

Tang L, Jia L Y, Sun J, *et al.* Dietary soybean meal with chorella on growth performance, muscle quality, and intestinal flora of mirror carp (*Cyprinus carpio* var. *specularis*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(8): 082604. [唐黎, 贾璐瑶, 孙健, 等. 小球藻替代豆粕对框鳞镜鲤生长性能、肌肉品质及肠道菌群的影响 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(8): 082604.]

小球藻替代豆粕对框鳞镜鲤生长性能、肌肉品质及肠道菌群的影响

唐黎 贾璐瑶 孙健 吉红 于海波* 李汉东*

(西北农林科技大学动物科技学院, 杨凌 712100)

摘要: 为探究小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤生长性能、肌肉品质及肠道菌群的影响, 用小球藻分别替代饲料中0%、25%、50%、75%和100%的豆粕配制了5种等氮等脂饲料, 分别命名CV0 (对照组)、CV25、CV50、CV75和CV100, 并在水泥池网箱中饲喂初始体重为(20.00±0.01) g的框鳞镜鲤60d。研究表明, 与对照组相比, CV50和CV75组鱼体的末重, CV50、CV75和CV100组鱼体增重率, CV25、CV50、CV75和CV100组鱼体特定生长率和脂肪沉积率, 以及CV25、CV50和CV75组鱼体的蛋白沉积率均显著升高($P<0.05$)。CV50组鱼体肠道的 α -淀粉酶、胰蛋白酶和脂肪酶活性显著高于对照组($P<0.05$); 同时, CV25和CV50组鱼体肠道绒毛高度和肌层厚度也显著升高($P<0.05$)。小球藻替代饲料中50%的豆粕, 可显著提升肝脏和肠道T-AOC水平和SOD活性($P<0.05$), 也显著降低了肝脏MDA含量($P<0.05$)。CV25和CV50处理组肠道CAT活力显著提高($P<0.05$)。与对照组相比, CV50组血清碱性磷酸酶含量显著升高, 而血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶含量显著降低($P<0.05$); CV100组鱼体的肝脏和肾脏组织表现出病理损伤。在肌肉品质方面, 小球藻替代50%豆粕可通过提高全鱼和肌肉的粗蛋白、粗脂肪含量, 以及肌肉NEAA、EAA和PUFA含量来提升鱼体的营养价值($P<0.05$)。在肌肉质构特性主成分分析中, CV50处理组肌肉质构特性明显优于其他处理组, 表明小球藻替代50%豆粕可提升肌肉质构特性。此外, 小球藻替代50%、75%和100%的豆粕, 可提高肌肉红度和黄度($P<0.05$)。小球藻替代50%豆粕增加了鱼体肠道中变形菌门、疣微菌门等优势菌群的相对丰度。基于生长性能的二次回归分析表明, 小球藻替代豆粕的最适水平为58.14%—70.54%。综上, 小球藻完全替代豆粕对框鳞镜鲤的生长性能无负面影响, 但会造成肝脏和肾脏组织损伤; 小球藻替代适量豆粕则会促进框鳞镜鲤生长, 提升鱼体的健康状况和肌肉品质, 改善肠道菌群结构, 而小球藻替代豆粕的最适水平为58.14%—70.54%。

关键词: 豆粕; 小球藻; 新型蛋白源; 生长性能; 肌肉品质; 肠道菌群; 框鳞镜鲤

中图分类号: S965.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)08-082604-18

doi: 10.3724/1000-3207.2026.2026.0128 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2026.0128



全球水产养殖的快速扩张推动了对水产饲料需求的急剧增长。而饲料成本通常占水产养殖成本的50%—70%, 其中蛋白质原料成本占比一度超过60%。因此, 探索既经济高效又环保的可持续蛋白源已成为一个关键的研究热点。而豆粕因其蛋白质含量高、均衡的氨基酸组成和良好的适口性, 一直是水产饲料中重要的植物蛋白^[1]。但豆粕中的抗营养因子, 如胰蛋白酶抑制剂、植酸、植物凝集

素等, 也限制了其在水产饲料中的添加量^[2]。除此之外, 我国的豆粕高度依赖进口, 据统计, 2025年我国大豆进口量创历史新高, 达11183.3万吨, 对外依存度超过80%, 成为我国受制于人的“卡脖子”隐患。与此同时, 大豆也是我国居民重要的食物蛋白来源, 而豆粕的饲料消耗也将严重威胁我国的粮食安全。以上这些因素凸显了豆粕在实现水产饲料发展的长期可持续目标方面的不足。因此, 寻找豆

收稿日期: 2026-04-08; 修订日期: 2026-04-16

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2402000)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2023YFD2402000)]

作者简介: 唐黎(1989—), 女, 硕士研究生; 主要从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: 3672193572@qq.com

通信作者: 于海波(1987—), 男, 副教授; E-mail: yuhaiboper@nwsuaf.edu.cn 李汉东(1991—), 男, 助理研究员; E-mail: 635725034@qq.com *共同通信作者

粕的替代蛋白源对于保障我国粮食安全和促进我国水产养殖业可持续发展至关重要。

微藻资源因其蛋白质含量丰富、氨基酸组成均衡、富含多种生物活性物质, 被视为一类极具潜力的功能性饲料蛋白资源^[3]。小球藻(*Chlorella*)作为微藻资源的一种, 不仅蛋白含量高, 还含有鱼类生长所必需的多种多不饱和脂肪酸, 并且其还具有易于人工培养、生长快、生产周期短、不占用耕地等优点, 生产过程不受季节限制, 可实现全年稳定生产, 且能利用废弃物资源, 降低碳排放, 符合可持续发展要求^[4]。在营养价值和促进养殖动物健康方面展现出巨大的优势, 其在水产饲料中的应用研究也日益受到关注^[5]。

框鳞镜鲤(*Cyprinus carpio* var. *specularis*), 凭借其具有的生长周期短、抗病力强、饲料转化率高、肉质鲜美等特点^[6]。目前已在我国成功推广养殖, 并受到了养殖户和消费者的喜爱^[6]。框鳞镜鲤虽是杂食性鱼类, 但其配合饲料中的鱼粉含量较少, 而主要使用豆粕作为蛋白源。然而, 现有研究大多聚焦于小球藻在替代鱼粉方面的应用潜力评估, 关于其在替代豆粕方面的资料却十分有限。其次, 如前文所述, 豆粕已成为我国受制于人的“卡脖子”短板, 因此, 评估小球藻作为豆粕替代蛋白源应用于水产饲料, 对保障国家粮食安全、降低豆粕进口依赖、推动水产养殖业高质量发展十分必要。此外, 目前有关小球藻在替代框鳞镜鲤饲料豆粕应用潜力评估的研究也尚未见报道。因此, 本研究以框鳞镜鲤为研究对象, 探究小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤生长性能、健康状况、肌肉品质及肠道菌群的影响, 并明确小球藻在替代框鳞镜鲤饲料豆粕的最适比例, 从而降低饲料中豆粕的添加量, 为水产饲料新型蛋白源开发和饲用豆粕的减量替代提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 实验设计

为探究饲料中小球藻替代豆粕对框鳞镜鲤生长性能、健康状况及肌肉品质的影响, 本实验设计了小球藻分别梯度替代框鳞镜鲤饲料0、25%、50%、75%和100%豆粕的共5种实验饲料, 分别命名为CV0(对照组)、CV25、CV50、CV75和CV100。

1.2 实验饲料制作

根据鲤配合饲料国家标准(GB/T 36782-2018), 配制了5种等氮(32%)等脂(7%)实验饲料, 实验饲料配方如表1所示。豆粕与小球藻的氨基酸组成见

表2。饲料制作流程参照Li等^[6]。

1.3 养殖环境

养殖实验在安康水产实验示范站(海拔280 m, 东经108°, 北纬32°)的室外水泥池中完成。养殖实验所用网箱的尺寸为1.0 m×1.0 m×1.0 m, 网箱的网孔直径为0.5 cm, 每个网箱均配备网盖以防止实验鱼逃逸, 放置网箱的水泥池水深为0.8 m并配备直径为1.5 m的纳米微孔增氧盘。

1.4 养殖实验管理和投喂

框鳞镜鲤取自安康水产实验示范站, 网箱驯养30 d, 驯养期间投喂与实验饲料营养水平一致的商品饲料(重庆斯特佳生物科技有限公司)。驯养后禁食24 h, 挑选450尾(初重20.00±0.01 g)健康、规格均一, 分入15个网箱30尾(30尾/网箱)。每种实验饲料随机饲喂3个网箱60 d。每日按体重的3%投喂3次(8:00、13:00、18:00), 10:00监测水质。实验期间水温23.5—31℃, 氨态氮<0.5 mg/L, 亚硝态氮<0.05 mg/L, 硫化物<0.05 mg/L, pH 7.1—8.2, 溶解氧>7 mg/L。

1.5 样品采集

养殖实验开始时, 取9尾规格一致的框鳞镜鲤, -20℃保存, 用于初始营养成分检测。养殖结束后, 所有鱼禁食24 h, 捞出后用MS222 (50 mg/L)麻醉, 逐尾测量体长、全长和体重, 记录各网箱尾数, 用于计算生长与形体指标。随后, 每个网箱按以下顺序取样: 随机取2尾全鱼, -20℃保存, 备全鱼营养成分分析; 随机取3尾静脉采血, 3500 r/min离心15 min制备血清, 液氮速冻后转-80℃保存; 随机取6尾, 冰上无菌解剖, 分离肝、肠并称量, 各均分为两份, 分装于2 mL无菌冷冻管, 一份液氮速冻后-80℃保存, 用于肠道消化酶、肠道抗氧化及肝脏抗氧化指标检测, 另一份留作组织病理切片; 另取6尾, 分割两侧背肌, 液氮速冻后-80℃保存, 用于肌肉氨基酸与脂肪酸检测; 另取3尾, 分割左侧侧线以上全部背肌用于质构检测, 并取黄豆粒大小肌肉固定于4%多聚甲醛; 另取3尾, 取侧线以上左右两侧背肌用于肉色测定; 最后取4尾, 收集肠道内容物于无酶1.5 mL离心管, 液氮速冻后-80℃保存, 用于16S rRNA分析。

1.6 样品检测

营养成分测定 样品的水分、粗蛋白、粗脂肪及灰分检测分别参照GB/T 6435-2014、GB/T 6432-2018、GB/T 6433-2006和GB/T 6438-2007标准方法执行。

血清生化指标检测 用全自动生化分析仪(Hitachi 7180)检测血清白蛋白(ALB)、谷丙转氨酶

(ALT)、碱性磷酸酶(ALP)、谷草转氨酶(AST)、总蛋白(TP)及谷氨酰转氨酶(GGT)。

肠道消化酶活性测定 用南京建成生物工程研究的试剂盒检测肠道胰蛋白酶(Trypsin)、 α -淀粉酶(α -Amylase)和脂肪酶(Lipase)。

抗氧化能力测定 用南京建成生物工程研究的试剂盒检测肝脏与肠道总抗氧化能力(T-AOC)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)及丙二醛(MDA)。

肝脏、肠道、肌肉组织学特性观察 样品的固定、脱水、石蜡包埋、切片制作、苏木精-伊红(HE)染色、图像采集、数据处理采用Li等^[6]描述的方法。

肌肉脂肪酸测定 准确称取约0.2 g样品,加入5 mL甲醇-氯仿(1:2)混合液和200 μ L C11内标(0.83 mg/mL),振荡2 h,定量滤纸过滤,滤液中加入4 mL双蒸水,3000 r/min离心5 min。收集有机相,37℃氮吹吹干约40 min,加入1 mL 0.4 mol/L氢氧化钾甲醇溶液,室温甲酯化30 min。再加1 mL色谱纯正己烷,涡旋1 min,加2 mL双蒸水,3000 r/

min离心5 min,取上层有机相。使用岛津Nexis GC-2030气相色谱仪、SH-Rt-2560毛细管柱(100 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.20 μ m)进行脂肪酸组分分析。

氨基酸测定 肌肉和原料氨基酸测定采用氨基酸自动分析仪(Hitachi, L-8800)分别按照GB/T 5009.124-2003、GB/T 18246-2000标准方法开展。

