by A, B, C, or D (*P*<0.05); under the same protein level treatment, significant differences between different lipid level treatments were indicated by X and Y (*P*<0.05).

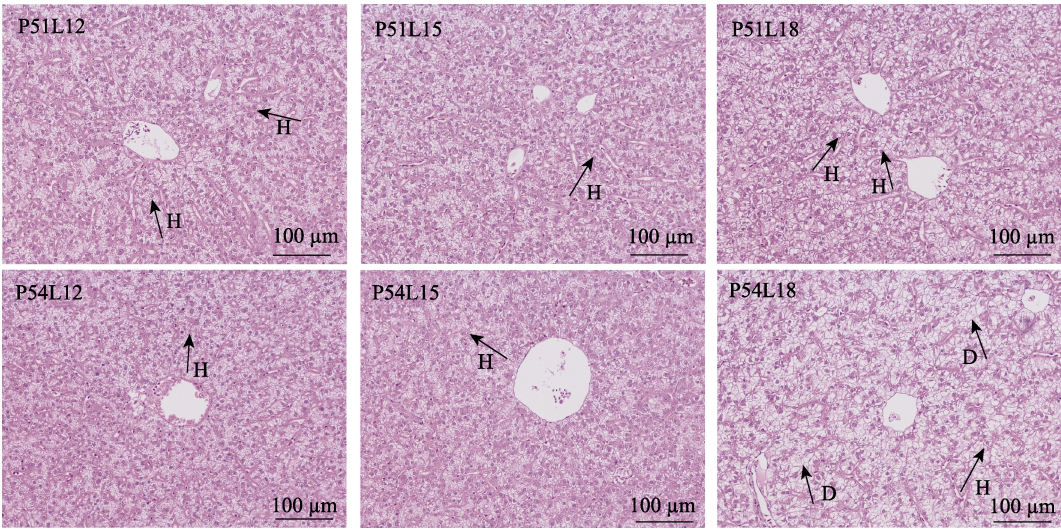


图 1 饲料蛋白质和脂肪水平对梭鲈幼鱼肝脏组织学的影响
H: 正常肝细胞; D: 空泡化肝细胞.

Fig. 1 Effect of dietary protein and lipid level on liver histology of juvenile *Sander lucioperca*
H: Normal hepatocytes; D: Vacuolar degeneration of hepatocytes.

饲料蛋白质水平为 51%时, L18 组 CAT、GSH 和 SOD 活性显著高于 L12 组(*P*<0.05), 但与 L15 组没有显著差异, 而 T-AOC 和 MDA 组间差异不显著.饲料蛋白质水平为 54%时, L15 和 L18 组 CAT 活性显著高于 L12 组(*P*<0.05), L12 组 T-AOC 显著

