

饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟生长性能、生理代谢和感官品质的影响

陈丽霞 曹嵩靖 孟玉琼 孙国梁 李长忠 马睿

DIETARY PROTEIN AND LIPID LEVELS ON GROWTH, PHYSIOLOGICAL METABOLISM AND
ORGANOLEPTIC QUALITY OF TRIPLOID RAINBOW TROUT

CHEN Li-Xia, CAO Song-Jing, MENG Yu-Qiong, SUN Guo-Liang, LI Chang-Zhong, MA Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2024.2024.0059>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

饲料糖和脂水平对团头鲂生长性能及血浆代谢物的影响

EFFECTS OF DIETARY CARBOHYDRATE AND LIPID LEVELS ON GROWTH PERFORMANCE AND PLASMA
METABOLITES IN JUVENILE BLUNT SNOUT BREEM

水生生物学报. 2021, 45(4): 756–763 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.074>

饲料蛋白质和小麦淀粉水平对中大规格草鱼生长性能及肝脏组织结构的影响

EFFECTS OF DIETARY PROTEIN AND WHEAT STARCH ON GROWTH AND LIVER STRUCTURE OF GRASS CARP,
CTENOPHARYNGODON IDELLA

水生生物学报. 2019, 43(5): 983–991 <https://doi.org/10.7541/2019.117>

饲料蛋白水平对湘华鲮幼鱼生长性能、体成分及血清生化指标的影响

EFFECTS OF DIETARY PROTEIN LEVELS ON GROWTH PERFORMANCE, BODY COMPOSITION AND SERUM
BIOCHEMICAL INDICES OF JUVENILE *SINILABEO DECORUS* TUNGTING (NICHOLS)

水生生物学报. 2020, 44(2): 346–356 <https://doi.org/10.7541/2020.042>

饲料中猪肉骨粉替代鱼粉对芙蓉鲤生长性能、血液生理生化、肌肉组成及质构特性的影响

EFFECTS OF DIETARY FISHMEAL REPLACEMENT WITH MEAT AND BONE MEAL ON THE GROWTH PERFORMANCE,
BLOOD PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL INDICES, MUSCLE CHEMICAL COMPOSITION AND TEXTURE
CHARACTERISTICS IN JUVENILE FURONG CRUCIAN CARP (FURONG CARP ♀ × RED CRUCIAN CARP ♂)

水生生物学报. 2020, 44(1): 85–94 <https://doi.org/10.7541/2020.011>

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

EFFECTS OF FEED PROTEIN LEVELS ON GROWTH, DIGESTIVE ENZYME ACTIVITIES, NON-SPECIFIC IMMUNITY AND
PROTEIN METABOLISM OF *SCHIZOTHORAX O' CONNORI*

水生生物学报. 2020, 44(4): 693–706 <https://doi.org/10.7541/2020.084>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2024.2024.0059

饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟生长性能、 生理代谢和感官品质的影响

陈丽霞^{1,2*} 曹嵩靖^{1,2*} 孟玉琼^{1,2} 孙国梁^{1,3} 李长忠^{1,2} 马睿^{1,3}

(1. 农业农村部高原冷水鱼养殖与生态环境保护重点实验室(部省共建), 西宁 810016; 2. 青海大学生态环境工程学院, 西宁 810016; 3. 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016)

摘要: 研究采用3×3双因素实验设计, 配制3个饲料蛋白质水平(35%、40%和45%)和3个饲料脂肪水平(20%、25%和30%)的9种饲料探究饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*; 初始体重为1.5 kg)生长性能、生理代谢和感官品质的影响。实验结果表明: 在生长性能方面, 蛋白质水平为40%、脂肪水平≥25%的饲料组(P40L25和P40L30组)三倍体虹鳟增重率最高, 且P40L30组饲料系数最低。在生理代谢方面, 高蛋白质饲料(45%)会降低三倍体虹鳟内脏中的脂肪沉积, 并促进肝脏健康; 高脂肪饲料(30%)不会增加肝脏脂肪含量, 同时会提高肝脏抗氧化能力; 然而高蛋白质高脂肪饲料(P45L30)组肠道发生氧化损伤导致消化能力下降进而影响鱼类生长和饲料利用。在感官品质方面, 肌肉红色值在P45L30组最高, 饲料脂肪水平对三倍体虹鳟肉质和气味无明显影响, 而投喂高蛋白质饲料(45%)会导致肉质下降。综合以上结果, 体重在1.5—2.5 kg生长阶段的三倍体虹鳟饲料中适宜的蛋白质水平为40%, 适宜脂肪水平为≥25%。

关键词: 生长性能; 生理代谢; 感官品质; 饲料营养; 三倍体虹鳟

中图分类号: S963.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)08-1279-13



虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*), 鲑科肉食性鱼类, 作为高价值的冷水鱼代表深受全球鲑鳟养殖企业的青睐。近年来, 国内虹鳟养殖发展势头强劲, 到2022年底产量达到3.73万吨^[1], 养殖区域包括青海、甘肃、新疆、山东、四川、云南等省份, 其中以三倍体虹鳟为主要养殖对象。经过2—3年的养殖时间, 鱼体规格可达3 kg以上, 鱼肉品质深受消费者喜爱^[2]。然而目前养殖基本使用国外饲料, 开发高效环保的国产饲料成为亟须解决的产业“卡脖子”问题^[3]。

饲料中适宜的蛋白质和脂肪水平是影响鱼类生长的关键因素, 其中蛋白质是鱼类饲料中最重要的也是最贵的营养素, 而脂肪在鲑鳟鱼中利用效率高且对蛋白质存在节约效应^[4]。因此, 研究饲料中适宜的蛋白质和脂肪水平是开发低成本、营养均衡

和环境友好饲料的基础^[5]。针对三倍体虹鳟, 本团队前期分别开展了0.1—1.0和3.0—4.5 kg生长阶段饲料中适宜蛋白质和脂肪水平的研究^[2-4, 6-9], 但截至目前中间生长阶段(1.0—3.0 kg)相关营养参数不明确。

因此, 本研究以初始体重为1.5 kg的三倍体虹鳟为研究对象, 采用双因素实验设计探究不同饲料蛋白质和脂肪水平对其生长性能、生理代谢和感官品质的影响, 筛选出1.0—3.0 kg生长阶段的三倍体虹鳟饲料中适宜蛋白质和脂肪水平, 为三倍体虹鳟精准营养和动态饲料配方提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

实验饲料以鱼粉(秘鲁Corporacion pesquera inca

收稿日期: 2024-02-08; 修订日期: 2024-04-02

基金项目: 青海省科技厅项目(2019-NK-104)资助 [Supported by the Science and Technology Projects of Qinghai (2019-NK-104)]

作者简介: 陈丽霞(1994—), 女, 硕士研究生; 主要从事动物生态学研究。E-mail: 2406213494@qq.com 曹嵩靖(1998—), 女, 硕士研究生; 主要从事动物生态学研究。E-mail: 1427310697@qq.com *共同第一作者

通信作者: 马睿(1986—), 男, 博士, 教授; 主要从事水产动物营养与饲料学研究。E-mail: myrui713@163.com

s.a.c.公司生产)为主要蛋白源,鱼油(荣成市蓝海海洋生物科技有限公司)和豆油(中纺粮油(四川)有限公司)为主要脂肪源,小麦粉(陕西老牛面粉有限公司)和木薯淀粉(厦门象屿农产品有限责任公司)为主要糖源,设计双因素三水平(3×3)的交互实验。饲料蛋白质水平分别为35%、40%和45%,每个蛋白质水平设置3个脂肪水平分别为20%、25%和30%,共9组饲料分别命名成P35L20、P35L25、P35L30、P40L20、P40L25、P40L30、P45L20、P45L25和P45L30处理组。实验配方和成分分析见表1。各实验饲料委托通威农业发展有限公司加工后运输到养殖基地备用。

1.2 饲料与管理

本研究中实验鱼由青海民泽龙羊峡生态水产有限公司提供,养殖实验在青海省龙羊峡水库中开展。挑选13500尾三倍体虹鳟(平均初始体重为1.5 kg)并随机分配到27个网箱(8 m×8 m×8 m),每个网箱

放置500尾鱼。在养殖实验中,每种饲料投喂3个网箱作为养殖重复($n=3$),每天8:30和16:30进行人工投喂至鱼类明显饱腹。在此期间,记录饲料消耗量及死鱼的数量和重量。养殖实验从5月开始,持续8周。每天测量水质情况:水温在6—16.7℃、溶解氧在5.4—9.4 mg/L。

1.3 样本采集及指标测定

样本采集 在养殖实验结束时,所有实验鱼停食24h后如Cao等^[4]的方法进行称重。每个网箱随机取3尾健康鱼用丁香酚(1:10000;中国上海试剂公司)进行麻醉后测量体重和体长,随后用5 mL注射器从尾部静脉采集血液样本,然后离心(4000×g) 10min以分离血浆,同一网箱中3尾鱼的血浆样品汇集为一个生物重复($n=3$)。剖取内脏、肝脏、胃、幽门垂、肠道和鱼片的样品。测量每尾鱼的内脏、肝脏和鱼片的重量及肠道的长度,分别计算脏体比(VSI)、肝体比(HSI)、出肉率(FY)、相对肠道

表1 实验饲料配方及营养成分(%干物质)