肌肉质构特性检测 肌肉质构特性参照Li等^[6]描述的方法进行检测。

肌肉肉色检测 肌肉组织经粉碎混匀后,装入透明无色自封袋内抹平,随后使用NS800分光测色仪(中国深圳三恩时科技有限公司)进行肉色检测。

肠道菌群分析 总DNA采用CretMagTM Power Soil DNA Kit提取,对细菌16S rRNA基因高变区进行PCR扩增,纯化后基于华大DNBSEQ-G99 PE300平台完成高通量测序。后续使用UPARSE软件(version 7.1)进行序列拼接、质量过滤、OTU聚类和物种分类注释等生物信息学分析。

1.7 数据分析与处理

采用SPSS 19.0进行正态性和方差齐性检验,

表1 实验饲料配方及化学组成

Tab. 1 Formulation and chemical composition of experimental diet

原料Ingredient (g/kg)	豆粕 Soybean meal	小球藻 Chlorella meal	实验饲料Experimental diet				
			CV0	CV25	CV50	CV75	CV100
鱼粉Fish meal ¹			50	50	50	50	50
豆粕Soybean meal ¹			320	240	160	80	0
小球藻Chlorella meal ²			0	62	124	186	248
酪蛋白Casein ³			142.5	142.5	142.5	142.5	142.5
玉米淀粉Corn starch ³			100	100	100	100	100
面粉Flour ³			150	150	150	150	150
豆油Soybean oil ³			64.7	63.7	62.6	61.6	60.5
氯化胆碱60 Choline chloride 60 ⁴			5	5	5	5	5
预混料Premix ⁴			10	10	10	10	10
乙氧基喹啉Ethoxyquin ⁴			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
磷酸二氢钙Calcium phosphate primary			20	20	20	20	20
羧甲基纤维素钠Carboxyl methyl cellulose ³			20	20	20	20	20
微晶纤维素Cellulose			117.3	136.3	155.4	174.4	193.5
营养成分Nutritional composition							
粗蛋白Crude protein (%)	46.13	60.39	32.15	31.86	32.14	32.09	31.88
粗脂肪Crude lipid (%)	0.98	2.43	6.9	6.89	6.95	6.91	7.01
水分Moisture (%)	10.04	6.2	9.88	9.15	9.94	9.99	9.9

注:¹鱼粉、豆粕: 陕西华秦农牧科技有限公司; Fishmeal, Soybean meal: Shannxi Huaqin Agricultural and Animal Husbandry Technology Co., Ltd., Shannxi, China; ²小球藻(未破壁): 武汉德默特生物科技有限公司; *Chlorella* meal (non-disrupted): Wuhan Demeter Biotechnology Co., Ltd, Hubei, China; ³酪蛋白、微晶纤维素、玉米淀粉、羧甲基纤维素钠、面粉、豆油: 武汉伊美特生物科技有限公司; Casein, Cellulose, Corn starch, Carboxyl methyl cellulose, Flour, Soybean oil: Wuhan Yimeite Biotechnology Co., Ltd., Hubei, China; ⁴氯化胆碱、乙氧基喹啉、预混料: 广东联鲲集团有限公司; Choline chloride, Ethoxyquin, Premix: Guangdong Liankun Group Co., Ltd., Guangdong, China

方差不齐时经函数转换至方差齐性不显著后, 进行单因素方差分析($P<0.05$ 表示差异显著)。对肌肉氨基酸和质构特性结果, 以协方差矩阵法进行主成分分析, 解释饲料小球藻添加水平的影响。图表用GraphPad Prism绘制。数据以平均值 $\pm$ 标准误(mean $\pm$ SE)表示。

养殖实验中用于计算框鳞镜鲤的生长性能和形体指标的公式:

特定生长率(Specific growth rate, SGR, %/d)=[ln(鱼末均重)-ln(鱼初均重)]/实验天数 $\times$ 100;

增重率(Weight gain rate, WGR, %)=(末重-初重)/初重 $\times$ 100;

饲料系数(Feed conversion ratio, FCR, g/g)=投饲总量/体增重;

蛋白沉积率(Protein retention efficiency, PRE, %)=鱼体蛋白沉积量/蛋白质摄入量 $\times$ 100;

脂肪沉积率(Protein retention efficiency, PRE,

%)=鱼体脂肪沉积量/脂肪摄入量 $\times$ 100;

脏体比(Viscerosomatic index, VSI)=内脏重/鱼体重 $\times$ 100;

肥满度(Condition factor, CF)=体重/体长³ $\times$ 100;

肝体比(Hepatosomatic index, HSI)=肝脏重/鱼体重 $\times$ 100。

2 结果

2.1 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤生长性能和形体指标的影响

由表3可知, 随着小球藻替代饲料豆粕的比例增加, 框鳞镜鲤的FBW、WGR、SGR、PRE、LRE呈现先增加后降低的趋势, 而饲料系数则呈相反的趋势。其中, CV50和CV75处理组框鳞镜鲤的末重显著高于对照组($P<0.05$)。与对照组相比, CV50、CV75、CV100处理组的WGR和SGR显著升高($P<0.05$)。另外, 在饲料利用方面, 当小球藻替代框鳞镜鲤饲料50%的豆粕时, 框鳞镜鲤的饲料系数显著低于对照组和CV25处理组($P<0.05$)。此外, CV25、CV50和CV75处理组的蛋白沉积率显著高于CV0处理组($P<0.05$)。在脂肪沉积率方面, 所有小球藻添加组的脂肪沉积率均高于对照组($P<0.05$)。在形体指标方面, 饲料中小球藻替代豆粕对框鳞镜鲤肥满度、脏体比和肝体比无影响($P>0.05$)。

2.2 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤营养成分的影响

如表4所示, CV25、CV50、CV75处理组全鱼粗蛋白及CV50、CV75处理组肌肉粗蛋白含量显著高于CV0处理组($P<0.05$)。与对照组(CV0)相比, CV50处理组全鱼粗脂肪, 及CV25、CV50和CV75处理组肌肉粗脂肪显著升高($P<0.05$)。另外, CV50处理组全鱼水分显著低于对照组和小球藻完全替代豆粕处理组($P<0.05$)。

2.3 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤血清生化指标的影响

如表5所示, 与对照组相比, CV50处理组血清碱性磷酸酶含量显著升高($P<0.05$)。其次, CV50处理组血清谷草转氨酶和谷丙转氨酶含量显著低于对照组和CV100处理组($P<0.05$)。CV50和CV75处理组血清TP水平显著低于CV0和CV100处理组($P<0.05$)。在谷氨酰转移酶含量方面, CV50处理组显著低于CV100处理组($P<0.05$)。

2.4 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肠道消化酶活性的影响

从表6可知, 框鳞镜鲤肠道消化酶活性随着小球藻替代饲料豆粕比例的增加先增加后降低。与

表2 豆粕和小球藻的氨基酸组成(%干物质)

Tab. 2 Amino acid composition of soybean meal and *Chlorella* meal (% dry matter)

氨基酸Amino acid	豆粕 Soybean meal	小球藻 <i>Chlorella</i> meal
必需氨基酸(EAA)		
赖氨酸Lys	2.85	2.86
缬氨酸Val	2.05	2.48
苯丙氨酸Phe	2.31	2.25
蛋氨酸Met	0.45	0.92
异亮氨酸Ile	1.97	1.72
亮氨酸Leu	3.38	3.95
苏氨酸Thr	1.89	2.11
精氨酸Arg	3.17	2.76
组氨酸His	1.19	0.94
Σ EAA	19.26	19.99
非必需氨基酸(NEAA)		
谷氨酸Glu	8.34	6.89
丝氨酸Ser	2.35	1.96
天门冬氨酸Asp	5.21	4.74
酪氨酸Tyr	1.36	1.59
丙氨酸Ala	1.97	3.99
胱氨酸Cys	0.65	0.54
甘氨酸Gly	1.91	2.66
脯氨酸Pro	2.45	2.08
Σ NEAA	24.247	24.45
Σ AA	43.507	44.44

注: EAA. Essential amino acids; NEAA. Non-essential amino acids; Thr. Threonine; Val. Valine; Met. Methionine; Phe. Phenylalanine; Ile. Isoleucine; Leu. Leucine; Lys. Lysine; Arg. Arginine; His. Histidine; Asp. Asparaginic acid; Ser. Serine; Glu. Glutamic acid; Gly. Glycine; Ala. Alanine; Cys. Cystine; Tyr. Tyrosine; Pro. Proline

对照组相比, 小球藻替代框鳞镜鲤饲料25%和50%的豆粕, 鱼体肠道 α -淀粉酶活性显著提高($P<0.05$)。在胰蛋白酶活性方面, CV50处理组显著高于CV0和CV100处理组($P<0.05$)。此外, CV50处理组框鳞镜鲤肠道脂肪酶活性显著升高($P<0.05$)。

2.5 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肠道和肝脏抗氧化能力的影响

从表 7 可知, 小球藻替代框鳞镜鲤50%豆粕可

显著提升鱼体肠道和肝脏T-AOC水平($P<0.05$)。CV25、CV50、CV75处理组鱼体肠道SOD活性, 及CV25和CV50处理组肠道CAT活性明显升高($P<0.05$)。在肝脏抗氧化能力方面, CV25和CV50处理组框鳞镜鲤肝脏SOD活力显著提升($P<0.05$)。与CV100处理组相比, 小球藻替代饲料中25%豆粕显著提升鱼体肝脏CAT活力($P<0.05$)。另外, 在肝脏MDA含量方面与肝脏SOD活力表现出相反的趋势,

表 3 饲料中小球藻对框鳞镜鲤生长性能和形体指标的影响

Tab. 3 Effect of dietary *Chlorella* meal on growth performance and morphological indices of mirror carp

参数Parameter	实验饲料Experimental diet				
	CV0	CV25	CV50	CV75	CV100
终末体重FBW (g)	50.05±1.19 ^a	54.2±0.90 ^{ab}	60.32±2.89 ^c	55.66±0.46 ^{bc}	54.8±1.01 ^{ab}
饲料系数FCR	1.93±0.08 ^c	1.71±0.04 ^b	1.47±0.11 ^a	1.63±0.02 ^{ab}	1.67±0.05 ^{ab}
增重率WGR (%)	165.93±7.66 ^a	184.53±4.8 ^{ab}	229.08±7.87 ^c	194.51±2.32 ^b	190.29±5.74 ^b
特定生长率SGR (%/d)	1.75±0.05 ^a	1.87±0.03 ^b	2.13±0.04 ^c	1.93±0.01 ^b	1.90±0.04 ^b
蛋白沉积率PRE (%)	32.66±1.80 ^a	40.04±1.74 ^b	48.35±2.56 ^c	40.68±1.67 ^b	36.62±1.07 ^{ab}
脂肪沉积率LRE (%)	55.68±2.30 ^a	65.03±1.59 ^b	72.78±1.11 ^c	65.74±0.68 ^b	64.67±2.52 ^b
肥满度CF (g/cm ³)	2.75±0.07	2.81±0.06	2.80±0.07	2.77±0.11	2.78±0.06
脏体比VSI	7.63±0.21	7.63±0.33	8.35±0.26	8.53±0.33	8.44±0.24
肝体比HSI	2.60±0.06	2.37±0.09	2.81±0.30	2.64±0.12	2.82±0.07

注: 同行数值上标不同表示差异显著($P<0.05$); 下同

Note: Different superscript letters indicate significant differences ($P<0.05$); The same applies below

表 4 饲料中小球藻对框鳞镜鲤全鱼、肌肉营养成分的影响(%湿重)

Tab. 4 Effect of dietary *Chlorella* meal on the nutritional composition of mirror carp whole body and muscle (% wet matter)