高于 L15 和 L18 组(*P*<0.05), 而 GSH、SOD 和 MDA 差异不显著。具体情况见图 2。

2.5 肝脏免疫相关基因表达情况

3 种补体基因中 *c4* 基因表达水平在 P51L15 组显著低于 P54L15 组(*P*<0.05), 而 *c3* 和 *c5* 基因

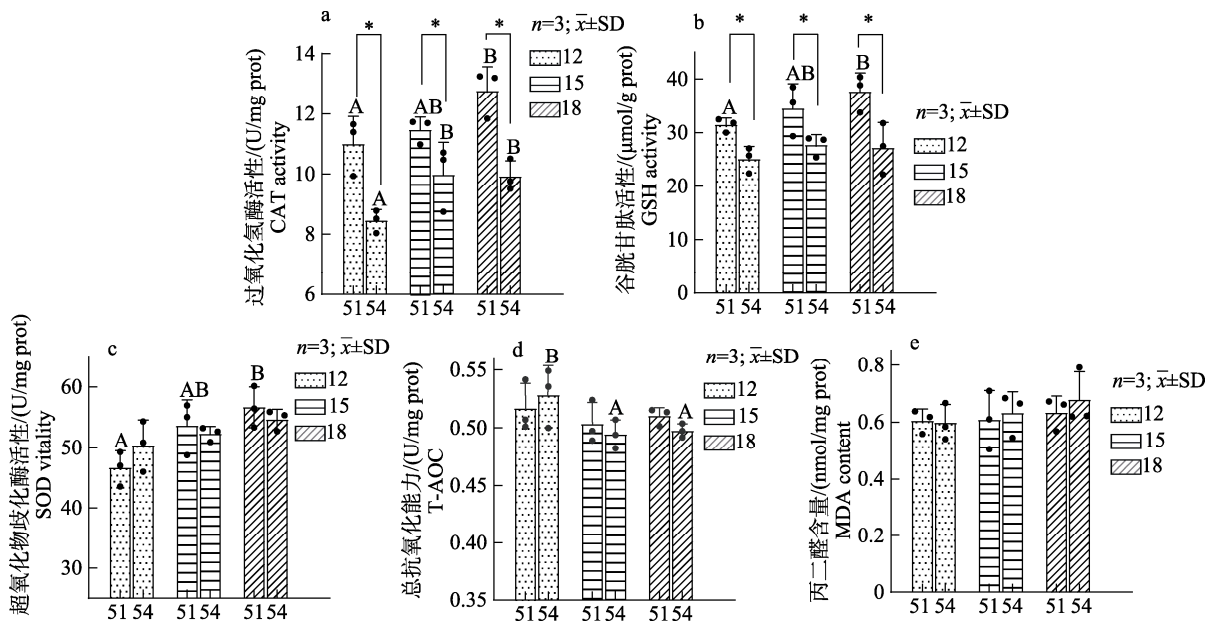


图 2 饲料蛋白质和脂肪水平对梭鲈幼鱼肝脏抗氧化能力的影响

相同饲料蛋白质水平处理下, 不同脂肪水平处理间有显著差异用大写字母表示; 相同脂肪水平处理下, *表示不同蛋白质水平处理间有显著差异用(P<0.05)。

Fig. 2 Effect of dietary protein and lipid level on liver antioxidant capacity of juvenile *Sander lucioperca*. Significant differences between treatments with different lipid levels under the same feed protein level treatment were indicated by capital letters (P<0.05); significant differences between treatments with different protein levels under the same feed lipid level treatment were indicated by asterisk (P<0.05).

表达水平在同脂肪水平下两种蛋白质处理组间 (P51 和 P54) 差异不显著。饲料蛋白质水平为 51% 时, *c3* 和 *c4* 表达水平随脂肪添加量增加而显著上升 (P<0.05), *c5* 表达水平在 L15 和 L18 组显著高于 L12 组 (P<0.05)。饲料蛋白质水平为 54% 时, *c3* 表达水平随脂肪添加量增加而显著上升 (P<0.05), *c4* 和 *c5* 表达水平在 L15 和 L18 组显著高于 L12 组 (P<0.05) (图 3 a-c)。

3 种促炎细胞因子中 *il-1β* 表达水平在 P51L15 组显著高于 P54L15 组 (P<0.05), *il8* 表达水平在 P51L15 和 P51L18 处理组显著低于 P54L15 和 P54L18 (P<0.05)。饲料蛋白质水平为 51% 时, *il-1β*、*il8* 表达水平随脂肪水平增加而显著下降 (P<0.05), L12 组 *tnf-β* 表达水平显著高于 L15 和 L18 组 (P<0.05)。饲料蛋白质水平为 54% 时, L12 组 *il-1β*、*il8* 和 *tnf-β* 表达水平显著高于 L15 和 L18 组 (P<0.05) (图 3 d-f)。抑炎细胞因子 *tgf-β* 表达水平在 P51L18 处理组显著高于 P54L18 处理组 (P<0.05)。两种蛋白质水平下 *tgf-β* 表达水平均为 L12 组显著低于 L15 和 L18 组 (P<0.05) (图 3 g)。

2.6 肝脏脂质代谢相关基因表达情况

ppary 和 *lpl* 基因表达水平在 P51L15 和 P51L18 显著高于 P54L15 和 P54L18 (P<0.05)。饲料蛋白质水平为 51% 时, L15 组 *ppary* 和 *g6pd* 表达水平显著高于 L12 和 L18 组, L15 和 L18 组 *lpl* 表达水平显著高于 L12 组 (P<0.05)。饲料蛋白质水平为 54% 时, L12 组 *ppary* 表达水平显著高于 L15 和 L18, L12 和 L15 组 *g6pd* 和 *lpl* 表达水平显著高于 L18 组 (P<0.05)。具体情况见图 4。

3 讨论

蛋白质和脂肪是鱼类饲料主要组分和供能营养素, 适当地增加脂质摄入可以促进鱼体生长并提高蛋白质的保留率^[17]。本实验通过对摄食不同蛋白质和脂肪水平饲料的梭鲈幼鱼进行比较研究, 发现在摄入饲料蛋白质含量较低 (P51) 时, 梭鲈幼鱼对脂肪的需求较高, 在脂肪水平为 18% 时生长性能最好; 摄入饲料蛋白质含量较高 (P54) 时, 梭鲈在饲料脂肪水平为 15% 时生长性能最好。此结果表明饲料脂肪可用于能量消耗, 从而降低蛋白