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

原料 Ingredient	组别Group								
	P35/L20	P35/L25	P35/L30	P40/L20	P40/L25	P40/L30	P45/L20	P45/L25	P45/L30
红鱼粉 Brown fish meal ¹	37	37	37	44	44	44	51	51	51
小麦粉Wheat meal ¹	15	15	15	15	15	15	15	15	15
木薯淀粉 Cassava starch ¹	15	15	15	10	10	10	5	5	5
纤维素Cellulose	13.86	8.86	3.86	12.66	7.66	2.66	11.36	6.36	1.36
鱼油Fish oil	13.3	18.3	23.3	12.5	17.5	22.5	11.8	16.8	21.8
豆油Soybean meal	3	3	3	3	3	3	3	3	3
多维多矿 ² Vitamin-mineral premix ²	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ca (H ₂ PO ₄) ₂	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
氯化胆碱 Choline chloride	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
丙酸钙 Calcium propionate	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
乙氧基喹啉 Ethoxyquin	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
甜菜碱Betaine	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Y ₂ O ₃	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
虾青素Astaxanthin ³	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
成分分析 Proximate analysis ($n=3$)									
水分Moisture (%)	2.8	3.2	3.7	3.4	2.4	2.4	2.6	2.8	2.7
粗蛋白 Crude protein (% dry matter)	36.0	35.8	34.7	40.6	40.4	40.8	45.5	45.5	44.2
粗脂肪 Crude lipid (% dry matter)	20.6	25.9	30.4	19.7	24.5	29.3	19.4	25.3	29.4
能量Gross energy (kJ/g)	21.8	23.7	25.2	21.3	23.1	24.9	21.1	23.3	24.6

注: ¹红鱼粉,粗蛋白68.4%,粗脂肪8.7%;小麦粉,粗蛋白17.7%,粗脂肪1.5%;木薯淀粉,粗蛋白0.8%,粗脂肪0.1%;²多维多矿预混料包括0.5%的多维预混料和0.5%的多矿预混料(肉食性鱼类用,通威农业发展有限公司);³虾青素: 10% (CAROPHYLL[®], 帝斯曼, 荷兰)
Note: ¹Brown fish meal containing 68.4% crude protein and 8.7% crude lipid. Wheat meal containing 17.7% crude protein and 1.5% crude lipid. Cassava starch containing 0.8% crude protein and 0.1% crude lipid; ²Vitamin-mineral premix included 0.5% vitamin premix and 0.5% mineral premix on the basis of our previous study^[2]. ³Astaxanthin: 10% (CAROPHYLL[®], DSM, Netherlands)

长度(RIL)和鱼片长指数。采用与血浆混样相似的方法汇集各组织样品, 每个饲料处理有3个生物学重复($n=3$), 所有的样品都在液氮中冷冻后储存在 -80°C 冰箱以备进一步分析。对于肌肉样品, 每尾鱼的左侧鱼片装在冰盒中储存24h, 运至青海大学实验室后立即对鱼片的质地和颜色进行测定。将鱼片去皮并分割特定部位后, 置于 -80°C 冰箱保存, 用于后续化学品质指标的测定。

成分测定 采用AOAC方法对饲料原料和实验饲料进行干物质、粗蛋白、粗脂肪和总能量的分析^[10]。肝脏和肌肉中水分含量在 -45°C 下冷冻干燥至恒定重量而测定。肝脏和肌肉中的粗蛋白含量用杜马斯定氮仪(DumatecTM 8000, FOSS, 丹麦)测定($N\times 6.25$)。肝脏和肌肉中的粗脂肪含量根据Folch等^[11]的氯仿甲醇方法测定。肝糖原和肌糖原的含量采用蒽-硫酸比色法由商业检测试剂盒(南京建成生物工程研究所, 中国)测定。

消化酶测定 用均质器(XHF-D, 中国新芝)于冰浴条件下将胃、幽门垂和肠道样品匀浆, 将每个组织的10% (w/v)匀浆液在 4°C 下离心($10000\times g$) 15min, 然后将上清液储存在 -80°C 冰箱。使用Meng等^[6]描述的方法分析消化器官中的总蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶活性。组织中蛋白质含量(考马斯亮蓝法)采用商业试剂盒(南京建成生物工程研究所, 中国)测定。

抗氧化指标测定 血浆、肝脏和肠道中的总抗氧化能力(T-AOC, FRAP法)、丙二醛(MDA, TBA法)和蛋白质羰基(PC, 紫外比色法)的含量采用商业试剂盒(南京建成生物工程研究所, 中国)测定。

代谢酶测定 肝脏中的脂蛋白脂肪酶(LPL)、肝脂肪酶(HL)和总脂肪酶(比色法)及谷丙转氨酶(ALT, 赖氏法)、谷草转氨酶(AST, 赖氏法)和谷氨酸脱氢酶(GDH, NADH速率法)活性采用商业试剂盒(南京建成生物工程研究所, 中国)测定。

血浆生化指标测定 血浆ALT、AST、总蛋白(TP)、葡萄糖(GLU)、甘油三酯(TG)、胆固醇(CHOL)、高密度脂蛋白-胆固醇(HDL-C)和低密度脂蛋白-胆固醇(LDL-C)水平在经过认证的医院使用标准临床方法由自动生化分析仪(7180, Hitachi, 日本)检测。

肌肉品质指标测定 肌肉品质相关指标的测定方法具体参见Meng等^[9]建立的方法, 其中肉色测定采用色差仪(CR-400, Minolta, 日本)、肉质测定采用质地分析仪(TMS-PRO, FTC, 美国)、挥发性气味物质测定采用气相色谱-质谱(GC-MS, QP2020, 日本岛津)与自动固相微萃取(SPME)系统(AOC-

6000, CTC, 瑞士)。

1.4 计算与统计分析

成活率(SR, %)= $100\times(\text{最终鱼数})/(\text{初始鱼数})$;

增重率(WGR, %)= $100\times[\text{最终体重(g)}-\text{初始体重(g)}]/[\text{初始体重(g)}]$;

日摄食率(FI, %/d)= $100\times\text{饲料用量(g)}/[\text{天数}\times(\text{初始体重(g)}+\text{最终体重(g)})/2]$;

饲料系数(FCR)= $\text{饲料消耗量(g)}/\text{体重增重量(g)}$;

肥满度(CF)= $100\times[\text{体重(g)}]/[\text{体长(cm)}]^3$;

脏体比(VSI)= $100\times[\text{内脏重量(g)}]/[\text{体重(g)}]$;

肝体比(HSI)= $100\times[\text{肝脏重量(g)}]/[\text{体重(g)}]$;

肠长指数(RIL)= $\text{肠道长度(cm)}/\text{体长(cm)}$;

出肉率(FY, %)= $100\times[\text{鱼片重量(g)}/\text{体重(g)}]$;

鱼片长指数= $\text{鱼片长度(cm)}/\text{体长(cm)}$ 。

实验数据均采用平均值 $\pm$ 标准误表示, 由SPSS 26.0统计软件进行分析处理。以饲料蛋白质水平和脂肪水平作为因素, 参照Xu等^[12]的方法进行双因素(Two-way ANOVA)和单因素方差分析(One-way ANOVA), 显著性水平设定为0.05。

2 结果

2.1 生长性能和饲料利用

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟生长性能和饲料利用的影响如表2所示。成活率和日摄食率既不受饲料蛋白质和脂肪水平交互作用的影响, 也不受饲料蛋白质或脂肪水平的影响($P>0.05$)。鱼体末重仅受饲料蛋白质水平的显著影响($P<0.05$), 其随着饲料蛋白质水平的增加而呈现先平稳后下降的趋势。饲料中蛋白质和脂肪水平的交互作用对增重率和饲料系数影响显著($P<0.05$)。在较高的饲料脂肪水平(25%—30%)下, 40%蛋白质水平的饲料会显著提高增重率, 使其于P40L25和P40L30处理组达到最大值; 而在较低的饲料脂肪水平(20%)下, 45%蛋白质水平的饲料能提高增重率。在较低的饲料蛋白质水平(35%—40%)下, 饲料系数随饲料脂肪水平的增加而下降, 于P40L30处理组达到最小值, 而在较高的饲料蛋白质水平(45%)下, 饲料系数不随饲料脂肪水平变化而变化。

CF、VSI、HSI和RIL不受饲料蛋白质和脂肪水平交互作用的影响($P>0.05$; 表2)。随饲料蛋白质水平的增加, CF、VSI、HSI和RIL呈现降低的趋势($P<0.05$)。此外, 随饲料脂肪水平的增加, RIL呈先平稳后上升的趋势($P<0.05$)。

2.2 肝脏和肌肉成分

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟肝脏成分的影响如表3所示。饲料中蛋白质和脂肪水

平对肝脏蛋白质和糖原含量存在显著的交互作用 ($P<0.05$)。当饲料蛋白质水平 $\geq 40\%$ 时, 肝脏蛋白质含量随着饲料脂肪水平的增加而增加, 而当饲料蛋白质水平为 35% 时, 肝脏蛋白质含量不随饲料脂肪水平的变化而变化。此外当饲料脂肪水平 $\geq 25\%$ 时, 肝脏蛋白质含量随着饲料蛋白质水平的增加而增加。肝脏糖原含量变化无明显规律, 在P35L20组最低, 而在P35L25组最高。饲料蛋白质水平对肝脏脂肪含量有显著影响, 随饲料蛋白质水平的增加呈现先下降后上升的趋势 ($P<0.05$)。然而饲料脂肪水

平对肝脏脂肪含量无显著影响 ($P>0.05$)。

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟肌肉成分的影响如表3所示。饲料蛋白质水平和脂肪水平分别对肌肉蛋白质含量产生显著影响 ($P<0.05$)。高饲料蛋白质组(45%)鱼肉蛋白质含量最高, 而低饲料脂肪组(20%)肌肉蛋白质含量最高。饲料中蛋白质和脂肪水平对肌肉脂肪和糖原含量存在显著的交互作用 ($P<0.05$)。当饲料蛋白质水平 $\geq 40\%$ 时, 肌肉脂肪含量随着饲料脂肪水平的增加呈现先上升后平稳的趋势; 而当饲料蛋白质水平为 35% 时,

表2 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟生长性能的影响

Tab. 2 Effects of dietary protein and lipid levels on growth performance of triploid rainbow trout