参数Parameter	实验饲料Experimental diet				
	CV0	CV25	CV50	CV75	CV100
全鱼Whole body					
粗蛋白Crude protein	15.56±0.31 ^a	17.37±0.28 ^{bc}	17.89±0.30 ^c	16.97±0.47 ^{bc}	16.25±0.47 ^{ab}
粗脂肪Crude lipid	7.05±0.03 ^a	7.26±0.11 ^{ab}	7.55±0.17 ^b	7.10±0.11 ^a	7.11±0.05 ^a
灰分Ash	2.56±0.20	2.37±0.07	2.45±0.16	2.45±0.23	2.39±0.27
水分Moisture	72.02±0.2 ^b	71.63±0.35 ^{ab}	70.98±0.29 ^a	71.81±0.32 ^{ab}	72.24±0.27 ^b
肌肉Muscle					
粗蛋白Crude protein	18.89±0.44 ^a	20.26±0.31 ^{ab}	21.37±0.55 ^b	20.4±0.46 ^b	20.09±0.31 ^{ab}
粗脂肪Crude lipid	1.73±0.06 ^a	2.06±0.04 ^{bc}	2.09±0.06 ^c	2.13±0.14 ^c	1.79±0.11 ^{ab}
灰分Ash	1.02±0.03	1.09±0.10	1.05±0.04	1.10±0.11	1.05±0.06
水分Moisture	74.77±0.31	74.84±0.08	74.17±0.07	75.37±0.59	75.06±0.59

表 5 饲料中小球藻对框鳞镜鲤血清生化指标的影响

Tab. 5 Effect of dietary *Chlorella* meal on serum biometric indices of mirror carp

参数Parameter	实验饲料Experimental diet				
	CV0	CV25	CV50	CV75	CV100
白蛋白ALB (g/L)	10.00±0.17	10.25±0.14	10.35±0.03	10.10±0.12	10.20±0.06
碱性磷酸酶ALP (U/L)	129.00±5.77 ^a	135.00±11.55 ^{ab}	161.67±12.35 ^b	142.75±3.61 ^{ab}	148.50±3.75 ^{ab}
谷丙转氨酶ALT (U/L)	49.70±3.29 ^b	43.00±9.01 ^{ab}	29.10±2.02 ^a	54.90±5.48 ^b	50.15±2.92 ^b
谷草转氨酶AST (U/L)	152.10±0.64 ^b	133.00±16.05 ^{ab}	121.30±1.04 ^a	132.40±7.45 ^{ab}	150.05±5.11 ^b
总蛋白TP (g/L)	27.50±0.23 ^b	26.75±0.03 ^{ab}	26.05±0.03 ^a	26.45±0.03 ^a	29.60±0.64 ^c
谷氨酰转氨酶GGT (U/L)	3.07±0.12 ^{ab}	3.50±0.29 ^{ab}	2.70±0.35 ^a	3.00±0.12 ^{ab}	3.80±0.25 ^b

即CV25和CV50处理组框鳞镜鲤肝脏MDA含量显著低于其他各个处理组($P<0.05$)。

2.6 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肝脏组织学特性的影响

图1展示的是饲料中小球藻对框鳞镜鲤肝脏组织学特性的影响, 肝脏组织学结果显示, 小球藻替代饲料中0、25%、50%和75%的豆粕, 框鳞镜鲤肝细胞形态结构正常, 细胞排列紧密, 并且细胞核位于肝细胞中央。然而, 当饲料中的豆粕被小球藻完全替代后, 偶见框鳞镜鲤肝脏组织中出现少许空泡化及细胞核迁移至细胞边缘的现象, 表明小球藻过量替代饲料豆粕会对框鳞镜鲤肝脏健康造成负面影响。

2.7 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肠道肌层厚度和绒毛长度的影响

如图2所示, 框鳞镜鲤肠道绒毛高度和肌层厚度在CV50处理组最高, 且显著高于对照组和CV100处理组($P<0.05$)。

2.8 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肾脏组织结构的影响

如图3所示, 对照组、CV25、CV50、CV75处理组框鳞镜鲤肾脏组织表面被膜无明显异常, 肾脏组织中的肾小球形态规则且分布均匀, 肾小球内细胞数目、形态均在正常范围, 系膜基质分布均匀, 未见异常增生表现; 肾小管轮廓规整, 排列密集, 上

表6 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肠道消化酶活性的影响

Tab. 6 Effect of dietary *Chlorella* meal on the intestinal digestive enzyme activities of mirror carp

参数Parameter (U/mg prot)	实验饲料Experimental diet				
	CV0	CV25	CV50	CV75	CV100
α -淀粉酶 α -Amylase	0.43 $\pm$ 0.11 ^a	0.96 $\pm$ 0.23 ^b	0.97 $\pm$ 0.12 ^b	0.47 $\pm$ 0.15 ^a	0.26 $\pm$ 0.04 ^a
胰蛋白酶Trypsin	825.73 $\pm$ 75.35 ^{ab}	1109.65 $\pm$ 107.6 ^{bc}	1152.13 $\pm$ 99.16 ^c	882.88 $\pm$ 51.9 ^{abc}	712.88 $\pm$ 89.29 ^a
脂肪酶Lipase	225.35 $\pm$ 28.32 ^a	350.79 $\pm$ 91.45 ^{ab}	530.62 $\pm$ 97.46 ^b	300.94 $\pm$ 9.52 ^a	201.49 $\pm$ 20.13 ^a

表7 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肠道和肝脏抗氧化能力的影响

Tab. 7 Effect of dietary *Chlorella* meal on the antioxidant capacity in the intestine and liver of mirror carp

参数Parameter	实验饲料Experimental diet				
	CV0	CV25	CV50	CV75	CV100
肠道Intestine					
总抗氧化能力T-AOC (mol/g)	120.74 $\pm$ 2.58 ^a	120.4 $\pm$ 7.35 ^a	157.64 $\pm$ 20.84 ^b	133.6 $\pm$ 6.16 ^{ab}	101.6 $\pm$ 4.35 ^a
超氧化物歧化酶 SOD (U/mg prot)	81.65 $\pm$ 2.51 ^a	104.42 $\pm$ 1.28 ^b	99.82 $\pm$ 2.94 ^b	100.70 $\pm$ 0.94 ^b	85.89 $\pm$ 2.56 ^a
过氧化氢酶CAT (U/mg prot)	0.13 $\pm$ 0.00 ^a	0.28 $\pm$ 0.05 ^b	0.30 $\pm$ 0.05 ^b	0.25 $\pm$ 0.07 ^{ab}	0.13 $\pm$ 0.02 ^a
丙二醛MDA (nmol/ mg prot)	1.09 $\pm$ 0.11	0.91 $\pm$ 0.02	1.02 $\pm$ 0.07	1.14 $\pm$ 0.06	1.11 $\pm$ 0.06
肝脏Liver					
总抗氧化能力T-AOC (mol/g)	0.64 $\pm$ 0.03 ^a	0.80 $\pm$ 0.02 ^{ab}	0.88 $\pm$ 0.04 ^b	0.76 $\pm$ 0.01 ^{ab}	0.74 $\pm$ 0.13 ^{ab}
超氧化物歧化酶SOD (U/mg prot)	17.72 $\pm$ 0.70 ^b	20.51 $\pm$ 0.14 ^c	20.77 $\pm$ 0.45 ^c	16.82 $\pm$ 0.12 ^b	14.35 $\pm$ 0.41 ^a
过氧化氢酶CAT (U/mg prot)	1.60 $\pm$ 0.26 ^{ab}	2.14 $\pm$ 0.22 ^b	1.95 $\pm$ 0.10 ^{ab}	1.60 $\pm$ 0.17 ^{ab}	1.39 $\pm$ 0.06 ^a
丙二醛MDA (nmol/mg prot)	2.49 $\pm$ 0.18 ^{cd}	1.27 $\pm$ 0.08 ^b	0.87 $\pm$ 0.06 ^a	2.27 $\pm$ 0.10 ^c	2.70 $\pm$ 0.12 ^d

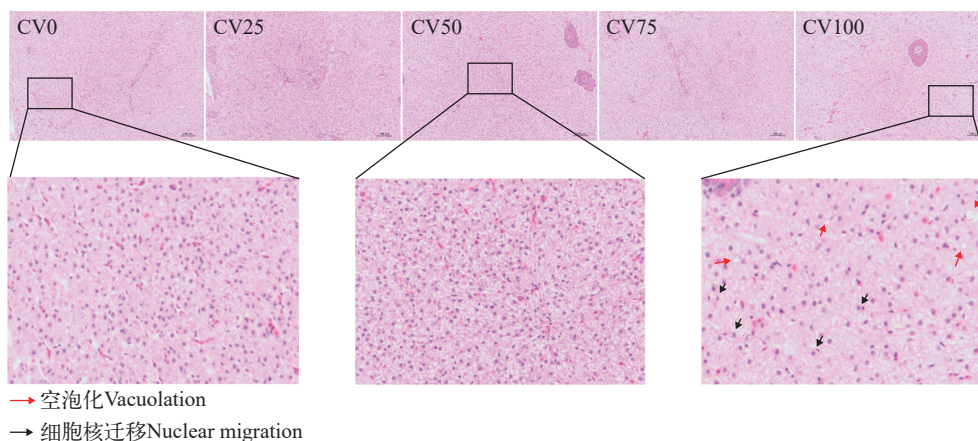


图1 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肝脏组织学特性的影响

Fig. 1 Effect of dietary *Chlorella* meal on hepatopancreas histology of mirror carp (10 $\times$)

皮细胞形态饱满圆润, 管腔面刷状缘结构完整有序, 肾髓质区未发现病理改变; 肾间质组织未见明显增生, 亦无炎性细胞浸润征象。然而, 当小球藻替代饲料豆粕为100%时, CV100处理组框鳞镜鲤肾脏组织中的肾小球表现出形态不规则、增生肿大及基质不均匀, 肾小管上皮细胞和刷状缘排列不规则, 且间质发生增生及有明显的炎性浸润。

2.9 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肌肉肌纤维结构的影响

如图4所示, 实验鱼肌肉组织的肌纤维密度随着小球藻替代豆粕比例的增加先上升后下降, 其中肌纤维密度在CV50组最高且显著高于CV0、CV25和CV100处理组($P<0.05$), 而与CV75处理组无差异($P>0.05$; 图4b)。而肌纤维直径与肌纤维密度呈相反的趋势, 即实验鱼肌肉组织的肌纤维直径随着小球藻替代饲料中豆粕比例的增加呈先下降后上升,

其中CV50处理组框鳞镜鲤肌纤维直径在所有处理组中最低且显著低于对照组和CV100处理组($P<0.05$), 而与CV25和CV75处理组无差异($P>0.05$; 图4c)。在肌纤维直径分布统计中发现, 肌纤维直径小于30 μm , 以及肌纤维直径 $\geq 30 \mu\text{m}$ 且 $<60 \mu\text{m}$ 的这类肌纤维占比在CV50处理组中最高, 且显著高于对照组($P<0.05$)。与对照组相比, 在纤维直径 $\geq 60 \mu\text{m}$ 且 $<90 \mu\text{m}$, 及 $\geq 120 \mu\text{m}$ 的这类肌纤维占比在CV25和CV50处理中显著降低($P<0.05$)。而所有实验组在肌纤维直径 $\geq 90 \mu\text{m}$ 且 $<120 \mu\text{m}$ 的肌纤维占比中无显著差异($P>0.05$; 图4d)。

2.10 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肌肉氨基酸组成的影响

从表8可知, 与对照组相比, CV25、CV50和CV75处理组框鳞镜鲤肌肉中Asp、Ser、Glu、Gly、Tyr、Thr、Val、Ile、Leu、Phe、NEAA、EAA及

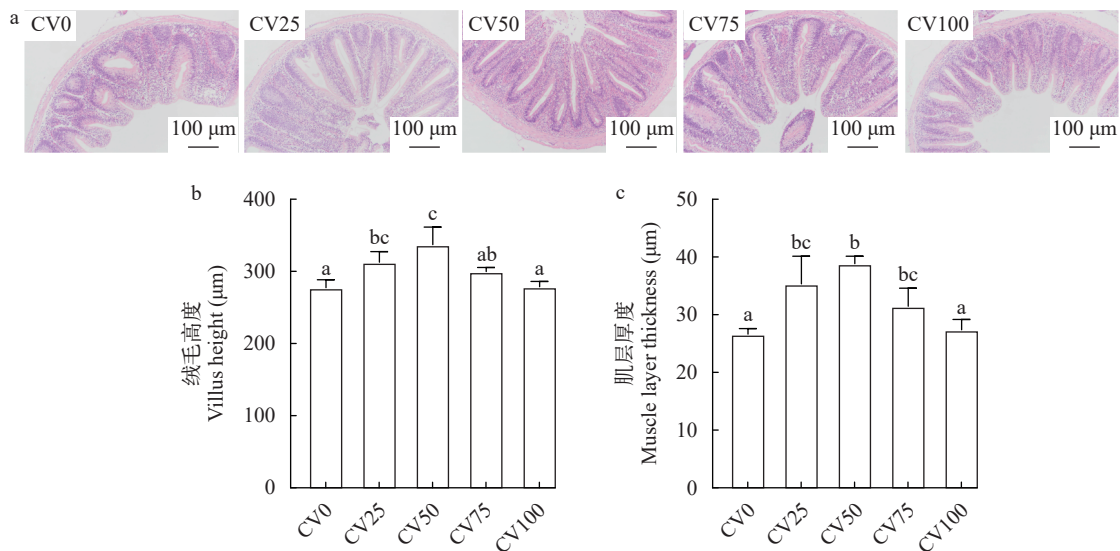


图2 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肠道肌层厚度和绒毛高度的影响(10×)