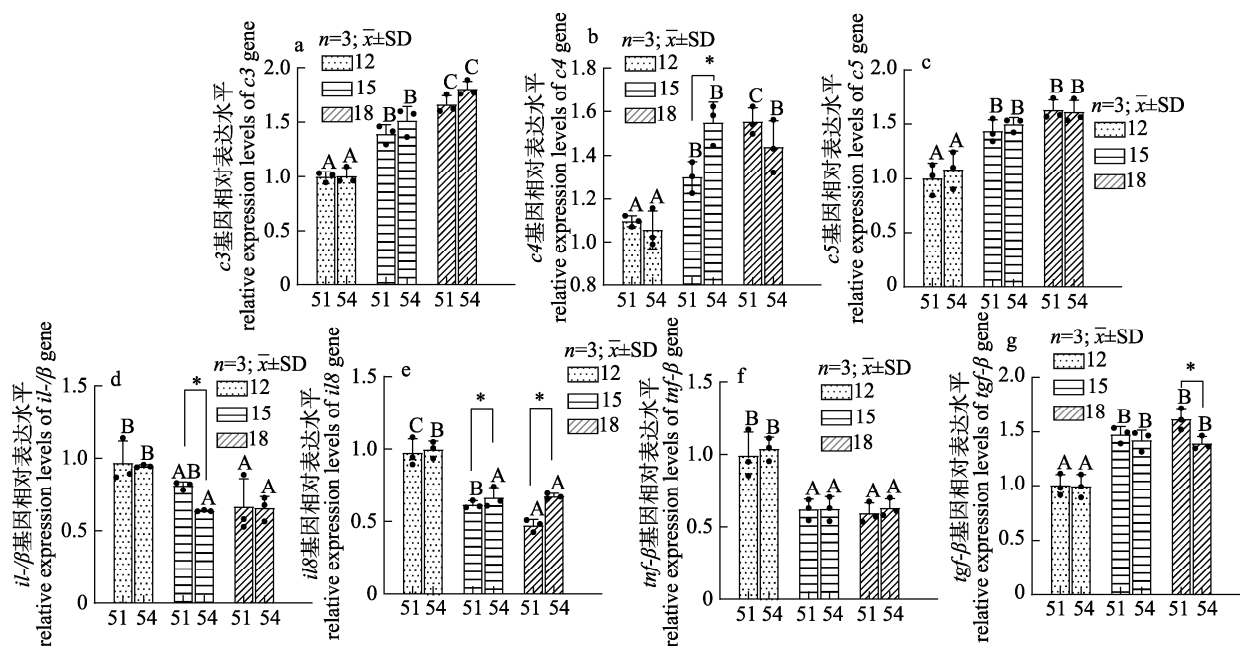


图3 饲料蛋白质和脂肪水平对梭鲈幼鱼肝脏免疫相关基因表达的影响

相同饲料蛋白质水平处理下, 不同脂肪水平处理间有显著差异用大写字母表示;

相同脂肪水平处理下, 不同蛋白质水平处理间有显著差异用*表示。

Fig. 3 Effect of dietary protein and lipid on liver immune-related gene expression of juvenile *Sander lucioperca*. Significant differences between treatments with different lipid levels under the same feed protein level treatment were indicated by capital letters ($P < 0.05$); significant differences between treatments with different protein levels under the same feed lipid level treatment were indicated by asterisk ($P < 0.05$).

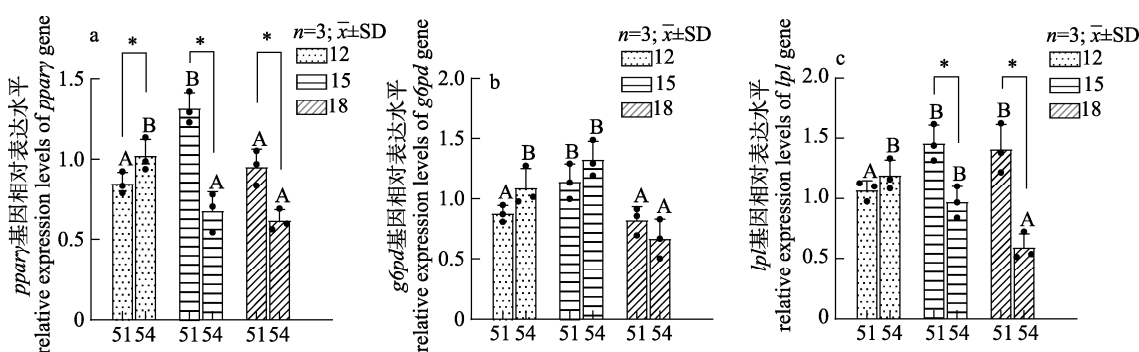


图4 饲料蛋白质和脂肪水平对梭鲈幼鱼肝脏脂质代谢相关基因表达的影响

相同饲料蛋白质水平处理下, 不同脂肪水平处理间有显著差异用大写字母表示;

相同脂肪水平处理下, 不同蛋白质水平处理间有显著差异用*表示。

Fig. 4 Effect of dietary protein and lipid on the expression of genes related to hepatic lipid metabolism of juvenile *Sander lucioperca*. Significant differences between treatments with different lipid levels under the same feed protein level treatment were indicated by capital letters ($P < 0.05$); significant differences between treatments with different protein levels under the same feed lipid level treatment were indicated by asterisk ($P < 0.05$).