组别 Group	初重 Initial weight (kg)	末重 Final weight (kg)	成活率 Survival rate (%)	增重率 Weight gain rate (%)	饲料系数 Feed conversion ratio	日摄食率 Feeding rate (%BW/d)	肥满度 Condition factor	脏体比 VSI	肝体比 HSI	肠长指数 RIL
P35L20	1.50±0.19	2.06±0.04	98.7±1.0	31.4±1.5 ^a	1.85±0.08 ^c	0.89±0.04	1.89±0.02	10.8±0.3	0.77±0.02	0.330±0.005
P35L25	1.51±0.03	2.12±0.05	97.7±0.9	40.1±1.5 ^{bc}	1.57±0.07 ^{abc}	0.98±0.02	1.92±0.03	11.0±0.3	0.79±0.02	0.333±0.009
P35L30	1.51±0.02	2.11±0.04	96.1±1.7	39.6±1.1 ^{ab}	1.45±0.08 ^{ab}	0.96±0.03	1.99±0.04	11.1±0.4	0.82±0.02	0.364±0.006
P40L20	1.46±0.03	1.98±0.05	96.9±1.4	35.1±1.2 ^{ab}	1.86±0.11 ^c	1.00±0.05	1.81±0.03	10.3±0.3	0.79±0.02	0.344±0.007
P40L25	1.49±0.04	2.09±0.06	97.7±1.0	41.9±3.7 ^c	1.44±0.07 ^{ab}	1.00±0.01	1.81±0.04	10.6±0.4	0.75±0.02	0.337±0.006
P40L30	1.45±0.04	2.12±0.04	96.0±0.8	44.3±2.2 ^c	1.36±0.11 ^a	1.02±0.01	1.83±0.02	11.0±0.4	0.76±0.02	0.338±0.007
P45L20	1.41±0.02	1.98±0.03	97.7±1.1	41.0±1.8 ^{bc}	1.48±0.06 ^{ab}	0.98±0.03	1.82±0.03	10.0±0.3	0.71±0.02	0.319±0.006
P45L25	1.51±0.03	2.02±0.05	98.2±0.3	34.6±2.0 ^{ab}	1.59±0.06 ^{abc}	0.97±0.04	1.73±0.03	9.7±0.3	0.69±0.01	0.315±0.006
P45L30	1.46±0.03	1.90±0.01	96.4±0.4	32.3±1.0 ^a	1.54±0.09 ^{abc}	0.90±0.04	1.76±0.02	10.9±0.4	0.68±0.01	0.329±0.006
饲料蛋白质水平 Dietary protein level (%)										
P35	1.51±0.01	2.10±0.02 ^B	97.5±0.7	37.0±1.6 ^A	1.62±0.07	0.94±0.02	1.93±0.02 ^B	11.0±0.2 ^B	0.79±0.01 ^B	0.343±0.004 ^B
P40	1.47±0.02	2.06±0.03 ^B	96.8±0.6	40.5±1.9 ^B	1.56±0.09	1.01±0.02	1.82±0.02 ^A	10.6±0.2 ^{AB}	0.76±0.01 ^B	0.339±0.004 ^B
P45	1.46±0.02	1.97±0.02 ^A	97.4±0.4	36.0±1.4 ^A	1.54±0.04	0.95±0.02	1.77±0.02 ^A	10.2±0.2 ^A	0.69±0.01 ^A	0.321±0.004 ^A
饲料脂肪水平 Dietary lipid level (%)										
L20	1.46±0.02	2.01±0.02	97.8±0.6	35.9±1.3	1.73±0.07 ^Y	0.96±0.03	1.84±0.02	10.4±0.2	0.75±0.01	0.332±0.004 ^X
L25	1.50±0.02	2.07±0.03	97.8±0.4	38.9±1.5	1.53±0.04 ^{XY}	0.98±0.01	1.82±0.02	10.5±0.2	0.74±0.01	0.328±0.004 ^X
L30	1.47±0.02	2.04±0.04	96.1±0.5	38.8±1.8	1.46±0.05 ^X	0.96±0.02	1.86±0.02	11.0±0.2	0.75±0.01	0.343±0.004 ^Y
双因素方差分析 Two-way ANOVA										
饲料蛋白质水平 Dietary protein level	0.130	0.004	0.722	0.038	0.429	0.074	0.000	0.049	0.000	0.012
饲料脂肪水平 Dietary lipid level	0.237	0.184	0.111	0.149	0.002	0.636	0.083	0.161	0.982	0.014
交互 Interaction	0.643	0.158	0.246	0.001	0.018	0.222	0.247	0.771	0.189	0.247

注: 数据表述为平均值±标准误, 同列数据上标不同字母(a, b等, 根据单因素方差分析结果)代表存在饲料蛋白质和脂肪水平显著交互作用 ($P<0.05$), 同列数据上标不同字母(A, B和C, 根据双因素方差分析结果)代表受饲料蛋白质水平的显著影响 ($P<0.05$), 同列数据上标不同字母(X, Y和Z, 根据双因素方差分析结果)代表受饲料脂肪水平的显著影响 ($P<0.05$); 下同

Note: Values are presented as mean±S.E.. Data in the same column with different superscripts (a, b, ... based on One-way ANOVA) represent that the significant difference is discovered in the interaction ($P<0.05$), those with different superscripts (A, B, and C based on Two-way ANOVA) represent that the significant difference is discovered in the dietary protein level ($P<0.05$), and those with different superscripts (X, Y, and Z based on Two-way ANOVA) represent that the significant difference is discovered in the dietary lipid level ($P<0.05$); The same applies below

肌肉脂肪含量随饲料脂肪水平的增加而增加。此外, 45%饲料蛋白质组肌肉脂肪含量低于其他饲料蛋白质组。40%饲料蛋白质组肌肉糖原含量高于其他饲料蛋白质组。当饲料蛋白质水平 $\leq 40\%$ 时, 肌肉糖原含量随饲料脂肪水平的增加呈现先下降后上升的趋势; 而当饲料蛋白质水平为45%时, 肌肉糖原含量呈现先下降后平稳的趋势。

2.3 血浆生化指标

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟血浆生化指标的影响如表 4 所示。血液中的ALT和GLU水平仅受饲料蛋白质水平的显著影响($P<0.05$), ALT水平随着饲料蛋白质水平的增加呈现先平稳后下降的趋势, GLU水平则呈现先上升后下降的趋势($P<0.05$)。饲料蛋白质和脂肪水平对AST、TP、CHOL、TG、HDL-C和LDL-C均存在显著的交互作用($P<0.05$)。当饲料脂肪水平为20%和30%时, 45%饲料蛋白质组AST、CHOL、HDL-C和LDL-C水平最低; 而当饲料脂肪水平为25%时, 饲料蛋白质水平对这些指标无影响。血浆TP水平在P35L30组最高, 在P45L30组最低。低蛋白质饲料组(35%)血浆

TG水平最高, 且饲料脂肪水平对血浆TG无影响。

2.4 消化酶活性

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟消化酶活性的影响如表 5 所示。饲料中蛋白质和脂肪水平对肠道、幽门垂和胃中的淀粉酶活性均存在显著的交互作用($P<0.05$)。总体而言, 当饲料脂肪水平 $\leq 25\%$ 时, 高蛋白质饲料(45%)能提高肠道、幽门垂和胃中淀粉酶活性; 而当饲料脂肪水平为30%时, 40%饲料蛋白质组肠道、幽门垂和胃中淀粉酶活性最高。饲料中蛋白质和脂肪水平对肠道、幽门垂和胃中的脂肪酶活性均存在显著的交互作用($P<0.05$)。总体而言, 当饲料脂肪水平 $\leq 25\%$ 时, 高蛋白饲料(45%)能提高肠道、幽门垂和胃中脂肪酶活性; 而当饲料脂肪水平为30%时, 40%饲料蛋白质水平组肠道、幽门垂和胃中脂肪酶活性最高。饲料蛋白质水平显著影响幽门垂中的蛋白酶活性($P<0.05$), 45%饲料蛋白质组幽门垂蛋白酶活性显著高于其他饲料蛋白质组($P<0.05$)。饲料中蛋白质和脂肪水平对肠道和胃中的蛋白酶活性存在显著的交互作用($P<0.05$)。总体而言, 45%饲料蛋

表 3 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟肝脏和肌肉成分的影响

Tab. 3 Effects of dietary protein and lipid levels on liver and fillet tissue compositions of triploid rainbow trout