Fig. 2 Effect of dietary *Chlorella* meal on intestine muscle layer thickness and villus height of mirror carp (10×)

a. HE染色; b. 绒毛高度; c. 肌层厚度

a. HE staining; b. Villus height; c. Muscle layer thickness

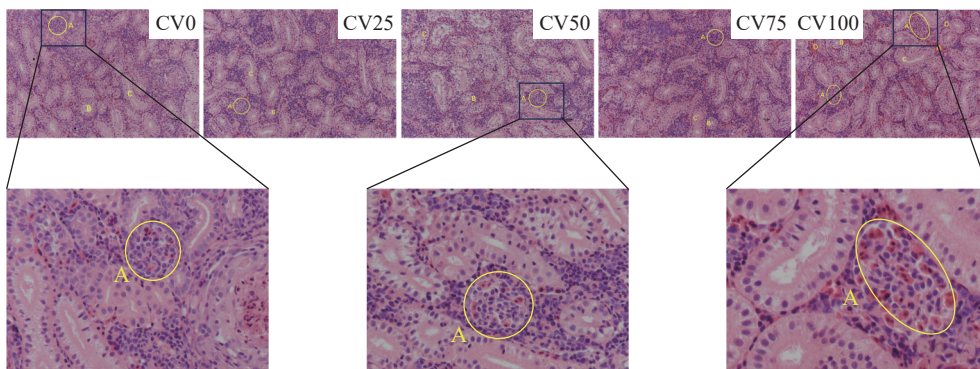


图3 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肾脏组织结构的影响(20×)

Fig. 3 Effect of dietary *Chlorella* meal on kidney structure of mirror carp (20×)

Σ AA含量显著升高($P<0.05$)。CV50组Met、Lys、His、Arg含量在所有实验组中最高,且显著高于CV0、CV25、CV100处理组($P<0.05$)。

为了深入探究饲料中小球藻替代豆粕后对框鳞镜鲤肌肉氨基酸组成的影响,对肌肉氨基酸进行了主成分分析,从图5可知,主成分1(PCA1)包含所有肌肉氨基酸(包括各种非必需氨基酸、必需氨基酸)90.08%的信息,而主成分2(PCA2)可代表肌肉氨基酸(各种非必需氨基酸、必需氨基酸)5.53%的信息,所以主成分1(PCA1)与主成分2(PCA2)共代表所有质构指标的95.61%信息,因此,可采用主成分1(PCA1)与主成分2(PCA2)解释饲料中小球藻对框鳞镜鲤肌肉氨基酸含量的影响。如图5a所示, CV25、CV50、CV75处理组与对照组和CV100处理组明显分开,表明CV25、CV50、CV75处理组肌肉氨基酸组成明显优于对照组和CV100处理组。

2.11 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肌肉脂肪酸组成的影响

如表9所示,与对照组相比, CV50、CV75和CV100处理组的 $C_{12}:0$ 含量显著降低($P<0.05$)。而肌肉中 $C_{17}:1n-7$ 、 $C_{22}:6n-3$ (DHA)和 $n-3$ PUFA含量与 $C_{12}:0$ 含量呈相反的趋势,其中, CV100处理组 $C_{17}:1n-7$ 含量显著高于对照组($P<0.05$)。然而, $C_{18}:1n-9$ 、 $C_{18}:2n-6$ 、MUFA、 $n-6$ PUFA和PUFA含量随着饲料中小球藻替代豆粕含量的增加先上升后降低,其中CV50处理组肌肉的 $C_{18}:1n-9$ 、 $C_{18}:2n-6$ 和

MUFA水平显著高于CV0和CV100($P<0.05$),与其他处理组无差异($P>0.05$);与对照组相比, $n-6$ PUFA和PUFA含量在CV50处理组中显著升高($P<0.05$)。

2.12 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肌肉质构特性的影响

如表10所示,在生肉质构特性方面,饲料中小球藻替代适量的豆粕可提升框鳞镜鲤肌肉生肉质构特性。小球藻替代饲料中25%、50%、75%和100%的豆粕,可显著提升框鳞镜鲤肌肉生肉的硬度、咀嚼性、胶着性和回复性($P<0.05$)。与对照组相比, CV25、CV50、CV75处理组肌肉生肉的黏性, CV25和CV75处理组弹性,以及CV50处理组内聚性显著升高($P<0.05$)。

在肌肉熟肉质构特性方面,熟肉的硬度、咀嚼性和胶着性与生肉的硬度、咀嚼性、胶着性表现出一致的变化趋势($P<0.05$)。与对照组相比, CV50和CV75处理组肌肉熟肉的弹性和内聚性,以及CV25处理组的回复性显著升高($P<0.05$)。

为了深入探究饲料中小球藻替代豆粕后对框鳞镜鲤肌肉质构特性的影响,对肌肉生肉和熟肉质构特性进行了主成分分析。框鳞镜鲤肌肉质构特性主成分分析如图6所示,在生肉质构特性主成分分析方面,主成分1(PCA1)包含了所有的生肉质构特性指标(包括硬度、黏性、咀嚼性、胶着性、弹性、内聚性、回复性)74.85%的信息,主成分2(PCA2)可代表所有质构特性指标(包括硬度、黏性、咀嚼

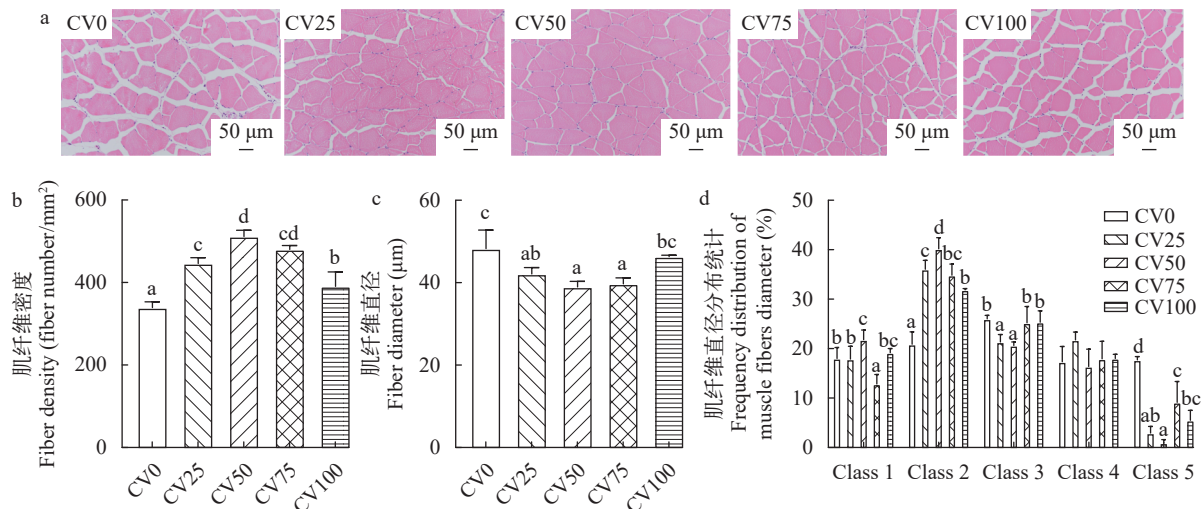


图4 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肌肉纤维结构的影响

Fig. 4 Effect of dietary *Chlorella* meal on muscle fiber structure of mirror carp (100 ×)

a. HE染色; b. 肌纤维密度; c. 肌纤维直径; d. 肌纤维直径分布统计; Class 1. 肌纤维直径 $<30\ \mu\text{m}$; Class 2. $30\ \mu\text{m}\leq$ 肌纤维直径 $<60\ \mu\text{m}$; Class 3. $60\ \mu\text{m}\leq$ 肌纤维直径 $<90\ \mu\text{m}$; Class 4. $90\ \mu\text{m}\leq$ 肌纤维直径 $<120\ \mu\text{m}$; Class 5. $120\ \mu\text{m}\leq$ 肌纤维直径

a. Transverse sections of muscle; b. Fiber density; c. Fiber diameter; d. Frequency distribution of muscle fibers diameter, Class 1. diameter $<30\ \mu\text{m}$; Class 2. $30\ \mu\text{m}\leq$ diameter $<60\ \mu\text{m}$; Class 3. $60\ \mu\text{m}\leq$ diameter $<90\ \mu\text{m}$; Class 4. $90\ \mu\text{m}\leq$ diameter $<120\ \mu\text{m}$; Class 5. $120\ \mu\text{m}\leq$ diameter

性、胶着性、弹性、内聚性、回复性)11.22%的信息,所以主成分1 (PCA1)与主成分2 (PCA2)共代表

表 8 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肌肉氨基酸组成的影响

Tab. 8 Effect of dietary *Chlorella* meal on the muscle amino acids of mirror carp

氨基酸 Amino acid	实验饲料Experimental diet				
	CV0	CV25	CV50	CV75	CV100
非必需氨基酸NEAA					
天门冬氨酸Asp	1.65± 0.06 ^a	1.88± 0.05 ^c	1.93± 0.00 ^c	1.90± 0.02 ^c	1.79± 0.08 ^b
丝氨酸Ser	0.61± 0.03 ^a	0.72± 0.02 ^b	0.73± 0.03 ^c	0.74± 0.00 ^c	0.69± 0.01 ^b
谷氨酸Glu	2.48± 0.08 ^a	2.90± 0.10 ^c	3.01± 0.00 ^c	2.94± 0.04 ^c	2.76± 0.01 ^{ab}
甘氨酸Gly	0.73± 0.03 ^a	0.85± 0.00 ^c	0.86± 0.01 ^c	0.87± 0.01 ^c	0.82± 0.02 ^b
丙氨酸Ala	0.98± 0.03	1.11± 0.12	1.14± 0.04	1.12± 0.07	1.06± 0.11
酪氨酸Tyr	0.60± 0.01 ^a	0.71± 0.02 ^c	0.72± 0.06 ^c	0.71± 0.01 ^c	0.65± 0.01 ^{ab}
脯氨酸Pro	0.51± 0.02	0.58± 0.01	0.58± 0.03	0.59± 0.05	0.54± 0.08
胱氨酸Cys	0.12± 0.01	0.13± 0.01	0.12± 0.02	0.12± 0.01	0.12± 0.03
ΣNEAA	7.68± 0.24 ^a	8.88± 0.22 ^c	9.08± 0.05 ^c	8.99± 0.07 ^c	8.44± 0.05 ^b
必需氨基酸EAA					
苏氨酸Thr	0.69± 0.03 ^a	0.81± 0.02 ^c	0.82± 0.02 ^c	0.82± 0.01 ^c	0.77± 0.01 ^b
缬氨酸Val	0.78± 0.02 ^a	0.87± 0.03 ^c	0.89± 0.03 ^c	0.86± 0.04 ^c	0.82± 0.01 ^b
蛋氨酸Met	0.47± 0.01 ^a	0.55± 0.02 ^c	0.57± 0.02 ^d	0.56± 0.01 ^{cd}	0.53± 0.03 ^{ab}
异亮氨酸Ile	0.72± 0.02 ^a	0.82± 0.02 ^c	0.83± 0.02 ^c	0.81± 0.02 ^c	0.77± 0.00 ^b
亮氨酸Leu	1.28± 0.04 ^a	1.46± 0.04 ^c	1.5± 0.00 ^c	1.47± 0.01 ^c	1.39± 0.00 ^b
苯丙氨酸Phe	0.71± 0.02 ^a	0.79± 0.02 ^c	0.81± 0.01 ^c	0.79± 0.02 ^c	0.75± 0.03 ^{ab}
赖氨酸Lys	1.57± 0.04 ^a	1.75± 0.06 ^c	1.82± 0.02 ^d	1.78± 0.02 ^{cd}	1.68± 0.04 ^b
组氨酸His	0.56± 0.00 ^a	0.63± 0.01 ^c	0.66± 0.01 ^d	0.65± 0.05 ^d	0.61± 0.02 ^b
精氨酸Arg	0.96± 0.03 ^a	1.09± 0.04 ^{bc}	1.14± 0.01 ^d	1.11± 0.01 ^{cd}	1.05± 0.01 ^b
ΣEAA	7.79± 0.23 ^a	8.77± 0.25 ^c	9.04± 0.04 ^c	8.85± 0.08 ^c	8.32± 0.03 ^b
ΣAA	15.49± 0.47 ^a	17.64± 0.47 ^c	18.13± 0.01 ^c	17.84± 0.16 ^c	16.74± 0.09 ^b