质的利用, 在其他肉食性鱼类, 如杂交石斑鱼 (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)^[18]、圆鳍鱼 (*Cyclopterus lumpus*)^[19] 等中均有相似地发现。与细鳞鲑 (*Brachymystax lenok*)^[20] 和大黄鱼^[21] 的研究结果相一致的是, 在较高饲料蛋白质水平 (P54) 下, 饲料脂肪超过 15%, 梭鲈幼鱼生长速度

降低, 这可能是由于高脂质抑制了生长激素的分泌^[22]、降低摄食量^[23], 甚至引起了诱发性代谢障碍^[24]。此外, 饲料能量水平也是影响生长的重要因素, 能量水平过高或过低均会对生长产生负面作用^[25], 且鱼体不同发育阶段营养需求差异较大, 低龄幼鱼发育速度快, 对蛋白质和脂肪需求量相

应增大。本研究基于终末体重和特定生长率确定当饲料蛋白质为 51% 时, 梭鲈幼鱼最佳饲料脂肪需求量为 18%, 高于亚成体梭鲈(210 g)的研究结果(P45%, L10%)^[26], 这样的情况与丝尾鳊(*Hemibagrus wyckoides*)的研究结果类似^[27-29], 均表明幼鱼对饲料蛋白质和脂肪的需求更高。本实验中 P51L18 组特定生长率最大(特定生长率为 4.22%), 高于 Schulz 等^[11]对梭鲈[(1.35~1.40) g]在 P47%L17% 时取得的研究结果(特定生长率为 3.46%), 表明梭鲈对饲料蛋白质和脂肪的需求量较高, 更高水平的饲料蛋白质和脂肪能获取更好的生长性能。

鱼体蛋白质含量是评价鱼类营养状况和生长情况的重要指标之一。本实验中在同一饲料蛋白质水平下, 随着饲料脂肪水平的增加, 全鱼粗蛋白质含量呈下降趋势, 这种情况在拉氏鳊(*Phoxinus lagowskii*)^[30]和乌苏里拟鲮(*Pseudobagrus ussuriensis*)^[31]的研究中也被观察到, 可能是过多的饲料脂肪摄入抑制饲料蛋白质在体内的沉积造成的, 以至于饲料脂肪水平提高, 鱼体粗蛋白质含量反而降低。鱼体脂肪含量的增加通常被认为是饲料脂肪摄入增加所致。本实验中, 饲料脂肪水平从 12% 增加到 15%, 全鱼粗脂肪含量升高, 但继续升至 18%, 全鱼粗脂肪含量反而降低, 这与拉氏鳊^[30]和欧洲鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[32]研究结果一致, 表明过度增加饲料脂肪并不能提高全鱼粗脂肪含量。此外本研究还观察到, 在相同蛋白质水平下, HSI 随饲料脂肪水平的增加而增加, 说明肝脏中有过多的脂肪沉积, 在乌苏里拟鲮^[31]和牙鲈(*Paralichthys olivaceus*)^[33]中也有相似发现。有研究指出脂肪从肝脏到肌肉中的运输效率很低^[34], 且肝脏中脂肪的分解代谢能力有限^[35], 因此导致脂肪在肝脏中沉积过多。

生物体内抗氧化防御机制在维持细胞内氧化还原平衡和保护生物分子稳定性方面发挥着重要的作用。抗氧化应激是生物体重要的防御机制, 为保护机体免受氧化损伤, 细胞已进化出一套抗氧化防御系统, 包括 SOD、CAT 等, 这些酶可以维持氧化还原平衡, 防止或修复氧化损伤^[36]。

SOD、CAT、T-AOC 等可用于评估酶或非酶成分对机体抗氧化能力的影响^[37-38]。MDA 是脂质过氧化形成的产物, 是反映机体氧化应激水平的生物标志物^[39]。生物体可通过保持抗氧化剂和氧自由基之间的动态平衡, 以保护机体免受伤害^[40]。饲料脂肪摄入的增加, 带来过多营养物质和不饱和脂肪酸, 可能会破坏抗氧化剂和氧自由基之间的动态平衡^[29,41], 加剧氧化应激, 导致 CAT 和 GSH 活性增加。本研究发现, 随着饲料脂肪水平增加, SOD、GSH 和 CAT 活性均有所增加, 这与大口黑鲈^[42]和花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[43]的研究结果相似。MDA 含量随着饲料脂肪水平的增加而增加, 可能是饲料脂肪水平的增加导致脂质的过氧化加剧造成的^[29]。

补体 c3、c4 是反应鱼体免疫状态的重要指标^[44-45], 主要表现为抗微生物防御反应。随着饲料脂肪水平的增加, c3、c4 表达水平显著提升, 在石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)^[46]的研究中也观察到随着饲料脂肪水平的提升, 补体系统活性被激活, 说明高脂肪水平会刺激机体激活补体免疫系统, 而补体系统主要为先天免疫的抗菌免疫^[47], 其活性被激活说明可能受到了细菌感染, 因此可以推测, 高脂肪饮食会对机体造成损伤, 增加细菌感染的可能, 从而激活补体系统, 具体机制还需更多的研究。tnf、il 和 tgf 是生物体炎症反应中的重要细胞因子^[48], il-1 β 、il8 和 tnf- β 属促炎因子, tgf- β 是抑炎因子^[49-50]。机体通过促炎因子和抑炎因子相互协调保持平衡, 维持正常免疫状态。本研究中, 随着饲料脂肪水平的增加, 肝脏中促炎因子和抑炎因子的平衡被打破, 促炎因子基因表达水平显著降低, 抑炎因子基因表达水平显著升高, 表明有炎症反应发生, 这种现象在史氏鲟(*Acipenser schrenckii*)^[51]和黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)^[52]中也同样被观察到, 过高饲料脂肪水平会对机体免疫产生损伤。同时在肝脏切片中观察到, 当饲料蛋白质水平为 54%, 脂肪水平达到 18% 时, 肝细胞出现大量由炎症引起的空泡化病变/凋亡, 这可能是高蛋白质高脂肪饮食诱发了炎症反应和氧化应激造成的^[51]。