组别Group	肝脏成分Liver composition			肌肉成分Fillet composition		
	蛋白质 Crude protein (mg/g)	脂肪 Crude lipid (mg/g)	糖原 Glycogen (mg/g)	蛋白质 Crude protein (mg/g)	脂肪 Crude lipid (mg/g)	糖原 Glycogen (mg/g)
P35L20	61.7 $\pm$ 1.2 ^b	96.9 $\pm$ 2.5	14.9 $\pm$ 1.4 ^a	219 $\pm$ 1	81.6 $\pm$ 2.0 ^b	0.45 $\pm$ 0.02 ^{bc}
P35L25	63.2 $\pm$ 1.3 ^{bc}	99.4 $\pm$ 2.5	24.9 $\pm$ 0.7 ^d	216 $\pm$ 1	91.0 $\pm$ 1.2 ^{cd}	0.41 $\pm$ 0.02 ^b
P35L30	62.5 $\pm$ 1.2 ^{bc}	91.5 $\pm$ 2.5	19.8 $\pm$ 0.3 ^{bc}	213 $\pm$ 1	107 $\pm$ 2 ^e	0.47 $\pm$ 0.02 ^c
P40L20	52.5 $\pm$ 0.7 ^a	84.4 $\pm$ 3.5	18.1 $\pm$ 2.9 ^{ab}	218 $\pm$ 0	84.0 $\pm$ 2.5 ^{bc}	0.57 $\pm$ 0.02 ^d
P40L25	66.8 $\pm$ 2.1 ^{cd}	75.8 $\pm$ 1.3	18.2 $\pm$ 0.1 ^{ab}	213 $\pm$ 1	98.5 $\pm$ 2.0 ^d	0.48 $\pm$ 0.03 ^c
P40L30	69.6 $\pm$ 2.2 ^d	80.7 $\pm$ 1.7	21.8 $\pm$ 1.0 ^{bcd}	214 $\pm$ 1	95.3 $\pm$ 2.6 ^d	0.76 $\pm$ 0.02 ^e
P45L20	59.0 $\pm$ 1.9 ^b	87.9 $\pm$ 2.4	23.9 $\pm$ 1.4 ^{cd}	218 $\pm$ 2	72.9 $\pm$ 2.7 ^a	0.43 $\pm$ 0.01 ^{bc}
P45L25	69.2 $\pm$ 1.5 ^d	89.7 $\pm$ 3.1	22.5 $\pm$ 0.2 ^{bcd}	219 $\pm$ 1	84.2 $\pm$ 4.7 ^{bc}	0.26 $\pm$ 0.01 ^a
P45L30	75.8 $\pm$ 0.6 ^e	87.4 $\pm$ 2.4	22.7 $\pm$ 0.7 ^{cd}	218 $\pm$ 1	81.2 $\pm$ 2.9 ^b	0.24 $\pm$ 0.01 ^a
饲料蛋白质水平Dietary protein level (%)						
P35	62.4 $\pm$ 0.7 ^A	95.8 $\pm$ 1.6 ^C	19.9 $\pm$ 1.9 ^A	216 $\pm$ 1 ^{AB}	93.1 $\pm$ 2.6 ^B	0.44 $\pm$ 0.01 ^B
P40	63.3 $\pm$ 2.3 ^A	80.1 $\pm$ 1.5 ^A	19.4 $\pm$ 1.1 ^A	215 $\pm$ 1 ^A	92.6 $\pm$ 1.9 ^B	0.59 $\pm$ 0.03 ^C
P45	67.4 $\pm$ 2.1 ^B	88.3 $\pm$ 1.5 ^B	23.0 $\pm$ 0.5 ^B	218 $\pm$ 1 ^B	79.4 $\pm$ 2.2 ^A	0.31 $\pm$ 0.02 ^A
饲料脂肪水平Dietary lipid level (%)						
L20	58.4 $\pm$ 1.3 ^X	90.1 $\pm$ 2.0	19.0 $\pm$ 1.9 ^X	219 $\pm$ 1 ^Y	79.5 $\pm$ 1.7 ^X	0.49 $\pm$ 0.02 ^Y
L25	66.4 $\pm$ 1.1 ^Y	87.7 $\pm$ 2.6	21.9 $\pm$ 1.3 ^Y	216 $\pm$ 1 ^X	91.2 $\pm$ 2.1 ^Y	0.39 $\pm$ 0.02 ^X
L30	68.8 $\pm$ 1.8 ^Y	86.5 $\pm$ 1.6	21.4 $\pm$ 0.6 ^Y	215 $\pm$ 1 ^X	94.4 $\pm$ 2.8 ^Y	0.47 $\pm$ 0.05 ^{XY}
双因素方差分析Two-way ANOVA						
饲料蛋白质水平 Dietary protein level	0.000	0.000	0.014	0.003	0.000	0.000
饲料脂肪水平 Dietary lipid level	0.000	0.277	0.047	0.001	0.000	0.000
交互Interaction	0.000	0.063	0.008	0.082	0.003	0.000

白质组肠道蛋白酶活性较低, 胃中蛋白酶活性较高。P40L30组具有较高的胃和肠道蛋白酶活性。当饲料蛋白质水平 $\leq 40\%$ 时, 胃中的蛋白酶活性随饲料脂肪水平的增加而增加; 但当饲料蛋白质水平为45%时, 高脂饲料(30%)会抑制胃中的蛋白酶活性。

总之, 当饲料脂肪水平 $\leq 25\%$ 时, 高蛋白质饲料(45%)能提高三倍体虹鳟淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶活性, 但当饲料脂肪水平为30%时, 40%饲料蛋白质组具有较高的淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶活性。

2.5 代谢酶活性

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟肝脏蛋白质和脂肪代谢酶活性的影响如表 6 所示。饲料蛋白质和脂肪水平对蛋白质代谢酶的活性存在显著的交互作用($P<0.05$)。当饲料蛋白质水平 $\leq 40\%$ 时, 肝脏GDH酶活性随饲料脂肪水平升高呈现先下降后上升的趋势; 而当饲料蛋白质水平为45%时, GDH酶活性随饲料脂肪水平呈现显著上升的趋势。此外, 低饲料蛋白质组(35%) GDH酶活性最高。P40L20组肝脏ALT和AST活性最高。饲料蛋白质和脂肪水平对脂肪代谢酶的活性存在显著的

交互作用($P<0.05$)。总体而言, 随着饲料脂肪水平的增加, 肝脏HL、LPL和总酯酶活性降低, 然而P40L30组三种酶活性有上升的趋势。在低脂肪水平条件下(20%), 40%和45%蛋白质水平饲料能提高肝脏HL、LPL和总酯酶活性。

2.6 抗氧化能力

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟抗氧化能力的影响如表 7 所示。饲料蛋白质和脂肪水平对血浆中的T-AOC、MDA和PC水平存在显著的交互作用($P<0.05$)。总体而言, 血浆T-AOC水平随着饲料蛋白质水平的增加而下降, 而血浆PC水平随着饲料脂肪水平的增加而下降。血浆MDA水平在不同的饲料蛋白质和脂肪水平下变化不一致。当饲料蛋白质水平为40%时, 血浆T-AOC、MDA和PC水平随饲料脂肪水平的增加而降低。

饲料蛋白质和脂肪水平对肠道T-AOC、MDA和PC水平存在显著的交互作用($P<0.05$)。总体而言, 当饲料蛋白质水平 $\leq 40\%$ 时, 肠道T-AOC水平随饲料脂肪水平呈现先上升后下降的趋势; 当饲料蛋白质水平为45%时, 肠道T-AOC水平在高脂饲料

表 6 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟肝脏代谢酶活性的影响

Tab. 6 Effects of dietary protein and lipid levels on hepatic metabolism enzymes of triploid rainbow trout

组别Group	氨基酸代谢酶Amino acid metabolism enzyme			脂肪代谢酶Lipid metabolism enzyme		
	谷氨酸脱氢酶 GDH (U/mg prot)	谷丙转氨酶 ALT (U/g prot)	谷草转氨酶 AST (U/g prot)	肝酯酶 HL (U/mg prot)	脂蛋白酯酶 LPL (U/mg prot)	总酯酶 TL (U/mg prot)
P35L20	36.5 $\pm$ 0.6 ^g	8.13 $\pm$ 0.75 ^{ab}	16.1 $\pm$ 0.4 ^{abc}	0.69 $\pm$ 0.04 ^b	0.66 $\pm$ 0.02 ^{cd}	1.34 $\pm$ 0.05 ^{cd}
P35L25	23.1 $\pm$ 0.3 ^e	8.86 $\pm$ 1.21 ^{ab}	19.4 $\pm$ 1.7 ^c	0.63 $\pm$ 0.02 ^b	0.56 $\pm$ 0.01 ^{bc}	1.18 $\pm$ 0.03 ^{bc}
P35L30	26.3 $\pm$ 0.4 ^f	7.63 $\pm$ 0.05 ^{ab}	18.9 $\pm$ 0.6 ^{bc}	0.61 $\pm$ 0.03 ^b	0.48 $\pm$ 0.03 ^{ab}	1.09 $\pm$ 0.03 ^b
P40L20	16.3 $\pm$ 0.2 ^c	9.69 $\pm$ 0.42 ^b	23.6 $\pm$ 1.2 ^d	0.81 $\pm$ 0.05 ^c	0.83 $\pm$ 0.06 ^{ef}	1.64 $\pm$ 0.09 ^{ef}
P40L25	13.1 $\pm$ 0.3 ^b	8.62 $\pm$ 0.76 ^{ab}	18.0 $\pm$ 0.6 ^{bc}	0.58 $\pm$ 0.02 ^{ab}	0.72 $\pm$ 0.04 ^{de}	1.30 $\pm$ 0.05 ^{cd}
P40L30	18.4 $\pm$ 0.2 ^d	6.62 $\pm$ 0.43 ^a	14.5 $\pm$ 1.6 ^{ab}	0.61 $\pm$ 0.04 ^b	0.87 $\pm$ 0.06 ^f	1.47 $\pm$ 0.09 ^{de}
P45L20	11.1 $\pm$ 0.4 ^a	8.84 $\pm$ 0.39 ^{ab}	15.6 $\pm$ 2.7 ^{abc}	0.90 $\pm$ 0.04 ^c	0.87 $\pm$ 0.06 ^f	1.78 $\pm$ 0.10 ^f
P45L25	18.9 $\pm$ 0.1 ^d	6.76 $\pm$ 0.25 ^a	16.5 $\pm$ 1.4 ^{abc}	0.66 $\pm$ 0.05 ^b	0.59 $\pm$ 0.03 ^{bcd}	1.25 $\pm$ 0.03 ^{bc}
P45L30	22.7 $\pm$ 0.3 ^e	7.99 $\pm$ 1.03 ^{ab}	12.7 $\pm$ 1.3 ^a	0.48 $\pm$ 0.03 ^a	0.42 $\pm$ 0.05 ^a	0.90 $\pm$ 0.05 ^a
饲料蛋白质水平Dietary protein level (%)						
P35	28.6 $\pm$ 2.0 ^B	8.21 $\pm$ 0.46	18.1 $\pm$ 0.7 ^B	0.64 $\pm$ 0.02	0.56 $\pm$ 0.03 ^A	1.20 $\pm$ 0.04 ^A
P40	15.9 $\pm$ 0.8 ^A	8.31 $\pm$ 0.48	18.7 $\pm$ 1.3 ^B	0.67 $\pm$ 0.04	0.81 $\pm$ 0.03 ^B	1.47 $\pm$ 0.06 ^B
P45	17.6 $\pm$ 1.7 ^A	7.86 $\pm$ 0.43	14.9 $\pm$ 1.1 ^A	0.68 $\pm$ 0.06	0.63 $\pm$ 0.06 ^A	1.31 $\pm$ 0.11 ^{AB}
饲料脂肪水平Dietary lipid level (%)						
L20	21.3 $\pm$ 3.9 ^Y	8.88 $\pm$ 0.34 ^Y	18.4 $\pm$ 1.4	0.80 $\pm$ 0.04 ^Y	0.79 $\pm$ 0.04 ^Y	1.59 $\pm$ 0.07 ^Y
L25	18.4 $\pm$ 1.5 ^X	8.08 $\pm$ 0.52 ^{XY}	18.0 $\pm$ 0.8	0.62 $\pm$ 0.02 ^X	0.62 $\pm$ 0.03 ^X	1.25 $\pm$ 0.02 ^X
L30	22.5 $\pm$ 1.2 ^Z	7.41 $\pm$ 0.38 ^X	15.4 $\pm$ 1.0	0.57 $\pm$ 0.03 ^X	0.59 $\pm$ 0.07 ^X	1.15 $\pm$ 0.08 ^X
双因素方差分析Two-way ANOVA						
饲料蛋白质水平 Dietary protein level	0.000	0.563	0.027	0.585	0.000	0.001
饲料脂肪水平 Dietary lipid level	0.000	0.045	0.055	0.000	0.000	0.000
交互Interaction	0.000	0.040	0.011	0.008	0.002	0.000