所有质构指标的86.07%信息。因此,主成分1 (PCA1)与主成分2 (PCA2)可解释饲料中小球藻对框鳞镜鲤肌肉生肉质构的影响。通过图 6a可知, CV50处理组可与对照组、CV25、CV750、CV100处理组明显分开,表明CV50处理组肌肉生肉质构特性明显优于其他处理组。

在熟肉质构特性主成分分析方面,从图 6可知,主成分1 (PCA1)包含了所有的熟肉质构特性指标(包括硬度、黏性、咀嚼性、胶着性、弹性、内聚性、回复性) 59.57%的信息。而主成分2 (PCA2)可代表所有熟肉质构特性指标(包括硬度、黏性、咀嚼性、胶着性、弹性、内聚性、回复性) 16.00%的信息,所以主成分1 (PCA1)与主成分2 (PCA2)共代表所有质构指标的75.57%信息,因此主成分1 (PCA1)与主成分2 (PCA2)可用于解释饲料中小球藻对框鳞镜鲤肌肉熟肉质构的影响。通过图 6c可知, CV0 (对照组)组、CV100处理组可与CV25、CV50、CV75处理组明显分开,表明CV25、CV50、CV75处理组肌肉熟肉质构特性明显优于对照组和CV100处理组。

2.13 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肌肉肉色的影响

从图 7可知,肌肉的红度值和黄度值随着饲料中小球藻水平的增加而增加,与对照组相比, CV50、CV75和CV100组肌肉a*和b*显著升高($P < 0.05$)。

2.14 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肠道菌群的影响

为探究小球藻替代豆粕后对框鳞镜鲤肠道菌群的影响,本研究将对照组(CV0)、50%替代组(CV50)及100%替代组(CV100)框鳞镜鲤肠道菌群进行检测分析,其结果如图 8和表 11所示。从检测结果可知, CV0、CV50和CV100处理组肠道菌群在

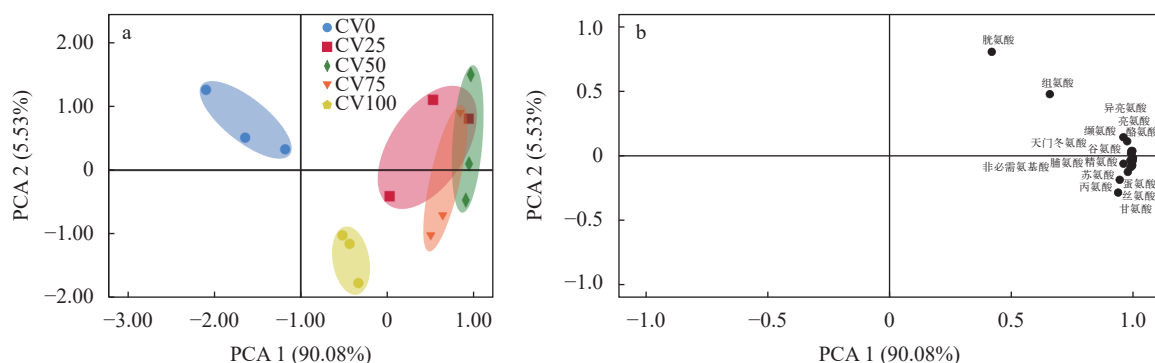


图 5 框鳞镜鲤肌肉氨基酸主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis of mirror carp muscle amino acids

a. PCA评分图; b. 组件图

a. PCA score plot; b. component plot

表 9 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肌肉脂肪酸组成的影响

Tab. 9 Effect of dietary *Chlorella* meal on the muscle fatty acids of mirror carp

参数 Parameter	实验饲料Experimental diet				
	CV0	CV25	CV50	CV75	CV100
C12:0	0.29±0.01 ^c	0.26±0.03 ^{bc}	0.25±0.01 ^b	0.19±0.01 ^a	0.23±0.04 ^b
C14:0	0.27±0.01	0.30±0.06	0.32±0.08	0.28±0.04	0.30±0.07
C16:0	1.66±0.02	1.91±0.38	1.86±0.47	1.74±0.09	1.54±0.17
C18:00	2.30±0.23	2.25±0.32	2.17±0.07	2.19±0.05	2.24±0.16
ΣSFA	4.52±0.21	4.72±0.79	4.59±0.60	4.31±0.18	4.31±0.36
C16:1n-7	0.50±0.06	0.58±0.13	0.57±0.18	0.52±0.01	0.45±0.08
C17:1n-7	0.13±0.01 ^a	0.16±0.03 ^{ab}	0.17±0.03 ^{ab}	0.14±0.03 ^{ab}	0.18±0.04 ^b
C18:1n-9	3.82±0.06 ^{ab}	4.93±0.90 ^{bc}	5.21±1.12 ^c	4.25±0.24 ^{abc}	3.46±0.41 ^a
ΣMUFA	4.45±0.01 ^{ab}	5.67±1.05 ^{bc}	5.95±1.24 ^c	4.91±0.20 ^{abc}	4.09±0.50 ^a
C18:2n-6	2.94±0.05 ^{ab}	4.22±0.84 ^c	4.20±0.68 ^c	3.79±0.10 ^{bc}	2.70±0.55 ^a
C18:3n-6	0.19±0.01	0.27±0.06	0.24±0.07	0.18±0.05	0.25±0.10
C20:3n-6	0.34±0.02	0.43±0.08	0.42±0.12	0.25±0.09	0.45±0.17
C20:4n-6	1.11±0.07	1.21±0.08	1.26±0.06	1.32±0.34	1.36±0.12
Σn-6PUFA	4.59±0.05 ^a	6.12±1.05 ^b	6.12±0.92 ^b	5.54±0.30 ^{ab}	4.76±0.94 ^{ab}
C18:3n-3	0.47±0.05	0.54±0.09	0.55±0.21	0.50±0.00	0.42±0.12
C20:5n-3	0.23±0.02	0.26±0.05	0.26±0.08	0.17±0.03	0.29±0.12
C22:6n-3	0.73±0.06 ^a	0.92±0.21 ^{ab}	0.97±0.11 ^{abc}	1.17±0.09 ^c	1.11±0.13 ^{bc}
Σn-3PUFA	1.42±0.07 ^a	1.72±0.20 ^{ab}	1.78±0.10 ^{ab}	1.84±0.04 ^b	1.83±0.06 ^b
ΣPUFA	6.22±0.20 ^a	7.44±0.73 ^{ab}	8.17±1.19 ^b	7.55±0.36 ^{ab}	7.54±0.34 ^{ab}

表 10 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肌肉质地特性的影响

Tab. 10 Effect of dietary *Chlorella* meal on the muscle texture properties of mirror carp

参数Parameter	实验饲料Experimental diet				
	CV0	CV25	CV50	CV75	CV100
生肉Raw meat					
硬度Hardness	1514.76±34.91 ^a	1932.19±59.11 ^{bc}	1984.23±38.87 ^c	1879.21±10.13 ^{bc}	1845.29±10.99 ^b
黏性Adhesiveness	-3.13±0.06 ^c	-4.62±0.07 ^a	-4.81±0.18 ^a	-3.80±0.22 ^b	-3.50±0.06 ^{bc}
咀嚼性Chewiness	196.34±1.97 ^a	273.24±4.07 ^c	303.37±6.27 ^d	268.14±2.57 ^c	232.95±2.99 ^b
胶着性Gumminess	418.27±5.74 ^a	544.34±8.67 ^b	640.54±7.38 ^c	542.89±5.68 ^b	525.31±5.04 ^b
弹性Springiness	0.44±0.01 ^{ab}	0.50±0.02 ^b	0.47±0.02 ^{ab}	0.49±0.01 ^b	0.42±0.02 ^a
内聚性Cohesiveness	0.27±0.02 ^a	0.28±0.01 ^a	0.32±0.03 ^b	0.29±0.04 ^a	0.28±0.01 ^a
回复性Resilience	0.16±0.01 ^a	0.20±0.03 ^{bc}	0.22±0.01 ^c	0.20±0.02 ^b	0.19±0.02 ^b
熟肉Cooked meat					
硬度Hardness	226.72±5.63 ^a	307.71±12.10 ^{bc}	311.42±9.05 ^c	284.09±5.09 ^b	284.29±2.55 ^b
黏性Adhesiveness	-0.74±0.1 ^{ab}	-0.82±0.11 ^a	-0.65±0.06 ^{ab}	-0.54±0.03 ^b	-0.68±0.07 ^{ab}
咀嚼性Chewiness	21.00±0.88 ^a	41.16±2.93 ^c	39.96±2.82 ^c	37.94±1.18 ^c	31.22±1.03 ^b
胶着性Gumminess	63.15±1.46 ^a	99.49±4.48 ^{cd}	109.63±7.25 ^d	95.79±2.65 ^c	82.85±0.49 ^b
弹性Springiness	0.35±0.01 ^a	0.37±0.03 ^{abc}	0.40±0.01 ^c	0.39±0.02 ^{bc}	0.37±0.01 ^{ab}
内聚性Cohesiveness	0.28±0.02 ^a	0.32±0.01 ^{abc}	0.35±0.02 ^c	0.33±0.02 ^{bc}	0.29±0.01 ^{ab}
回复性Resilience	0.11±0.01 ^a	0.13±0.02 ^b	0.12±0.02 ^{ab}	0.12±0.01 ^{ab}	0.11±0.03 ^a

α多样性指数Simpson、Chao 1及Shannon上均无显著差异($P>0.05$; 图 8a)。在β多样性分析中, PCoA主成分分析结果显示, CV50处理组与对照组明显分离(图 8b), 表明两个处理组物种组成存在明显差异。在门水平上, 三个处理组的框鳞镜鲤肠道菌群主要由变形菌门(*Proteobacteria*)、梭杆菌门(*Fusobacteriota*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、疣微菌门(*Verrucomicrobiota*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)组成(图 8c)。其中, CV50处理组中的疣微菌门(*Verrucomicrobiota*)相对丰度明显高于CV100处理组($P<0.05$), 而与对照组无显著差异($P>0.05$; 表 11)。从属水平看, CV50处理组鱼体肠道的红细菌属(*Rhodobacter*)、林杆菌属(*Alsobacter*)、*ZOR0006*、*Enterobacteriaceae*相对丰度高于其他两组(图 8d)。

2.15 基于框鳞镜鲤的生长性能二次回归分析

本实验基于实验鱼的生长性能进行了二次回归分析(图 9)。基于末重、增重率、特定增长率、饲料系数、蛋白沉积率和脂肪沉积率的分析结果, 饲料中小球藻替代豆粕的最适比例分别为70.54%、59.32%、58.14%、61.90%、59.75%和60.25%。

3 讨论

3.1 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤生长性能的影响

小球藻作为单细胞微藻, 富含机体生长所需要的各种必需氨基酸、多不饱和脂肪酸, 以及多种维

生素和矿物质,使其在饲料中的应用前景极为广泛^[7]。在哺乳动物的研究中表明,饲料中添加小球藻可促进羊^[8]、肉鸡^[9]的生长。在水产动物的研究中发现,饲料中添加适量小球藻可以提高凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[10]、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[11]、大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)^[12]、非洲鲶(*Clarias gariepinus*)^[13]的生长性能。在本研究中,框鳞镜鲤的生长性随着小球藻替代豆粕水平的升高先增加后降低,而饲料利用率则呈相反的趋势。这与鲫(*Carassius auratus*)^[14]和非洲鲶^[15]的研究结果相似。小球藻替代50%豆