此外,本研究检测了梭鲈肝脏脂合成和脂分解相关基因的表达水平。在蛋白质水平较低(P51)时,饲料脂肪水平从12%到15%,肝脏脂合成基因 *g6pd* 和脂合成相关的核转录因子 *ppary* 表达水平显著升高,脂肪水平从15%到18%,其表达水平显著降低。这可能是鱼体存在脂肪稳态反馈调节机制^[53-54],在一定范围内增加饲料脂肪水平,脂合成基因表达水平逐渐增加,促进脂肪在体内合成;若超出此范围,脂合成基因表达水平降低,以防止脂肪过度积累对机体造成负担^[55]。脂分解基因 *lpl* 也观察到相似的规律,适量的脂肪添加促进脂合成基因表达,同时促进脂分解基因的表达,通过两者平衡以维持脂肪稳态。在蛋白质水平较高(P54)时,脂肪水平增加, *ppary* 和 *lpl* 基因表达水平降低,说明蛋白质可能会影响脂合成和脂分解基因表达,但具体情况还需更多研究。此外,有报道称 *ppary* 基因与肝脏抗纤维化能力密切相关^[56],其表达水平降低说明肝脏出现肝纤维化,此结果与肝脏切片结果相对应,肝脏出现空泡变性进一步产生肝细胞纤维化,从组织形态方面也表明脂肪添加过量会对肝脏造成损伤。

4 结论

综上,饲料中适量添加脂肪可以减少蛋白质的添加,饲料脂肪可对蛋白质起到节约作用,而过量的蛋白质和脂肪添加会导致梭鲈生长性能降低,肝脏组织形态和健康受到损害。梭鲈幼鱼生长速度快,对饲料蛋白质和脂肪的需求较高,在饲料蛋白质和脂肪水平为51%和18%时,梭鲈生长性能最佳,且肝脏健康状况良好。本研究结果为推动梭鲈幼鱼高效饲料研发和养殖产业的快速健康发展提供支持。

参考文献:

- [1] 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, 解绥启, 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.]
- [2] Li Y X, Wang X D, Hu H B, et al. Optimal protein and lipid requirements of snakehead, *Channa striata*, during the grow-out stage[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(6): 1205-1215. [李彦先, 王晓东, 胡海滨, 等. 中成鱼阶段线鳢对饲料蛋白和脂肪的最适需求量[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(6): 1205-1215.]
- [3] Sun J H, Fan Z, Zhang M J, et al. Effect of dietary protein level on hepatic function and antioxidant capacity of juvenile common carps (*Cyprinus carpio*)[J]. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(3): 113-119. [孙金辉, 范泽, 张美静, 等. 饲料蛋白水平对鲤幼鱼肝功能和抗氧化能力的影响[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(3): 113-119.]
- [4] Jobling M. National Research Council (NRC): Nutrient requirements of fish and shrimp[J]. *Aquaculture International*, 2012, 20(3): 601-602.
- [5] Mai K S. Aquatic animal nutrition and feed[M]. The second edition. Beijing: China Agriculture Press, 2016. [麦康森. 水产动物营养与饲料学[M]. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2016.]
- [6] Zou C Y, Su N N, Wu J H, et al. Dietary Radix Bupleuri extracts improves hepatic lipid accumulation and immune response of hybrid grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 88: 496-507.
- [7] Zou C Y, Du L K, Wu J H, et al. Saikosaponin d alleviates high-fat-diet induced hepatic steatosis in hybrid grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀) by targeting AMPK/PPARα pathway[J]. *Aquaculture*, 2022, 553: 738088.
- [8] Baekelandt S, Mandiki S N M, Schmitz M, et al. Influence of the light spectrum on the daily rhythms of stress and humoral innate immune markers in pikeperch *Sander lucioperca*[J]. *Aquaculture*, 2019, 499: 358-363.
- [9] FAO. *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758)[EB/OL]. (2025-02-19). <https://www.fao.org/fishery/en/aqspecies/3098/en>.
- [10] Schulz C, Böhm M, Wirth M, et al. Effect of dietary protein on growth, feed conversion, body composition and survival of Pike perch fingerlings (*Sander lucioperca*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2007, 13(5): 373-380.
- [11] Schulz C, Huber M, Ogunji J, et al. Effects of varying dietary protein to lipid ratios on growth performance and body composition of juvenile Pike perch (*Sander lucioperca*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2008, 14(2): 166-173.
- [12] Wang Y. Paradigm shift of fish nutrition and feed: The necessity revealed by the application of formulated feed in *Micropterus salmoides* and *Larimichthys crocea* farming[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, 48(4): 222-240. [王岩. 改进鱼类营养和饲料研究范式: 从大口黑鲈和大黄鱼配合饲料在养殖生产中的应用谈起[J]. *水产学报*, 2024,