组(30%)最高。当饲料脂肪水平 $\leq 25\%$ 时,肠道T-AOC水平在高蛋白质饲料组(45%)最低;当饲料脂肪水平为30%时肠道T-AOC水平不受饲料蛋白质水平的影响。高蛋白质组(45%)肠道MDA水平显著高于其他蛋白质组,而且随饲料脂肪水平的增加而增加,在P45L30组最高。当饲料蛋白质水平为35%和45%时,肠道PC水平随饲料脂肪水平呈现先下降后上升的趋势;而当饲料蛋白质水平为40%时,肠道PC水平随饲料脂肪水平呈现先上升后下降的趋势。肠道PC水平在高蛋白质组(45%)最低,而在低蛋白质组(30%)最高。过高或过低的饲料蛋白质水平可能会对鱼类肠道造成氧化损伤。

饲料蛋白质和脂肪水平对肝脏T-AOC、MDA和PC水平存在显著的交互作用($P<0.05$)。当饲料蛋白质水平为35%时,肝脏T-AOC水平随饲料脂肪水平的增加而增加,而肝脏MDA和PC水平随饲料脂肪水平的增加而降低;当饲料蛋白质水平 $\geq 40\%$ 时,肝脏T-AOC、MDA和PC水平不受饲料脂肪水平的影响。这说明当投喂低蛋白质水平饲料时,提高饲料脂肪水平能提高鱼体抗氧化能力。

2.7 肌肉品质

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟肌肉常规指标和肌肉颜色的影响如表8所示。出肉率不受饲料蛋白质和脂肪水平的影响($P>0.05$)。饲料蛋白质水平显著影响鱼片长指数和肌肉厚度($P<0.05$),随饲料蛋白质水平的增加鱼片长指数和肌肉厚度在高蛋白质组(45%)最低。肌肉颜色各指标存在显著的饲料蛋白质和脂肪水平交互作用($P<0.05$)。当饲料脂肪水平 $\geq 25\%$,高蛋白质饲料(45%)能提高肌肉红色值、 a^* 、 C_{ab}^* 值,降低肌肉 L^* 和 H_{ab}^* 值,而对 b^* 无影响。

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟肉质指标的影响如表9所示。饲料蛋白质水平显著影响肌肉脆性和弹性($P<0.05$),高蛋白质组(45%)肌肉脆性值最高而弹性最低。肌肉硬度、黏附性、咀嚼性和内聚性存在显著的饲料蛋白质和脂肪水平交互作用($P<0.05$)。总体而言,高蛋白质饲料组(45%)具有较高的肌肉硬度、黏附性值,以及最低的肌肉咀嚼性和内聚性值。当饲料蛋白质水平 $\leq 40\%$ 时,肌肉内聚性值随饲料脂肪水平的增加而降低。

表7 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟抗氧化能力的影响

Tab. 7 Effects of dietary protein and lipid levels on antioxidative capacity of triploid rainbow trout

组别 Group	总抗氧化力T-AOC			丙二醛MDA			蛋白质羰基PC		
	血浆 Plasma (mmol/L)	肠道 Intestine (mmol/g prot)	肝脏 Liver (mmol/g prot)	血浆 Plasma (nmol/L)	肠道 Intestine (nmol/g prot)	肝脏Liver (nmol/g prot)	血浆 Plasma (nmol/L)	肠道 Intestine (nmol/g prot)	肝脏Liver (nmol/g prot)
P35L20	1.71 $\pm$ 0.03 ^f	0.32 $\pm$ 0.04 ^{bcd}	0.33 $\pm$ 0.03 ^{ab}	7.48 $\pm$ 0.12 ^{bcd}	9.93 $\pm$ 0.61 ^{abc}	1.19 $\pm$ 0.07 ^c	2.70 $\pm$ 0.15 ^d	33.9 $\pm$ 0.3 ^c	15.3 $\pm$ 0.5 ^{bc}
P35L25	2.05 $\pm$ 0.10 ^g	0.43 $\pm$ 0.05 ^d	0.49 $\pm$ 0.03 ^c	7.18 $\pm$ 0.28 ^{abc}	13.6 $\pm$ 1.2 ^{abc}	0.94 $\pm$ 0.09 ^{bc}	2.15 $\pm$ 0.01 ^c	26.3 $\pm$ 0.8 ^c	13.8 $\pm$ 1.3 ^{abc}
P35L30	1.30 $\pm$ 0.11 ^{de}	0.30 $\pm$ 0.03 ^{bc}	0.63 $\pm$ 0.04 ^d	9.75 $\pm$ 0.26 ^c	7.56 $\pm$ 0.62 ^a	0.59 $\pm$ 0.02 ^a	1.46 $\pm$ 0.02 ^a	31.0 $\pm$ 0.7 ^d	11.2 $\pm$ 0.4 ^a
P40L20	1.51 $\pm$ 0.12 ^{ef}	0.26 $\pm$ 0.05 ^{ab}	0.23 $\pm$ 0.02 ^a	8.99 $\pm$ 1.09 ^{de}	8.98 $\pm$ 0.90 ^{ab}	0.76 $\pm$ 0.05 ^{ab}	2.18 $\pm$ 0.02 ^c	17.8 $\pm$ 0.2 ^b	13.5 $\pm$ 2.0 ^{abc}
P40L25	1.26 $\pm$ 0.15 ^{de}	0.39 $\pm$ 0.05 ^{cd}	0.38 $\pm$ 0.04 ^b	8.07 $\pm$ 0.65 ^{cd}	9.23 $\pm$ 1.07 ^{abc}	0.89 $\pm$ 0.13 ^b	2.04 $\pm$ 0.29 ^{bc}	23.8 $\pm$ 0.6 ^c	12.8 $\pm$ 0.3 ^{ab}
P40L30	1.05 $\pm$ 0.03 ^{cd}	0.28 $\pm$ 0.03 ^{bc}	0.38 $\pm$ 0.06 ^b	6.41 $\pm$ 0.26 ^{ab}	13.0 $\pm$ 3.0 ^{abc}	0.85 $\pm$ 0.14 ^{ab}	1.74 $\pm$ 0.01 ^{abc}	17.0 $\pm$ 1.5 ^b	14.4 $\pm$ 0.2 ^{bc}
P45L20	0.76 $\pm$ 0.03 ^b	0.15 $\pm$ 0.02 ^a	0.32 $\pm$ 0.03 ^{ab}	5.72 $\pm$ 0.26 ^a	14.5 $\pm$ 2.6 ^{bc}	0.97 $\pm$ 0.06 ^{bc}	1.94 $\pm$ 0.19 ^{bc}	15.6 $\pm$ 0.5 ^{ab}	13.5 $\pm$ 0.1 ^{abc}
P45L25	0.46 $\pm$ 0.02 ^a	0.16 $\pm$ 0.01 ^a	0.30 $\pm$ 0.03 ^{ab}	6.42 $\pm$ 0.39 ^{ab}	15.5 $\pm$ 2.5 ^c	1.02 $\pm$ 0.11 ^{bc}	1.87 $\pm$ 0.09 ^{abc}	13.9 $\pm$ 0.8 ^a	16.4 $\pm$ 0.4 ^c
P45L30	0.94 $\pm$ 0.09 ^{bc}	0.34 $\pm$ 0.02 ^{bcd}	0.34 $\pm$ 0.05 ^{ab}	7.04 $\pm$ 0.20 ^{abc}	35.2 $\pm$ 3.4 ^d	0.95 $\pm$ 0.09 ^{bc}	1.64 $\pm$ 0.04 ^{ab}	15.9 $\pm$ 0.9 ^{ab}	15.7 $\pm$ 0.0 ^{bc}
饲料蛋白质水平Dietary protein level (%)									
P35	1.69 $\pm$ 0.10 ^C	0.35 $\pm$ 0.03 ^B	0.49 $\pm$ 0.04 ^B	8.14 $\pm$ 0.37 ^B	10.4 $\pm$ 0.9 ^A	0.91 $\pm$ 0.08 ^{AB}	2.10 $\pm$ 0.23 ^B	30.4 $\pm$ 1.4 ^C	13.4 $\pm$ 0.8
P40	1.28 $\pm$ 0.08 ^B	0.31 $\pm$ 0.03 ^{AB}	0.33 $\pm$ 0.03 ^A	7.83 $\pm$ 0.51 ^B	10.2 $\pm$ 1.0 ^A	0.83 $\pm$ 0.06 ^A	1.99 $\pm$ 0.11 ^{AB}	19.5 $\pm$ 1.4 ^B	13.6 $\pm$ 0.6
P45	0.72 $\pm$ 0.07 ^A	0.23 $\pm$ 0.03 ^A	0.32 $\pm$ 0.02 ^A	6.45 $\pm$ 0.23 ^A	22.4 $\pm$ 3.4 ^B	0.98 $\pm$ 0.05 ^B	1.82 $\pm$ 0.08 ^A	15.1 $\pm$ 0.5 ^A	15.2 $\pm$ 0.6
饲料脂肪水平Dietary lipid level (%)									
L20	1.33 $\pm$ 0.13 ^Y	0.25 $\pm$ 0.03 ^X	0.29 $\pm$ 0.02 ^X	7.55 $\pm$ 0.55	10.8 $\pm$ 1.0 ^X	0.97 $\pm$ 0.06 ^Y	2.27 $\pm$ 0.15 ^Y	22.5 $\pm$ 3.7	14.1 $\pm$ 0.7
L25	1.25 $\pm$ 0.20 ^Y	0.34 $\pm$ 0.04 ^Y	0.40 $\pm$ 0.03 ^Y	7.22 $\pm$ 0.32	12.8 $\pm$ 1.2 ^{XY}	0.95 $\pm$ 0.06 ^Y	2.02 $\pm$ 0.09 ^Y	21.3 $\pm$ 2.4	14.4 $\pm$ 0.8
L30	1.10 $\pm$ 0.06 ^X	0.31 $\pm$ 0.02 ^{XY}	0.45 $\pm$ 0.05 ^Y	7.73 $\pm$ 0.45	19.1 $\pm$ 4.1 ^Y	0.80 $\pm$ 0.07 ^X	1.61 $\pm$ 0.05 ^X	21.3 $\pm$ 3.1	13.8 $\pm$ 0.9
双因素方差分析Two-way ANOVA									
饲料蛋白质水平 Dietary protein level	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.039	0.070	0.000	0.054
饲料脂肪水平 Dietary lipid level	0.025	0.038	0.000	0.398	0.000	0.004	0.001	0.170	0.710
交互Interaction	0.000	0.006	0.017	0.001	0.000	0.005	0.045	0.000	0.023