粕,框鳞镜鲤末重最高且饲料系数最低,其原因可能是小球藻作为单细胞微藻,其富含的生物活性物质(如藻多糖、类胡萝卜素、生长因子)在促进鱼体生长和增强机体健康方面发挥了积极作用^[16]。此外,小球藻替代50%的豆粕,可能改善了饲料适口性,并显著提升框鳞镜鲤肠道消化酶活性,进而提升鱼体的消化吸收能力有关,这也与饲料中添加小球藻可显著提高异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)肠道淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶活性的结果较相似^[17]。小球藻替代豆粕的比例超过50%,框鳞镜鲤的生长性能降低(相较于CV50处理组),这可能与小球藻细

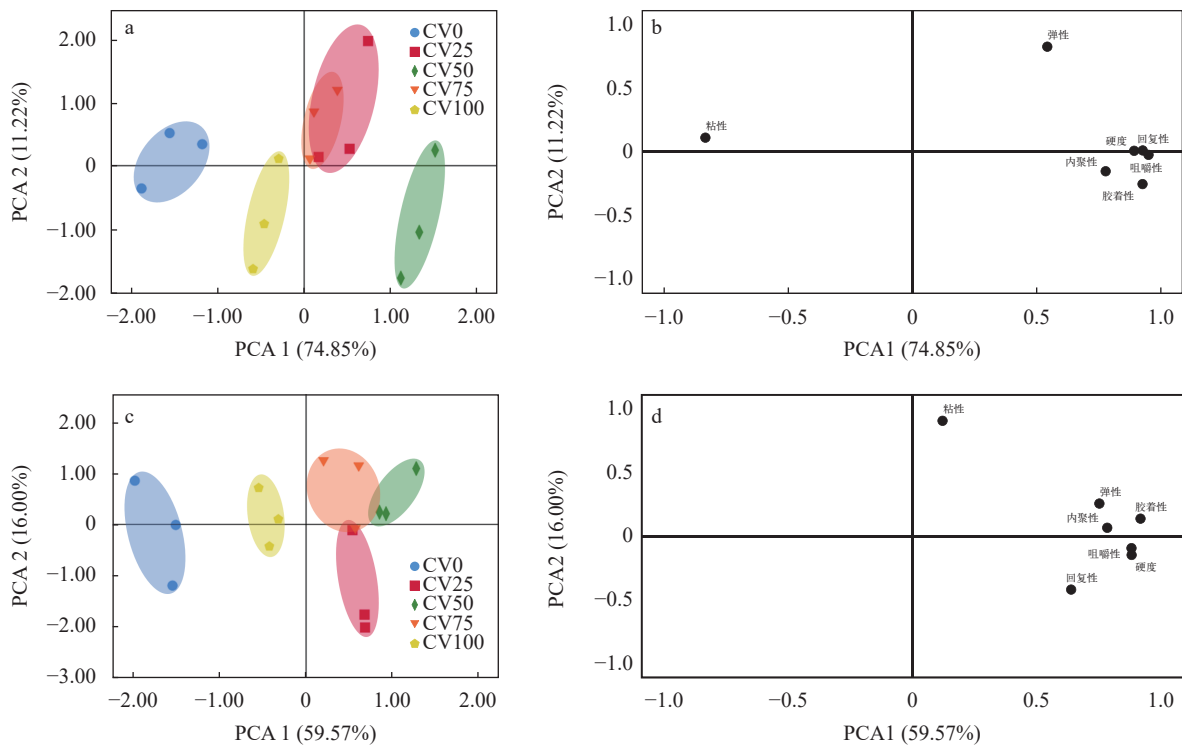


图6 框鳞镜鲤肌肉生肉和熟肉质构特性主成分分析

Fig. 6 PCA of mirror carp raw and cooked flesh texture

a. 生肉PCA评分图; b. 生肉组件图; c. 熟肉PCA评分图; d. 熟肉组件图

a. PCA score plot of raw flesh; b. component plot of raw flesh; c. PCA score plot of cooked flesh; d. component plot of cooked flesh

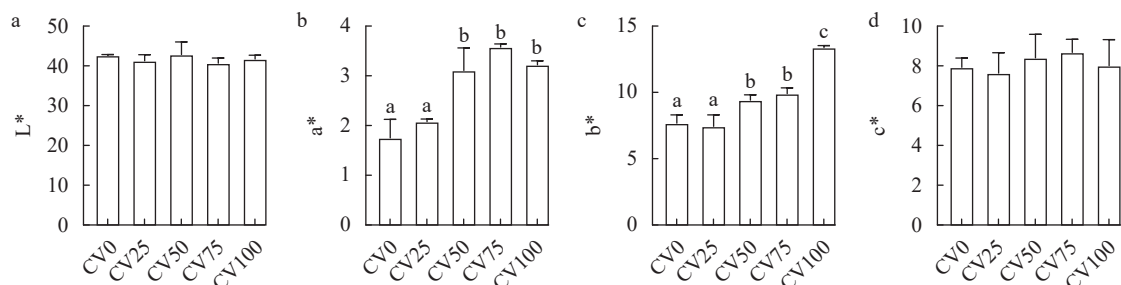


图7 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肌肉肉色的影响

Fig. 7 Effect of dietary *Chlorella* meal on muscle color of mirror carp

a. 亮度; b. 红度; c. 黄度; d. 饱和度

a. lightness value; b. redness value; c. yellow value; d. saturation value

胞壁难以消化、某些限制性氨基酸缺乏、生物活性物质过量及饲料适口性降低有关,这也进一步印证了前人的研究结论,即饲料中过量的小球藻粉可对水产动物的生长性能产生负面影响^[18]。同时,也有研究表明,小球藻作为功能性添加剂应用于水产饲料时,可在一定程度上提高水产动物的免疫力,从而保障了水产动物的健康生长^[19]。此外,在本研究中,通过对比小球藻和豆粕的氨基酸组成与含量(表 2),发现小球藻中的异亮氨酸、组氨酸、谷氨酸、丝氨酸、胱氨酸和脯氨酸含量均低于豆粕,小球藻过高水平地替代豆粕,可能造成饲料在以上 6 种氨基酸的缺乏,从而降低了框鳞镜鲤的生长性能。因此,基于前人和本研究的结果,表明小球藻粉作为替代蛋白源,存在一个最适添加水平。前人在大口黑鲈的研究中,通过鱼体末重、增重率和特定生长率指标的二次回归分析结果发现,饲料中小球藻的最适添加水平为 15.03%—15.43%^[12]。本研究根据框鳞镜鲤的生长性能指标的二次回归分析结果发现,小球藻替代豆粕的最适比例为 58.14%—

70.54%。
3.2 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤健康状况的影响

鱼类的血清生化指标被认为是评估鱼体健康状况的关键依据,能够综合反映鱼体营养代谢状况和健康状态^[20]。AST和ALT是反映肝细胞受损程度的关键指标,其活性升高表明肝细胞膜通透性增加或存在坏死情况^[21]。在本研究中,随着小球藻替代饲料豆粕水平升高,血清TP、ALT、AST和GGT含量先降低后增加,小球藻完全替代豆粕,ALT、GGT含量却高于对照组,从而表明小球藻过量替代豆粕,破坏了肝细胞膜的完整性,对肝细胞造成一定程度的损伤,这一结果与肝脏组织学观察结果相互印证。血清TP水平反映机体蛋白质合成与分解代谢的整体状态^[22]。当饲料蛋白供应充足,且氨基酸组成符合鱼类需求时,肠道消化吸收的氨基酸优先满足肌肉蛋白合成,而非用于合成血清白蛋白^[23]。本研究发现,50%替代组鱼体血清TP含量显著低于对照组和CV100组,而肌肉粗蛋白含量与血清TP则

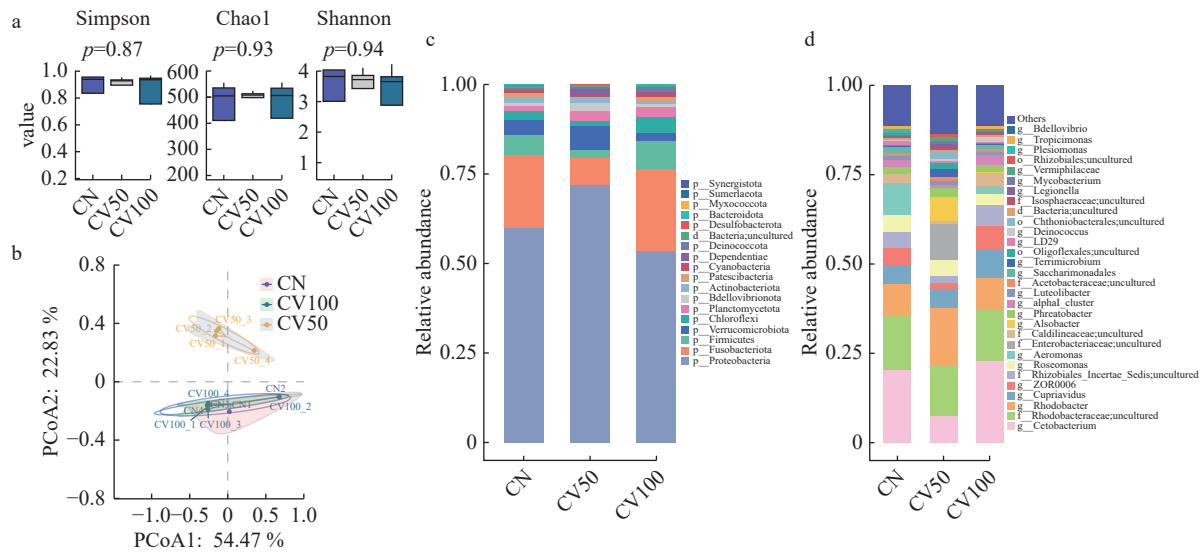


图 8 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肠道菌群的影响

Fig. 8 Effect of dietary *Chlorella* meal on gut microbiota of mirror carp

a. α 多样性指数; b. β 多样性分析; c. 门水平相对丰度; d. 属水平相对丰度

a. Alpha diversity index; b. Beta diversity analysis; c. Relative abundance at phylum; d. Relative abundance at genus

表 11 饲料中小球藻对框鳞镜鲤肠道菌群前5个优势菌门相对丰度的影响

Tab. 11 Effect of dietary *Chlorella* meal on relative abundance of top 5 dominant gut microbiota at phylum level of mirror carp

参数Parameter	实验饲料Experimental diet		
	CV0	CV50	CV100
变形菌门Proteobacteria	0.60±0.07	0.72±0.06	0.54±0.15
梭杆菌门Fusobacteriota	0.20±0.13	0.08±0.07	0.22±0.22
厚壁菌门Firmicutes	0.06±0.02	0.02±0.01	0.08±0.04
疣微菌门Verrucomicrobiota	0.04±0.02 ^{ab}	0.07±0.01 ^b	0.02±0.01 ^a
绿弯菌门Chloroflexi	0.03±0.01	0.01±0.00	0.05±0.02

呈相反的趋势,表明小球藻替代50%豆粕,饲料氨基酸组成是最符合框鳞镜鲤的生长需求,这一结论在鱼体的生长性能上也得到验证,即CV50处理组的末重最高。血清ALB含量未受到饲料中小球藻添加水平的影响,这与小球藻替代鱼粉在珍珠龙胆石斑鱼(*Epinephelus fuscoguttatus* ♀×*E. lanceolatus* ♂)上的研究结果不一致^[24],可能归因于杂食性的框鳞镜鲤相较于肉食性的石斑鱼,其肝脏代谢途径对植物性及微生物蛋白原料具有更强的适应与耐受能力。此外,豆粕作为植物蛋白本身存在氨基酸限制,而鱼粉则是近乎完美的动物蛋白源。替代豆粕是“优化短板”,而替代鱼粉可能是“移除长板”,尤其易造成肉食性鱼类必需脂肪酸、胆固醇等关键营养素的缺乏,进而诱发肝功能障碍。