- 48(4): 222-240.]
- [13] Lu C Y, Sun Z P, Cao D C, et al. Genetic structure of wild *Sander lucioperca* populations based on CO I gene[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(1): 84-94. [鲁翠云, 孙志鹏, 曹顶臣, 等. 基于线粒体 CO I 基因序列的梭鲈野生群体遗传结构[J]. 水产学报, 2024, 48(1): 84-94.]
- [14] Zheng X H, Sun Z P, Lu C Y, et al. A simple method for rapid domestication of *Sander lucioperca*: CN202110868113.3[P]. 2022-10-04. [郑先虎, 孙志鹏, 鲁翠云, 等. 一种快速驯化梭鲈的简易方法: CN202110868113.3[P]. 2022-10-04.]
- [15] Zheng X H, Lu C Y, Sun Z P, et al. An efficient method for constructing and breeding fast growing strains of *Sander lucioperca*: CN202311401788.2[P]. 2024-09-27. [郑先虎, 鲁翠云, 孙志鹏, 等. 一种高效构建和选育梭鲈快速生长品系的方法: CN202311401788.2[P]. 2024-09-27.]
- [16] Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists[M]. The 15th edition. Washington: Association of Official Analytical Chemists, 1990.
- [17] Song L P, An L G, Zhu Y A, et al. Effects of dietary lipids on growth and feed utilization of jade perch, *Scortum barcoo* [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2009, 40(2): 266-273.
- [18] Giri N A, Muzaki A, Marzuqi M, et al. Optimizing protein, lipid and carbohydrate levels in diets for growth of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 584: 012030.
- [19] Hamre K, Berge G M, Sæle Ø, et al. Optimization of the balance between protein, lipid and carbohydrate in diets for lumpfish (*Cyclopterus lumpus*)[J]. Aquaculture Nutrition, 2022, 2022(1): 1155989.
- [20] Chang J, Niu H X, Jia Y D, et al. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, digestive tract enzyme activity and lipid deposition of juvenile Manchurian trout, *Brachymystax lenok* (Pallas)[J]. Aquaculture Nutrition, 2018, 24(2): 694-701.
- [21] Ji R L, Xu X, Xiang X J, et al. Regulation of adiponectin on lipid metabolism in large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. Biochimica Et Biophysica Acta-Molecular and Cell Biology of Lipids, 2020, 1865(8): 158711.
- [22] Bertucci J I, Blanco A M, Navarro J C, et al. Dietary protein: Lipid ratio modulates somatic growth and expression of genes involved in somatic growth, lipid metabolism and food intake in Pejerrey fry (*Odontesthes bonariensis*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2022, 270: 111231.
- [23] Calo J, Conde-Sieira M, Comesaña S, et al. Fatty acids of different nature differentially modulate feed intake in rainbow trout[J]. Aquaculture, 2023, 563: 738961.
- [24] Ruyter B, Moya-Falcón C, Rosenlund G, et al. Fat content and morphology of liver and intestine of Atlantic salmon (*Salmo salar*): Effects of temperature and dietary soybean oil[J]. Aquaculture, 2006, 252(2-4): 441-452.
- [25] Wang J X, Wei Y L, Xu H G, et al. Effects of dietary protein to energy ratios on growth performance, feed utilization and body composition of juvenile tiger puffer (*Takifugu rubripes*) [J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(4): 116-125. [王建学, 卫育良, 徐后国, 等. 饲料蛋白能量比对红鳍东方鲀幼鱼的生长性能、饲料利用和体组成的影响[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(4): 116-125.]
- [26] Zakes Z, Przybyl A, Wozniak M, et al. Growth performance of juvenile pikeperch, *Sander lucioperca* (L.) fed graded levels of dietary lipids[J]. Czech Journal of Animal Science, 2004, 49(4): 156-163.
- [27] 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): 1644.
- [28] 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.
- [29] Zhang Y Z T, Xie K, Shi Y, et al. Dietary protein and lipid level on growth, serum biochemical index and liver antioxidant capacity of juvenile Asian red-tailed catfish (*Hemibagrus wyckioides*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(6): 968-978. [张姚铮泰, 谢凯, 石勇, 等. 饲料蛋白质和脂肪水平对丝尾鲮幼鱼生长、血清生化指标及肝脏抗氧化能力的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(6): 968-978.]
- [30] Jiang X H, Luo X N, Jin G H, et al. Effects of different protein and lipid level diets on growth, body composition and immunity of juvenile *Phoxinus lagowskii*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(3): 864-871. [蒋湘辉, 骆小年, 金广海, 等. 不同蛋白质和脂肪水平饲料对拉氏鲮幼鱼生长、体成分和免疫力的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(3): 864-871.]
- [31] Wang Y Y, Yang Y H, Ma G J, et al. Effects of dietary protein and lipid levels on growth, feed utilization and body composition in *Pseudobagrus ussuriensis*[J]. China Feed, 2015(7): 27-31, 37. [王裕玉, 杨雨虹, 马国军, 等. 饲料不同蛋白质、脂肪水平对乌苏里拟鲿生长、饲料利用及体成分的影响[J]. 中国饲料, 2015(7): 27-31, 37.]
- [32] Peres H, Oliva-Teles A. Effect of dietary lipid level on growth performance and feed utilization by European sea bass juveniles (*Dicentrarchus labrax*)[J]. Aquaculture, 1999, 179(1-4): 325-334.
- [33] Lee S M, Kim K D. Effect of various levels of lipid exchanged with dextrin at different protein level in diet on growth and body composition of juvenile flounder *Parali-*