表 8 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟肌肉常规指标和肌肉颜色的影响

Tab. 8 Effects of dietary protein and lipid levels on fillet biometrical parameters and color of triploid rainbow trout

组别 Group	肌肉常规指标Fillet biometrical parameter			肌肉肉色Fillet color				
	出肉率FY (%)	鱼片长指数RFL	肌肉厚度FT (mm)	亮度值L*	红色值a*	黄色值b*	色度值C _{ab} *	色调角H _{ab} °
P35L20	62.4±0.8	0.765±0.004	25.7±0.8	46.3±1.0 ^c	16.3±0.3 ^c	22.9±0.3 ^c	28.2±0.4 ^d	54.6±0.6 ^c
P35L25	65.2±0.3	0.759±0.004	26.8±0.8	46.0±0.9 ^{de}	14.3±0.4 ^b	21.0±0.2 ^d	25.4±0.4 ^c	55.2±0.7 ^c
P35L30	65.2±0.5	0.749±0.004	25.6±0.9	44.2±1.1 ^{cde}	14.0±0.3 ^b	18.0±0.4 ^b	22.7±0.5 ^{ab}	52.7±0.5 ^b
P40L20	63.4±2.5	0.748±0.004	26.7±0.9	41.6±1.0 ^{abc}	13.1±0.2 ^a	16.9±0.3 ^a	21.5±0.3 ^a	51.6±0.6 ^b
P40L25	64.9±0.6	0.757±0.004	25.7±0.9	46.2±1.1 ^c	12.8±0.2 ^a	19.3±0.4 ^c	23.2±0.4 ^b	56.1±0.6 ^c
P40L30	64.2±0.4	0.752±0.006	25.6±1.0	43.2±1.1 ^{bcd}	14.2±0.2 ^b	18.4±0.4 ^{bc}	23.1±0.5 ^b	52.2±0.5 ^b
P45L20	62.9±0.8	0.747±0.004	23.8±1.0	42.4±0.8 ^{abc}	17.0±0.3 ^{cd}	21.4±0.3 ^d	27.4±0.4 ^d	51.3±0.5 ^b
P45L25	62.4±0.4	0.736±0.005	24.9±1.0	40.5±0.9 ^{ab}	17.0±0.3 ^{cd}	19.5±0.5 ^c	25.8±0.7 ^c	48.2±0.7 ^a
P45L30	62.9±0.4	0.732±0.004	25.0±1.0	40.2±0.7 ^a	17.3±0.2 ^d	19.4±0.4 ^c	25.9±0.5 ^c	48.4±0.5 ^a
饲料蛋白质水平Dietary protein level (%)								
P35	64.3±0.4	0.757±0.002 ^B	26.0±0.5 ^B	45.5±0.6 ^C	14.9±0.2 ^B	20.6±0.3 ^B	25.4±0.3 ^B	54.2±0.4 ^B
P40	64.2±0.8	0.752±0.003 ^B	26.0±0.5 ^B	43.7±0.6 ^B	13.4±0.1 ^A	18.2±0.2 ^A	22.6±0.3 ^A	53.3±0.4 ^B
P45	62.7±0.3	0.738±0.002 ^A	24.6±0.6 ^A	41.1±0.5 ^A	17.1±0.2 ^C	20.1±0.3 ^B	26.4±0.3 ^C	49.3±0.4 ^A
饲料脂肪水平Dietary lipid level (%)								
L20	62.9±0.9	0.753±0.002	25.4±0.6	43.5±0.6	15.5±0.2 ^Y	20.3±0.3 ^Y	25.6±0.4 ^Y	52.5±0.4 ^Y
L25	64.2±0.3	0.750±0.003	25.8±0.5	44.2±0.6	14.7±0.3 ^X	19.9±0.2 ^Y	24.8±0.3 ^{XY}	53.3±0.5 ^Y
L30	64.1±0.3	0.745±0.003	25.4±0.6	42.5±0.6	15.1±0.2 ^{XY}	18.6±0.2 ^X	24.0±0.3 ^X	51.1±0.4 ^X
双因素方差分析Two-way ANOVA								
饲料蛋白质水平 Dietary protein level	0.325	0.000	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
饲料脂肪水平 Dietary lipid level	0.188	0.079	0.715	0.194	0.001	0.000	0.000	0.000
交互Interaction	0.906	0.571	0.353	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000

表 9 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟肌肉肉质的影响

Tab. 9 Effects of dietary protein and lipid levels on fillet texture of triploid rainbow trout

组别 Group	脆性 Fracturability (N)	硬度 Hardness (N)	黏附性 Adhesiveness (mJ)	弹性 Springiness (mm)	咀嚼性 Chewiness (mJ)	内聚性 Cohesiveness
P35L20	6.26±0.18	7.65±0.11 ^b	2.29±0.19 ^a	12.6±0.4	23.8±0.7 ^c	0.255±0.005 ^c
P35L25	6.27±0.13	7.35±0.15 ^b	2.69±0.18 ^{ab}	13.3±0.4	24.3±0.6 ^c	0.250±0.003 ^{de}
P35L30	5.66±0.17	7.58±0.18 ^b	2.61±0.18 ^{ab}	12.4±0.5	21.7±0.7 ^d	0.238±0.005 ^{cd}
P40L20	6.08±0.14	7.35±0.14 ^b	3.04±0.18 ^{bc}	13.6±0.5	23.3±0.8 ^{de}	0.246±0.004 ^{de}
P40L25	5.63±0.12	6.68±0.09 ^a	2.22±0.14 ^a	12.2±0.5	18.5±0.6 ^c	0.229±0.003 ^c
P40L30	5.73±0.14	7.19±0.14 ^b	3.51±0.14 ^c	11.6±0.6	17.3±0.8 ^{bc}	0.215±0.004 ^b
P45L20	6.22±0.25	7.43±0.12 ^b	5.25±0.19 ^d	8.18±0.57	12.2±0.6 ^a	0.200±0.003 ^a
P45L25	6.06±0.20	8.23±0.23 ^c	6.17±0.19 ^c	9.11±0.58	13.6±0.5 ^a	0.199±0.003 ^a
P45L30	6.38±0.26	8.25±0.19 ^c	6.91±0.22 ^f	8.99±0.52	15.6±0.6 ^b	0.209±0.004 ^{ab}
饲料蛋白质水平Dietary protein level (%)						
P35	6.06±0.10 ^{AB}	7.52±0.09 ^B	2.53±0.11 ^A	12.8±0.3 ^B	23.3±0.4 ^C	0.248±0.003 ^C
P40	5.81±0.08 ^A	7.07±0.08 ^A	2.94±0.11 ^B	12.4±0.3 ^B	19.3±0.5 ^B	0.230±0.003 ^B
P45	6.20±0.13 ^B	7.97±0.11 ^C	6.11±0.14 ^C	8.77±0.32 ^A	13.8±0.4 ^A	0.203±0.002 ^A
饲料脂肪水平Dietary lipid level (%)						
L20	6.18±0.11	7.47±0.07	3.50±0.18 ^X	11.5±0.4	19.4±0.8	0.234±0.004 ^Y
L25	5.98±0.10	7.42±0.12	3.69±0.22 ^{XY}	11.5±0.4	18.3±0.6	0.226±0.003 ^{XY}
L30	5.87±0.11	7.66±0.11	4.28±0.23 ^Y	11.0±0.4	18.1±0.5	0.221±0.003 ^X
双因素方差分析Two-way ANOVA						
饲料蛋白质水平 Dietary protein level	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
饲料脂肪水平 Dietary lipid level	0.174	0.118	0.000	0.694	0.130	0.001
交互Interaction	0.080	0.000	0.000	0.538	0.000	0.000

饲料蛋白质水平和脂肪水平对三倍体虹鳟肌肉气味即活性挥发性化合物的影响如表 10 所示。通过计算气味活度值, 筛选出三倍体虹鳟肌肉中气味活性化合物共 19 种, 包括 2 种醇类、3 种酮类、12 种醛类和 2 种其他类化合物。饲料蛋白质和脂肪水平对气味活性物质总浓度, 以及 n-3 系脂肪酸、n-6 系脂肪酸和 n-9 系脂肪酸降解物质浓度无显著影响 ($P>0.05$)。投喂 $\geq 40\%$ 蛋白质水平的饲料能显著提高肌肉 1-庚醇和 1-辛烯-3-醇含量, 降低 2,3-戊二酮含量 ($P<0.05$)。饲料脂肪水平显著影响肌肉 2,3-戊二酮、2,3-辛二酮和 (*E,E*)-2,4-庚二烯醛含量, 且在 25% 饲料脂肪水平组最高 ($P<0.05$)。饲料蛋白质和脂肪水平对肌肉 3,5-辛二烯-2-酮和十一醛含量存