肝脏作为鱼类营养代谢的核心器官,其健康状况直接反映了机体的健康状况^[25]。本研究通过病理切片发现,小球藻部分替代豆粕,框鳞镜鲤的肝细胞排列紧密,未观察到明显的炎症细胞浸润或坏死等病理现象。饲料中的豆粕被小球藻完全替代,框鳞镜鲤肝脏组织中出现少许空泡化及细胞核迁移至细胞边缘的现象,这一结果与血清ALT、GGT指标相互印证,共同表明小球藻过量替代饲料豆粕会对框鳞镜鲤肝脏健康造成负面影响。这一结果与Shi等^[14]在鲫中的研究结论相符,即小球藻过量替代鱼粉可引发鱼体肝组织损伤。其原因可能是小球藻部分替代豆粕时,小球藻与豆粕可能在氨基酸上实现互补,小球藻的功能性成分也处于有益范围内。然而,完全替代可能导致组织负担过载,摄

入过量小球藻出现细胞壁纤维消化、肠道渗透性与内毒素负荷增加等问题,从而通过肠-肝轴诱发肝脏病变。因此,将小球藻作为可持续蛋白源应用于水产饲料时,应遵循“部分替代”原则,将其作为营养与功能调节剂,而非单纯的基础蛋白替代物,以避免因系统失衡导致肝脏损伤。这提示,小球藻对肝脏组织的影响不仅取决于其添加水平,也与被替代原料的属性密切相关。

肠道是鱼类消化吸收营养物质和抵御病原体入侵的第一道屏障,是维持肠道健康与功能的基础^[26]。在本研究中,随着饲料中小球藻替代豆粕比例的增加,框鳞镜鲤的肠道组织形态得到了不同程度的改善。具体表现为,50%替代组的肠绒毛高度与肌层厚度均显著高于对照组,表明肠道吸收营养物质的表面积增大。这一促进作用与Li等^[27]在大口黑鲈(以鱼粉为基础料)中的发现相似,即适宜水平的微藻添加有助于维护甚至改善肠道组织结构。其可能机制在于,小球藻中富含的多糖类物质(如β-葡聚糖)可作为益生元,促进肠道有益菌群增殖;同时,其所含的抗氧化物质(如类胡萝卜素)增强了肠道抗氧化能力。尽管本研究替代的基础原料(豆粕)与大口黑鲈研究(鱼粉)不同,但结果均表明,在合理的添加比例下,小球藻作为一种功能性蛋白源,可改善鱼类肠道的组织结构和健康状况。

抗氧化防御机制是保护机体组织与器官免受氧化损伤的关键防御机制,对于机体的健康状况至关重要^[28]。T-AOC是反映机体总体抗氧化能力的指标,是机体酶类抗氧化系统及多种抗氧化剂共同

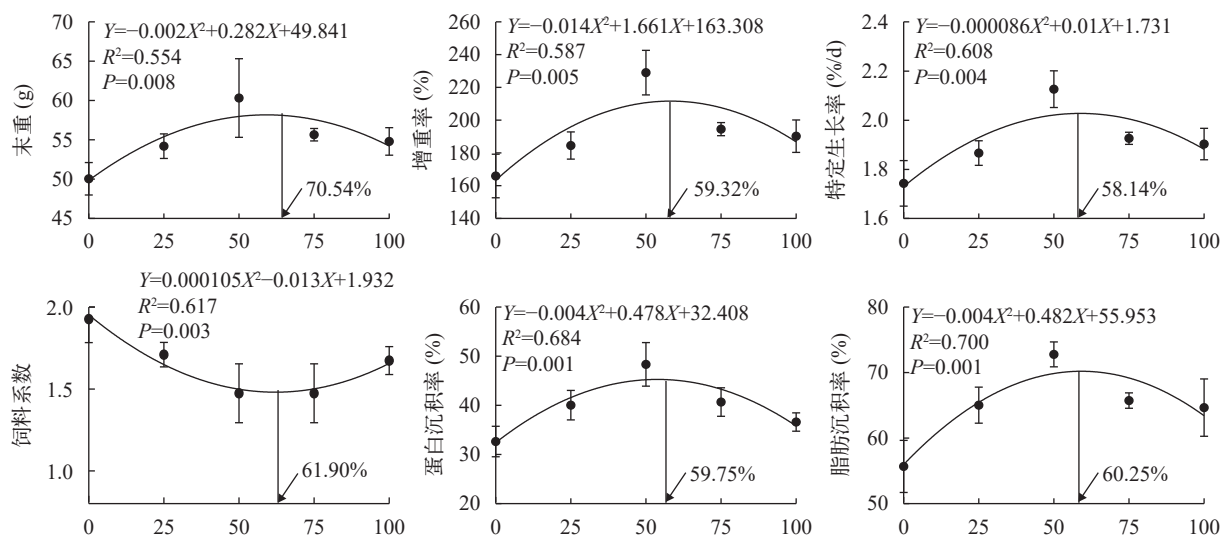


图9 基于框鳞镜鲤的生长性能二次回归分析

Fig. 9 Quadratic regression analysis of growth performance in mirror carp

a. 末重; b. 增重率; c. 特定生长率; d. 饲料系数; e. 蛋白沉积率; f. 脂肪沉积率

a. FBW; b. WGR; c. SGR; d. FCR; e. PRE; f. LRE

作用的体现^[29]。而SOD和CAT在清除机体活性氧(ROS)的过程中发挥着关键作用, SOD能够将ROS转化为H₂O₂, 然后再由CAT和GPX通过协同作用催化H₂O₂分解为H₂O和O₂^[30]。当抗氧化酶活性不足而无法代谢过多的ROS时, 会诱导脂质氧化^[31]。而MDA含量则是反映鱼类脂质过氧化程度的关键指标, 其水平的升高代表着脂质过氧化加剧^[29]。在小球藻部分替代豆粕时, 可提高肠道和肝脏T-AOC水平, 以及SOD和CAT活性, 而完全替代豆粕却增加了肠道和肝脏的MDA含量, 表明饲料中添加适量小球藻可提高鱼体的抗氧化能力, 而过量替代则会造成鱼体氧化应激。

肾脏是鱼类排泄与调节内稳态的关键器官。本研究结果显示, 小球藻部分替代豆粕, 框鳞镜鲤肾脏结构正常, 未发现病变。然而, 完全替代豆粕, 则造成肾小球肿大变形、肾小管结构紊乱及间质炎症浸润等明显病理损伤。以上结果与王扬等^[32]在崇仁麻鸡上得到的研究结论一致。这表明完全替代可能增加难消化物质负担, 诱发代谢应激和炎症反应, 最终导致作为主要排泄器官的肾脏发生结构损伤。

3.3 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肌肉品质的影响

鱼类肌肉品质由营养价值、色泽(肉色)、口感(质构特性)、风味等多方面因素共同决定, 也是消费者的主要关注点^[33]。鱼肉中营养物质(粗蛋白、粗脂肪、氨基酸和脂肪酸等)的含量直接反映其营养价值^[33]。本研究发现, 小球藻适量替代豆粕可显著提升全鱼和肌肉的粗蛋白和粗脂肪含量, 从而提升鱼体的营养价值。正如本研究前文所述, 当饲料蛋白供应充足, 且氨基酸组成匹配鱼类需求时, 肠道消化吸收的氨基酸会优先用于肌肉蛋白的合成, 从而增加了肌肉蛋白含量^[23]。此外, 小球藻替代豆粕, 增加了框鳞镜鲤肌肉中的EAA和NEAA。肌肉氨基酸含量的增加, 可能与小球藻的绝大多数氨基酸含量均高于豆粕有关。其次, 也与小球藻所含的氨基酸易于框鳞镜鲤消化吸收有关, 前人研究发现, 珍珠龙胆石斑鱼对小球藻所含的各种氨基酸表现消化率在测试的7种蛋白源(黄粉虫、黑水虻、乙醇梭菌蛋白、荚膜甲基球菌蛋白、小球藻、棉籽浓缩蛋白、秘鲁鱼粉)中最佳^[34]。氨基酸含量不仅决定了肌肉的营养价值, 还与肌肉的风味密切相关, 尤其是谷氨酸(Glu)、天冬氨酸(Asp)、丙氨酸(Ala)和甘氨酸(Gly)等鲜味氨基酸, 被视为贡献美味的关键呈味物质^[35]。此外, 鱼肉在烹饪加热过程中, 所含的氨基酸可参与美拉德反应, 生成大量挥

发性风味物质, 为鱼肉的特征风味形成做出重要贡献^[35]。本研究表明, 小球藻替代豆粕, 提高了框鳞镜鲤肌肉中游离Glu、Asp和Gly的含量, 表明小球藻替代豆粕可通过改变肌肉氨基酸组成, 从而提升肌肉的风味。肌肉中的脂肪酸组成和含量也是衡量其营养价值和风味的关键指标, 特别是PUFA, 其不仅是人体所需的重要营养物质, 也是肌肉风味产生的关键前体物质^[36]。此外, n-3 PUFA水平的提高可以增强机体的抗炎能力^[33]。本研究发现, 随着小球藻替代水平的增加, 提高了肌肉中的DHA (C22:6n-3)、n-3 PUFA的含量, 表明饲料中添加小球藻可提高框鳞镜鲤的营养价值、肌肉风味及抗炎能力。这与前人在草鱼、南美白对虾研究中的结果较为相似, 即小球藻无论替代草鱼饲料中的豆粕, 还是替代南美白对虾饲料中的鱼粉, 均可提高肌肉中的PUFA含量^[10, 33]。在水产动物摄食小球藻后, 肌肉中PUFA含量的增加, 与小球藻自身的脂肪酸营养组成密切相关, 前人研究表明, 小球藻的PUFA含量高达46.47%^[37]。

肉色是影响鱼类肌肉产品外观的重要因素, 与肌肉中沉积的类胡萝卜素含量密切相关^[12]。类胡萝卜素是鱼体内无法自身合成的一类色素, 必须依赖饲料供给^[38]。本研究发现框鳞镜鲤背部肌肉的黄色度值随着饲料中小球藻替代豆粕比例的增加而增加。这与在大口黑鲈^[12, 39]和草鱼^[33]中观察到的肌肉黄色度值随小球藻添加水平的增加显著增强的结论一致。其原因在于, 小球藻作为富含叶黄素等类胡萝卜素的微藻资源, 其富含叶黄素等类胡萝卜素经消化吸收后, 在肌肉中沉积, 从而改善了肌肉肉色, 而小球藻作为肉色增强剂在饲料中的应用潜力巨大^[12]。

质构特性是评价肌肉食用口感的核心指标, 通常包括硬度、弹性、咀嚼性等参数^[33]。本研究发现, 框鳞镜鲤摄食小球藻后, 其肌肉生肉的硬度、黏性、咀嚼性、胶着性、弹性、回复性得到了提升, 进一步通过主成分分析发现, CV50处理组在质构特性方面可与对照组、CV25、CV750、CV100处理组明显分开, 表明CV50处理组肌肉生肉质构特性明显优于其他处理组。与此同时, 本研究也发现, 框鳞镜鲤肌肉熟肉质构特性变化趋势与生肉质构特性具有高度一致性, 表明小球藻的添加可能增强了肌肉蛋白质的热稳定性, 使其在烹饪后仍能保持良好的质地。在草鱼的研究中也得到了与本研究类似的结果^[40]。鱼肉的质构特性与肌肉组织学特性(肌纤维密度和大小)密切相关, 肌肉硬度、咀嚼性及黏性随着肌纤维密度增加而增加^[33]。在本

研究中,发现所有添加小球藻处理组的肌纤维密度均高于对照组,而肌纤维直径(肌纤维大小)呈相反的趋势,该结果与肌肉质构特性的提升刚好相互印证。这也为解释框鳞镜鲤摄食小球藻后表现出更佳的硬度、咀嚼性与弹性等质构特性提供了解剖学依据。