- chthys olivaceus*[J]. Aquaculture Nutrition, 2005, 11(6): 435-442.
- [34] Lall S P, Nanton D A, Tibbetts S M, et al. Nutrient requirements and feeding of Haddock[J]. Bulletin of the Aquaculture Association of Canada, 2003(7): 79-86.
- [35] Nanton D A, Lall S P, Ross N W, et al. Effect of dietary lipid level on fatty acid β -oxidation and lipid composition in various tissues of haddock, *Melanogrammus aeglefinus* L.[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry & Molecular Biology, 2003, 135(1): 95-108.
- [36] Duan Y F, Zhang J S, Dong H B, et al. Oxidative stress response of the black tiger shrimp *Penaeus monodon* to *Vibrio parahaemolyticus* challenge[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2015, 46(2): 354-365.
- [37] Abdel-Daim M M, Eissa I A M, Abdeen A, et al. Lycopene and resveratrol ameliorate zinc oxide nanoparticles-induced oxidative stress in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2019, 69: 44-50.
- [38] Chen S J, Guo Y C, Espe M, et al. Growth performance, haematological parameters, antioxidant status and salinity stress tolerance of juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed different levels of dietary myo-inositol[J]. Aquaculture Nutrition, 2018, 24(5): 1527-1539.
- [39] Martínez-Alvarez R M, Hidalgo M C, Domezain A, et al. Physiological changes of sturgeon *Acipenser naccarii* caused by increasing environmental salinity[J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(23): 3699-3706.
- [40] Paital B, Chainy G B N. Antioxidant defenses and oxidative stress parameters in tissues of mud crab (*Scylla serrata*) with reference to changing salinity[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2010, 151(1): 142-151.
- [41] 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.]
- [42] Zhu T T, Jin M, Sun P, et al. Effects of dietary lipid level on morphology indexes, tissue fatty acid composition, serum biochemical indexes and liver antioxidant indexes of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(1): 126-137. [朱婷婷, 金敏, 孙蓬, 等. 饲料脂肪水平对大口黑鲈形体指标、组织脂肪酸组成、血清生化指标及肝脏抗氧化性能的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(1): 126-137.]
- [43] Xie S W, Lin Y Y, Wu T, et al. Dietary lipid levels affected growth performance, lipid accumulation, inflammatory response and apoptosis of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*)[J]. Aquaculture Nutrition, 2021, 27(3): 807-816.
- [44] Li M Y, Zhu X M, Tian J X, et al. Dietary flavonoids from *Allium mongolicum* Regel promotes growth, improves immune, antioxidant status, immune-related signaling molecules and disease resistance in juvenile northern snakehead fish (*Channa argus*)[J]. Aquaculture, 2019, 501: 473-481.
- [45] Yu Z, Zheng Y G, Du H L, et al. Bioflocs protects copper-induced inflammatory response and oxidative stress in *Rhynchocypris lagowski* Dybowski through inhibiting NF- κ B and Nrf2 signaling pathways[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2020, 98: 466-476.
- [46] Lin Y H, Shiau S Y. Dietary lipid requirement of grouper, *Epinephelus malabaricus*, and effects on immune responses [J]. Aquaculture, 2003, 225(1-4): 243-250.
- [47] Stoiber H, Thielens N, Würzner R, et al. Editorial: The role of complement in microbial infections[J]. Frontiers in Immunology, 2021, 12: 640092.
- [48] Amoah K, Yan X B, Liu H, et al. Substituting fish meal with Castor meal in diets of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ $\times$ *E. lanceolatus* ♂): Effects on growth performance, immune response, antioxidant and digestive enzyme activities, gut morphology, and inflammatory-related gene expression[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2022, 131: 181-195.
- [49] Wang Y, Zhao H J, Liu Y C, et al. Environmentally relevant concentration of sulfamethoxazole-induced oxidative stress-cascaded damages in the intestine of grass carp and the therapeutic application of exogenous lycopene[J]. Environmental Pollution, 2021, 274: 116597.
- [50] Zhou C P, Lin H Z, Huang Z, et al. Effects of dietary leucine levels on intestinal antioxidant status and immune response for juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*) involved in Nrf2 and NF- κ B signaling pathway[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2020, 107: 336-345.
- [51] Li Y, Li W T, Luo L, et al. Dietary lipid levels affect growth performance, lipid metabolism, antioxidant and immune status of Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii*[J]. Aquaculture Reports, 2023, 33: 101796.
- [52] Jin M, Zhu T T, Tocher D R, et al. Dietary fenofibrate attenuated high-fat-diet-induced lipid accumulation and inflammation response partly through regulation of *ppara* and *sirt1* in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*)[J]. Developmental and Comparative Immunology, 2020, 109: 103691.
- [53] Alves-Bezerra M, Cohen D E. Triglyceride metabolism in the liver[J]. Comprehensive Physiology, 2018, 8: 1-22.
- [54] Luo J X, Ren C, Zhu T T, et al. High dietary lipid level promotes low salinity adaptation in the marine euryhaline crab (*Scylla paramamosain*)[J]. Animal Nutrition, 2023, 12: 297-307.