在显著的交互作用 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟生长的影响

饲料蛋白质含量是影响养殖鱼类生长性能的关键因素^[13]。前期研究表明以增重率为评价指标, 三倍体虹鳟 (0.1—1.0 kg 生长阶段) 的饲料蛋白质需要量为 45.8% 干物质^[2]。而本研究针对 1.5—2.5 kg 生长阶段的三倍体虹鳟发现, 适宜饲料蛋白质水平为 40% 干物质。随着鱼体规格的增加饲料蛋白质需要量降低的现象在其他鱼类中也见报道^[14]。然而, 针对体重 3.0 kg 以上三倍体虹鳟, 从 40% 进一步

表 10 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟肌肉气味活性物质的影响

Tab. 10 Effects of dietary protein and lipid levels on fillet odor active compounds of triploid rainbow trout

气味物质 odor Compounds	组别 Group									双因素方差分析 Two-way assay		
	P35L20	P35L25	P35L30	P40L20	P40L25	P40L30	P45L20	P45L25	P45L30	P	L	P×L
1-庚醇 1-Heptanol	31.9±6.4	26.7±2.7	34.1±3.9	45.8±5.2	52.6±7.4	46.4±5.4	42.5±3.4	36.0±5.3	46.8±2.7	0.000	0.690	0.545
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	122±20	116±11	114±14	149±20	171±36	178±24	175±16	146±24	176±12	0.006	0.837	0.819
2, 3-戊二酮 2, 3-Pentanedione	80.3±18.5	109±12	85.9±11.7	54.6±8.6	93.2±12.8	80.2±11.0	49.0±5.1	72.7±8.3	66.7±4.3	0.034	0.005	0.858
2, 3-辛二酮 2, 3-Octanedione	84.9±17.5	100±13	74.8±8.7	55.1±4.9	110±18	70.9±6.4	51.1±4.1	100±11	79.3±6.4	0.665	0.000	0.274
3, 5-辛二烯-2-酮 3, 5-Octadien-2-one	116±25 ^a	227±42 ^b	188±40 ^{ab}	114±19 ^a	108±19 ^a	137±14 ^a	159±13 ^{ab}	148±21 ^a	128±9 ^a	0.014	0.303	0.042
己醛 Hexanal	539±94	504±51	433±49	506±66	612±110	550±72	536±53	423±57	449±27	0.282	0.667	0.596
(<i>E</i>)-2-己烯醛 (<i>E</i>)-2-Hexenal	16.3±3.4	20.0±2.4	19.3±2.2	18.7±1.8	21.5±2.0	25.8±3.7	21.2±1.3	14.1±1.8	19.2±1.4	0.087	0.254	0.115
庚醛 Heptanal	75.4±13.2	88.0±10.1	70.7±8.6	81.8±8.2	100±15	86.9±9.0	72.4±6.5	68.9±6.9	75.1±2.9	0.218	0.663	0.952
(<i>Z</i>)-2-庚烯醛 (<i>Z</i>)-2-Heptadienal	54.6±12.3	51.0±4.8	81.6±16.6	65.9±5.7	55.9±7.5	64.7±8.1	59.5±4.5	50.3±7.2	64.8±4.1	0.926	0.095	0.556
辛醛 Octanal	81.7±15.3	112±12	111±13	111±9	118±14	113±11	101±9	101±11	109±4	0.347	0.194	0.792
(<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛 (<i>E,E</i>)-2,4-Heptadienal	15.8±4.4	25.4±4.8	19.3±2.2	14.7±1.7	24.0±2.9	24.0±3.4	18.0±1.0	15.5±2.3	16.9±1.7	0.218	0.041	0.136
(<i>E</i>)-2-辛烯醛 (<i>E</i>)-2-Octenal	18.3±4.5	23.6±3.1	20.1±2.7	17.2±1.7	20.6±2.3	21.6±2.5	19.3±1.8	15.8±2.1	18.7±1.5	0.689	0.721	0.756
壬醛 Nonanal	115±23	180±21	138±26	131±16	151±21	126±19	132±21	143±14	162±10	0.665	0.209	0.617
(<i>E,Z</i>)-2,6-壬二醛 (<i>E,Z</i>)-2,6-Nonadienal	16.4±4.1	24.3±3.8	19.9±2.6	15.2±1.3	15.5±1.9	18.3±2.5	18.0±2.1	14.7±2.1	19.9±2.0	0.282	0.460	0.252
(<i>E</i>)-2-壬烯醛 (<i>E</i>)-2-Nonenal	11.3±2.7	15.9±2.1	8.60±1.07	7.55±0.71	9.72±1.39	9.51±1.11	9.62±1.77	9.02±0.95	11.5±1.2	0.120	0.235	0.072
癸醛 Decanal	13.8±3.2	23.3±2.4	21.0±4.7	17.0±1.8	16.7±1.8	13.6±1.6	14.3±1.9	15.0±1.5	19.4±1.1	0.277	0.241	0.144
十一醛 Undecanal	8.43±1.49 ^a	23.8±2.9 ^{cd}	20.4±4.1 ^{bcd}	19.0±2.1 ^{bcd}	17.5±1.9 ^{bc}	15.4±2.2 ^b	16.3±2.3 ^{bc}	19.0±1.1 ^{bcd}	26.2±2.0 ^d	0.097	0.014	0.001
2-乙基-呋喃 2-Ethy-furan	13.2±2.4	17.3±2.5	18.3±3.4	12.7±1.3	15.1±1.9	15.8±2.0	12.8±1.0	13.1±1.4	13.0±0.8	0.129	0.093	0.772
2-戊基-呋喃 2-Pentyl-furan	6.65±1.36	10.1±1.4	7.69±1.06	7.45±0.77	7.09±1.07	7.24±0.65	7.19±0.88	6.35±1.00	6.85±0.48	0.362	0.511	0.331
总计 Total	1420±256	1694±173	1467±182	1443±146	1720±288	1624±193	1514±123	1395±176	1508±74	0.837	0.484	0.918
Σn-3降解产物 Σn-3 derived	232±50	375±65	344±55	241±26	235±31	286±32	288±20	265±32	261±12	0.127	0.321	0.156
Σn-6降解产物 Σn-6 derived	772±132	752±79	648±81	768±95	929±183	854±105	820±75	669±91	737±43	0.281	0.848	0.696
Σn-9降解产物 Σn-9 derived	318±59	430±41	373±51	387±37	438±55	386±41	362±40	364±38	413±18	0.715	0.320	0.833

降低饲料蛋白质水平会抑制生长^[4]。因此, 体重在 1.5 kg 以上的三倍体虹鳟养殖饲料中蛋白质含量建议值为 40% 干物质。本研究发现高脂饲料对三倍体虹鳟生长无负面影响, 可能的原因是三倍体虹鳟通过将脂肪沉积在腹腔脂肪组织和肌肉组织及上调脂肪分解能力来应对高脂饲料, 进而避免了脂肪肝的发生^[7, 8]。

3.2 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟饲料利用的影响

养殖鱼类的生长与饲料利用率密切相关。本研究虽然采用表观饱食投喂的方式, 但三倍体虹鳟摄食率(FI)不受饲料蛋白质和脂肪水平的影响, 这与在体重 3.0 kg 以上的三倍体虹鳟研究结果类似^[4], 说明规格较大的三倍体虹鳟摄食凶猛, 不挑食。然而, 饲料系数在各处理组存在显著差异, 总体而言低蛋白和低脂肪饲料因为营养不全面导致饲料系数高。鱼类对饲料的利用能力很大程度上取决于自身消化能力^[15], 在其他鱼类中的研究发现随着饲料蛋白质和脂肪水平的增加, 消化酶活性增加^[13, 16]。在本研究中总体趋势类似, 但高蛋白质和高脂肪组(P45L30)消化酶活性降低, 可能的原因与营养负荷高导致肠道氧化应激有关(本研究中肠道MDA含量)。

3.3 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟生理代谢的影响

本团队前期研究表明高蛋白质饲料能降低脂肪在三倍体虹鳟内脏中的沉积^[2, 4]。在本研究中根据VSI和HSI值、肝脏脂肪含量及血浆中脂质代谢相关指标数据, 再次得以证实。高蛋白质饲料降低三倍体虹鳟内脏脂肪含量的原因可能与高蛋白质饲料促进脂肪分解代谢有关, LPL和总酯酶在鱼类肝脏脂质分解过程中发挥重要作用^[17], 在本研究中同时发现该酶活性在低饲料蛋白质组最低。根据反应肝损伤的血浆ALT和AST水平^[18], 本研究发现高蛋白质饲料因具有减少内脏脂肪沉积的作用, 促进了肝脏健康。此外, 高脂肪饲料在其他鱼类中的研究表明能诱导鱼类内脏脂肪沉积并导致肝脏氧化应激^[13, 19], 而这种现象在本研究中没有发现, 主要原因是三倍体虹鳟将饲料中的脂肪含量沉积在肌肉而非肝脏^[8]。综合本团队在三倍体虹鳟脂肪沉积的相关研究, 发现一个有意思的结果, 在体重 2.5 kg 以下的三倍体虹鳟内脏大小不受饲料脂肪水平的影响, 但随着体格的进一步增大要注意高脂肪饲料导致的内脏脂肪沉积^[4]。虽然, 本研究中高脂肪饲料不会导致肝脏氧化应激, 但高蛋白质高脂肪组(P45L30组)肠道MDA水平是其他处理组的2倍以上, 说明该饲料会诱发三倍体虹鳟肠道氧化损伤,

可能的原因是高蛋白质和高脂肪的摄入增加了鱼类肠道的负荷进而引发了氧化损伤, 另外本实验中主要以易氧化的鱼粉和鱼油为主要原料, 饲料中过多的油脂氧化会造成鱼类肠道的氧化应激和损伤^[20]。

3.4 饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟品质的影响

鱼肉是消费者食用的主要成分^[21]。因此, 本研究重点分析了饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟感官品质的影响。鱼肉表观品质是最直接的感官特征, 直接影响到鱼类的经济价值和消费者的购买欲望, 包括肉色和形体指标^[22]。其中肉色和“大理石”纹理是鲑科鱼类品质最重要的属性^[23], 肉色越红越均匀意味着品质越高^[9]。在本研究发现饲料蛋白质和脂肪水平对肌肉红色值存在显著的交互作用, 在P45L30组最高, 类似的结果在体重 3.0 kg 以上的三倍体虹鳟研究中发现^[4]。本实验饲料中添加了 40 mg/L 的虾青素, 高蛋白质和高脂肪饲料提高鱼肉红色值可能与其利于虾青素在肌肉中的沉积有关, 具体机制需进一步研究。肉质是影响鱼肉适口性的关键指标^[24], 在本研究发现饲料脂肪水平对肌肉主要肉质特性无明显影响, 然而高蛋白质饲料虽然能提高肌肉硬度, 但同时提高了脆性和降低了弹性。在虹鳟肉质研究中表明脆性的增加和弹性的降低意味着口感的下降^[24]。高蛋白质饲料导致虹鳟肉质下降的原因可能和肌肉形体指标有关, 在本实验中发现高蛋白质饲料会导致肌肉厚度和鱼片长指数降低。挥发性气味物质是鱼肉重要的风味指标^[23], 本研究根据气味活度值^[25], 共检测出三倍体虹鳟肌肉中的气味活性化合物共 19 种, 比体重 1.0 kg 以下的三倍体虹鳟肌肉多 4 种^[9], 比体重 3.0 kg 以上的三倍体虹鳟肌肉少 1 种^[4], 意味着三倍体虹鳟随着体重的增加, 肌肉气味更丰富。在本研究中除了少数气味活性物质, 总体肌肉气味不受饲料蛋白质和脂肪水平的影响。

4 结论

本研究评估了饲料蛋白质和脂肪水平对三倍体虹鳟生长性能、生理代谢和感官品质的影响。根据生长指标, 体重在 1.5—2.5 kg 生长阶段的三倍体虹鳟养殖饲料中适宜的蛋白质水平为 40%, 脂肪水平为 $\geq 25\%$; 根据饲料利用指标, 适宜的蛋白质水平为 40%, 脂肪水平为 $\geq 30\%$; 根据感官品质指标, 适宜的蛋白质水平为 40%, 脂肪水平 $\geq 20\%$ 对感官品质无影响。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2023 China Fishery Statistical Year Book [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023: 25. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2023中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2023: 25.]
- [2] 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.
- [3] Han B Y, Meng Y Q, Liu X H, *et al.* Effect of dietary protein levels on growth and intestinal histological morphology of triploid rainbow trout [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2020, **33**(1): 1-7. [韩步鹰, 孟玉琼, 刘小红, 等. 饲料蛋白质水平对三倍体虹鳟生长和肠道组织形态的影响 [J]. 水产学杂志, 2020, **33**(1): 1-7.]
- [4] Cao S, Guan L, Li C, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth, metabolism, antioxidative capacity, and fillet quality of adult triploid rainbow trout farmed in net cage [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2023(2023): 4733343.
- [5] Gao W, Liu Y, Tian L, *et al.* Protein-sparing capability of dietary lipid in herbivorous and omnivorous freshwater finfish: a comparative case study on grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) and tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, **17**(1): 2-12.
- [6] Meng Y, Qian K, Ma R, *et al.* Effects of dietary lipid levels on sub-adult triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): 1. Growth performance, digestive ability, health status and expression of growth-related genes [J]. *Aquaculture*, 2019(513): 734394.
- [7] Meng Y, Tian H, Hu X, *et al.* Effects of dietary lipid levels on the lipid deposition and metabolism of subadult triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2022(2022): 6924835.
- [8] Liu G, Chen L, Tian H, *et al.* Adult triploid rainbow trout can adapt to various dietary lipid levels by coordinating metabolism in different tissues [J]. *Metabolites*, 2023, **13**(3): 396.
- [9] Meng Y, Liu X, Guan L, *et al.* Does dietary lipid level affect the quality of triploid rainbow trout and how should it be assessed [J]? *Foods*, 2022, **12**(1): 15.
- [10] Horwitz W. Official Methods of Analysis of AOAC International [M]. 17th edition, Gaithersburg (Maryland). Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International, 2005: 1-44.
- [11] Folch J, Lees M, Sloane-Stanley G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1957, **226**(1): 497-509.
- [12] Xu H, Bi Q, Meng X, *et al.* Response of lipid and fatty acid composition of turbot to starvation under different dietary lipid levels in the previous feeding period [J]. *Food Research International*, 2022(151): 110905.
- [13] Zhangyao 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.]
- [14] National Research Council of the American Academy of Sciences. Nutrient Requirement of Fish and Shrimp [M]. Beijing: Science Press. 2015: 75-77. [美国科学院国家研究委员会. 鱼类与甲壳类营养需要 [M]. 北京: 科学出版社. 2015: 75-77.]
- [15] Meng Y, Han B, Li C, *et al.* Digestive characteristics and blood chemistry profile of triploid rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*: influence of body size and seasonal variation [J]. *Fisheries Science*, 2019, **85**(6): 1001-1010.
- [16] 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.
- [17] Meng Y, Li C, Qin Q, *et al.* Dietary lipid levels affect the growth performance, lipid deposition, and antioxidative capacity of juvenile scaleless carp, *Gymnocypris przewalskii*, on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2018, **49**(4): 788-797.
- [18] Xu Z, Zhang P, Chang Q, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth performance, muscle composition, immunity index and biochemical index of the greenfin horse-faced filefish (*Thamnaconus septentrionalis*) juvenile [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2021, **20**(5): 1245-1252.
- [19] Chen Y, Yang H, Guo B, *et al.* Dietary effects of protein and lipid levels on growth performance and flesh quality of large-size largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2023(33): 101852.
- [20] Chen Y J, Lin S M, Luo L, *et al.* Detrimental effects of dietary oil oxidation on growth and health status of fish [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(3): 624-633. [陈拥军, 林仕梅, 罗莉, 等. 饲料油脂氧化对养殖鱼类生长及健康的危害 [J]. 水生生物学报, 2016, **40**(3): 624-633.]
- [21] 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): 175-188.
- [22] Zhuo L Y, Guan L L, Bao S M, *et al.* Comparison of

- sensory quality between diploid and triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) muscles [J]. *Food Science*, 2022, **43**(18): 209-215. [卓琳莹, 管玲玲, 鲍守民, 等. 二、三倍体虹鳟肌肉感官品质差异的对比分析 [J]. 食品科学, 2022, **43**(18): 209-215.]
- [23] Guan L L, Liu X H, Tian H N, *et al.* Fillet quality difference of triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) cultured under different modes [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(7): 1016-1028. [管玲玲, 刘小红, 田海宁等. 不同养殖模式下三倍体虹鳟鱼肉品质差异的研究 [J]. 水生生物学报, 2022, **46**(7): 1016-1028.]
- [24] Guan L, Zhuo L, Tian H, *et al.* Canola oil substitution doesn't affect growth but alters fillet quality of triploid rainbow trout [J]. *Aquaculture*, 2023(569): 739385.
- [25] Ma R, Liu X, Tian H, *et al.* Odor-active volatile compounds profile of triploid rainbow trout with different marketable sizes [J]. *Aquaculture Reports*, 2020(17): 100312.

DIETARY PROTEIN AND LIPID LEVELS ON GROWTH, PHYSIOLOGICAL METABOLISM AND ORGANOLEPTIC QUALITY OF TRIPLOID RAINBOW TROUT

CHEN Li-Xia^{1,2}, CAO Song-Jing^{1,2}, MENG Yu-Qiong^{1,2}, SUN Guo-Liang^{1,3}, LI Chang-Zhong^{1,2} and MA Rui^{1,3}

(1. Key Laboratory of Plateau Cold-Water Fish Culture and Eco-Environmental Conservation (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. College of Ecological Environmental Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The study was conducted to estimate the effects of dietary protein and lipid levels on the growth performance, physiological metabolism, and organoleptic quality of triploid rainbow trout weighting 1.5 kg. Nine diets were formulated with three levels of dietary protein (P) (35%, 40%, and 45%) and three levels of lipid (L) (20%, 25%, and 30%) using a 3×3 factorial design. In freshwater cages, 13500 adult female triploid rainbow trout (1.5 kg) were cultured for 8 weeks. Triplicate cages (500 fish per cage) were used as repetitions of each experimental diet. Results showed that the P40L25 and P40L30 groups exhibited the highest weight gain rate, and P40L30 groups showed the lowest feed conversion ratio. High protein diet (45%) reduced lipid deposition in the viscera and promoted liver health, evidenced by lower viscerosomatic and hepatosomatic indices, decreased hepatic lipid content, and favorable plasma lipid profiles, along with higher hepatic lipoprotein lipase and total lipase activities. Additionally, a high lipid diet (30%) could increase fillet lipid content but not hepatic lipid content and enhanced liver antioxidative capacity. However, the group fed a diet with 45% protein and 30% lipid exhibited oxidative damage in the intestine, resulting in reduced digestion efficiency and subsequent decreases in growth and feed utilization. In addition, this group had the highest fillet redness value. Dietary lipid level did not affect fillet texture and odor, while high protein diet (45%) compromised fillet texture, characterized by higher fracturability and lower springiness. In total, for triploid rainbow trout weighting from 1.5—2.5 kg, the recommended P and L level based on growth performance was 40% and ≥25%, P and L based on feed utilization was 40% and ≥30%, P and L based on organoleptic quality was 40% and ≥25%, respectively. These results provide a basis for the establishment of a nutritional database and the development of an efficient and environmentally diet for triploid rainbow trout.

Key words: Growth; Physiology; Quality; Nutrition; Triploid rainbow trout