- [55] Huang C C, Sun J, Ji H, et al. Systemic effect of dietary lipid levels and α -lipoic acid supplementation on nutritional metabolism in zebrafish (*Danio rerio*): Focusing on the transcriptional level[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2020, 46(5): 1631-1644.
- [56] Li Y, He S X, Zhang Z, et al. Establishment of *Danio rerio* nutritional induced fatty liver model[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(5): 775-784. [李钰, 何凤旭, 张震, 等. 斑马鱼营养性脂肪肝模型构建[J]. *水产学报*, 2017, 41(5): 775-784.]

Effects of dietary protein and lipid levels on growth and hepatic health of juvenile *Sander lucioperca*

ZHAO Jie^{1,2}, ZHENG Xianhu^{1,2}, SUN Zhipeng², WANG Liansheng², FAN Ze², WANG Di², LIU Yang², LIU Tianqi², ZHANG Kexin², LU Cuiyun^{1,2}

1. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Germplasm Resources, Ministry of Agriculture and Rural Areas; College of Fish and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Freshwater Fish Breeding; Key Laboratory of Freshwater Aquatic Biotechnology and Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China

Abstract: *Sander lucioperca* is an important cultured fish in Eurasian countries. It has broad breeding prospects owing to its rapid growth, pronounced adaptability, tender flesh, and high nutritional value. However, the farmed production remains limited to only 4.29 kilotons, primarily because of the scarcity of suitable, high-quality compound feeds. This study examined the effects of different dietary protein and lipid levels, and their interactions, on growth, liver histology, antioxidant enzyme activity, and immune-related gene expression in juvenile *S. lucioperca*. The experiment included two protein levels (51% and 54%) and three lipid levels (12%, 15%, and 18%), thus using six distinct feed formulations. Juvenile *S. lucioperca* [(1.16±0.01) g] were fed with these formulations during an 8-week feeding trial. The results showed that the dietary lipid level exerted a significant effect on final body weight and specific growth rate of juvenile *S. lucioperca* ($P<0.05$), whereas no significant interaction between protein and lipid levels was observed with regard to final body weight and specific growth rate. At a protein level of 51%, the highest final body weight and specific growth rate were achieved with 18% lipid content; at a protein level of 54%, these metrics were also greatest at the 15% lipid level. As the lipid level in diet increased, the crude protein content in whole fish decreased gradually, whereas the crude lipid content showed an increasing and then decreasing trend. Considerable fatty degeneration of hepatocytes was observed in the 54% protein, 18% lipid group, which was not observed in other treatment groups. At a protein level of 51%, the activities of antioxidant enzymes such as catalase, glutathione, and superoxide dismutase significantly increased with the increase of dietary lipid levels ($P<0.05$); at a protein level of 54%, the catalase activity significantly increased with the increase of dietary lipid levels ($P<0.05$). The expression levels of complement genes (*c3*, *c4*, and *c5*) and an anti-inflammatory cytokine-related gene (*tgf- β*) in the liver increased significantly with the increase of dietary lipid levels ($P<0.05$), whereas the expression levels of pro-inflammatory cytokine-related genes (*il-1 β* , *il8*, and *tnf- β*) decreased significantly ($P<0.05$). In conclusion, appropriate lipid levels in diet can improve the growth performance of juvenile *S. lucioperca*, save protein intake, whereas excessive lipid level may increase the risk of vacuolar degeneration of hepatocytes. It is recommended that the protein and lipid supplementation levels in diet of juvenile *S. lucioperca* juvenile are 51% and 18%, respectively.

Key words: *Sander lucioperca*; protein; lipid; growth performance; liver antioxidant; liver inflammation; liver histology

Corresponding author: LU Cuiyun. E-mail: lucuiyun@hrfri.ac.cn