3.4 小球藻替代饲料豆粕对框鳞镜鲤肠道菌群的影响

鱼类肠道是消化吸收营养物质和抵御病原体入侵的第一道屏障,是维持肠道健康与功能的基础,而肠道菌群则是促进肠道发挥营养物质消化吸收、抵御病害作用的重要保障^[41]。 α 多样性能够综合反映单一样本内部的物种组成复杂度和种群规模特征。在具体量化时,Shannon和Simpson指数主要用于评估菌群的物种分布均匀度与多样性层次,而Chao 1指数则专注于表征样本中微生物的种群数量丰度;而 β 多样性分析可反映肠道微生物群落的组成和功能差异。本研究发现,框鳞镜鲤肠道菌群的 α 多样性未受到饲料中是否添加小球藻的影响。而在 β 多样性分析中发现, CV50处理组肠道菌群与对照组和CV100处理组明显分离,独立成群,表明CV50处理组鱼体肠道群落的组成和功能与对照组和CV100处理组存在明显差异;而对照组与CV100处理组则相互交织重叠,则说明对照组与CV100处理组的肠道菌群在组成和功能极其相似。结合本研究鱼体的生长结果来看,对照组鱼体末重与CV100处理组无差异,但两个处理组的末重均显著低于CV50处理组,其原因很有可能是由鱼体肠道菌群 β 多样性的差异所致。进一步对肠道菌群组成进行门水平分析,发现变形菌门是框鳞镜鲤肠道中最主要的优势菌群,这与在河蟹(*Eriocheir sinensis*)中发现变形菌门在肠道菌群中占比较高,且在稳定肠道健康中发挥重要作用的结果较为一致^[42]。此外,前人研究发现变形菌门具有极强的蛋白质分解能力,能将饲料中的大分子蛋白质降解为小肽和氨基酸,提高鱼类肠道对饲料蛋白的消化吸收^[43]。在本研究中,虽然变形菌门的相对丰度在各组间无显著差异,但CV50处理组的变形菌门的丰度在所有处理组中最高; CV50组鱼体生长性能最佳,可能也与肠道中的变形菌门丰度最高有关。由于微藻中的细胞壁多糖结构复杂、惰性极强,水产动物无法依靠肠道消化酶来完成对细胞壁多糖的利用。但近期研究发现,疣微菌门细菌可消化藻类多糖^[44]。藻类多糖在抵抗病毒入侵、增强机体免疫能力和抗氧化能力方面发挥重要作用^[45]。本研究发现,疣微菌门的丰度在所有处理组中最高,且

显著高于CV100处理组,而CV50处理组鱼体健康状况最佳和抗氧化能力最强,可能就与肠道疣微菌门丰度增加导致鱼体对藻多糖的消化利用增多密切相关。一项关于健康与患病凡纳滨对虾肠道菌群分析的研究表明,与患病凡纳滨对虾相比,疣微菌门丰度在健康凡纳滨对虾肠道中显著升高^[46],这一结果进一步支持了本研究所提及的CV50组鱼体健康状况最佳和抗氧化能力最强与肠道疣微菌门丰度增加有关。

4 结论

本研究表明,小球藻完全替代饲料中的豆粕后对框鳞镜鲤的生长性能和肌肉品质无负面影响,但完全替代后可偶见框鳞镜鲤肝脏组织中出現少许空泡化及细胞核迁移至细胞边缘,且肾小球肿大变形、肾小管结构紊乱及间质炎症浸润等明显的病理损伤,表明小球藻过量替代饲料豆粕会对框鳞镜鲤肝脏和肾脏组织的健康造成负面影响。从框鳞镜鲤的末重、增重率、特定生长率、饲料系数、蛋白沉积率和脂肪沉积率的二次回归分析结果来看,饲料中小球藻替代豆粕的最适比例分别为70.54%、59.32%、58.14%、61.90%、59.75%和60.25%,相应的小球藻实际添加水平分别为17.49%、14.69%、14.42%、15.35%、14.82%和14.94%。因此,小球藻替代框鳞镜鲤饲料中豆粕的最适水平为58.14%—70.54%。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Jia S C, Li X Y, He W L, *et al.* Protein-Sourced Feedstuffs for Aquatic Animals in Nutrition Research and Aquaculture [M]. Cham: Springer International Publishing, 2022: 237-261.
- [2] Wang Y L, Wang C A, Lü W H, *et al.* Effects of dietary soybean meal replaced by extruded soybean on digestive enzyme activities and intestinal morphology of hybrid sturgeon (*Acipenser schrenckii* ♀ × *A. baerii* ♂) [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2024, 37(3): 66-73. [王亚玲, 王常安, 吕伟华, 等. 膨化大豆替代豆粕对杂交鲟(*Acipenser schrenckii* ♀ × *A. baerii* ♂)生长、消化酶活性及消化道形态的影响 [J]. 水产学杂志, 2024, 37(3): 66-73.]
- [3] Wang M, Yin Z H, Zeng M Y. Microalgae as a promising structure ingredient in food: Obtained by simple thermal and high-speed shearing homogenization [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022(131): 107743.
- [4] Tan T T, Li D L, Xi B, *et al.* Nutritional characteristics of *Chlorella* powder and its effects as a new nongrain protein source on growth performance, digestion,

- metabolism and immune function of aquaculture animal [J]. *Feed Industry*, 2025, **46**(15): 34-40. [谭彤彤, 李登来, 席贝, 等. 小球藻粉的营养特性及作为新型非粮蛋白源对水产养殖动物生长性能、消化代谢及免疫功能的影响 [J]. 饲料工业, 2025, **46**(15): 34-40.]
- [5] Yang Y, Zhang W, Liu Y N, *et al.* Research prospects of chlorella feeding application technology [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, **27**(23): 94-99. [杨义, 张威, 刘亚楠, 等. 小球藻饲料化应用技术研究展望 [J]. 安徽农学通报, 2021, **27**(23): 94-99.]
- [6] Li H D, Hu Z C, Liu S, *et al.* Influence of dietary soybean meal replacement with yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) on growth performance, antioxidant capacity, skin color, and flesh quality of mirror carp (*Cyprinus carpio* var. *specularis*) [J]. *Aquaculture*, 2022(561): 738686.
- [7] Gao J W, Deng X D, Zhai X X, *et al.* Application value and development prospect of microalgae [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(18): 151-155. [高景文, 邓晓东, 翟晓旭, 等. 微藻的应用价值及发展前景 [J]. 现代农业科技, 2024(18): 151-155.]
- [8] Gadzama I U, Ray S, Méité R, *et al.* *Chlorella vulgaris* as a livestock supplement and animal feed: A comprehensive review [J]. *Animals*, 2025, **15**(6): 879.
- [9] Mendes A R, Spínola M P, Lordelo M, *et al.* Assessing the influence of cumulative *Chlorella vulgaris* intake on broiler carcass traits, meat quality and oxidative stability [J]. *Foods*, 2024, **13**(17): 2753.
- [10] Pakravan S, Akbarzadeh A, Sajjadi M M, *et al.* *Chlorella vulgaris* meal improved growth performance, digestive enzyme activities, fatty acid composition and tolerance of hypoxia and ammonia stress in juvenile Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(1): 594-604.
- [11] Badwy T M, Ibrahim E M, Zeinhom M M. Partial Replacement of Fish Meal with Dried Microalga (*Chlorella* spp. and *Scenedesmus* spp.) in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Diets [C]. From the Pharaohs to the Future: Proceedings of the 8th International Symposium on Tilapia in Aquaculture, Cairo, Egypt, 2008: 801-811.
- [12] Xi L, Lu Q, Liu Y, *et al.* Effects of fish meal replacement with *Chlorella* meal on growth performance, pigmentation, and liver health of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Animal Nutrition*, 2022(10): 26-40.
- [13] Raji A A, Alaba P A, Yusuf H, *et al.* Fishmeal replacement with *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* in African catfish (*Clarias gariepinus*) diet: Effect on antioxidant enzyme activities and haematological parameters [J]. *Research in Veterinary Science*, 2018(119): 67-75.
- [14] Shi X, Luo Z, Huang C, *et al.* Effects of substituting *Chlorella* sp. for regular fishmeal on growth, body composition, hepatic lipid metabolism and histology in crucian carp *Carassius auratus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(3): 498-506. [石西, 罗智, 黄超, 等. 小球藻替代鱼粉对鲫生长、体组成、肝脏脂肪代谢及其组织学的影响 [J]. 水生生物学报, 2015, **39**(3): 498-506.]
- [15] Enyidi U. *Chlorella vulgaris* as protein source in the diets of African catfish *Clarias gariepinus* [J]. *Fishes*, 2017, **2**(4): 17.
- [16] Guccione A, Biondi N, Sampietro G, *et al.* *Chlorella* for protein and biofuels: from strain selection to outdoor cultivation in a Green Wall Panel photobioreactor [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2014, **7**(1): 84.
- [17] Xu W, Gao Z, Qi Z, *et al.* Effect of dietary *Chlorella* on the growth performance and physiological parameters of Gibel carp, *Carassius auratus gibelio* [J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, **14**(1): 53-57.
- [18] Kumar V, Habte-Tsion H M, Allen K M, *et al.* Replacement of fish oil with *Schizochytrium* meal and its impacts on the growth and lipid metabolism of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(6): 1769-1781.
- [19] Nagappan S, Das P, AbdulQuadir M, *et al.* Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture [J]. *Journal of Biotechnology*, 2021(341): 1-20.
- [20] Zhang P H, Zhang C, Yao X F, *et al.* Selenium yeast improve growth, serum biochemical indices, metabolic ability, antioxidant capacity and immunity in black carp *Mylopharyngodon piceus* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2024(146): 109414.
- [21] Yuan H G, An D, Xu Y Y, *et al.* Effects of dietary α -ketoglutarate preparation on growth performance, digestion and metabolism of broilers [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, **50**(16): 174-179. [袁华根, 安东, 徐亚亚, 等. 日粮添加 α -酮戊二酸制剂对肉鸡生长性能及消化、代谢的影响 [J]. 江苏农业科学, 2022, **50**(16): 174-179.]
- [22] Huang X Y, Liu G H, Yan H J, *et al.* Effects of dynamic segmentation dietary nutrient supply on performance, meat quality, utilization of nitrogen and phosphorus and serum biochemical indexes of broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, **28**(11): 3445-3452. [黄向阳, 刘国华, 闫海洁, 等. 动态细分饲粮营养供给对肉鸡生产性能、肉品质、氮与磷代谢率及血清生化指标的影响 [J]. 动物营养学报, 2016, **28**(11): 3445-3452.]
- [23] Fei S Z, Kang J M, Zhang J H, *et al.* Influences of low protein diet supplemented with essential amino acids on growth performance, muscle amino acid composition, plasma biochemical indexes and expression of amino acid metabolism-related genes in liver of juvenile blotched snakehead (*Channa maculata*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, **36**(12): 7930-7942. [费树站, 康茄敏, 张军豪, 等. 低蛋白质饲料中补充必需氨基酸对斑鳢幼鱼生长性能、肌肉氨基酸组成、血浆生化指标及肝脏氨基酸代谢相关基因表达的影响 [J]. 动物营养学报, 2024, **36**(12): 7930-7942.]
- [24] Huang B C. Research on substitution of fish meal in

- Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂ by *Hermetia illucens* larva meal, *Chlorella* meal and *Clostridium autoethanogenum* protein [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2022: 35-37. [黄博丞. 利用黑水虻幼虫粉、小球藻粉和乙醇梭菌蛋白替代珍珠龙胆石斑鱼饲料鱼粉的研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2022: 35-37.]
- [25] Chen W, Luo L, Han D, *et al.* Effect of dietary supplementation with *Chlorella sorokiniana* meal on the growth performance, antioxidant status, and immune response of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2021, **33**(5): 3113-3122.
- [26] Liu Y, Chen Z, Dai J, *et al.* Sodium butyrate supplementation in high-soybean meal diets for turbot (*Scophthalmus maximus* L.): Effects on inflammatory status, mucosal barriers and microbiota in the intestine [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019(88): 65-75.
- [27] Li L K, Liu X J, Wang Y, *et al.* Effects of alternate feeding between fish meal and novel protein diets on the intestinal health of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(23): 101023.
- [28] Wu Z, Yu X, Chen P, *et al.* Dietary *Clostridium autoethanogenum* protein has dose-dependent influence on the gut microbiota, immunity, inflammation and disease resistance of abalone *Haliotis discus hannai* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2024(151): 109737.
- [29] Wang T, Xu H C, Li H, *et al.* Effects of dietary supplementation with different levels of lysozyme on growth performance, immune function, antioxidant capacity, intestinal short-chain fatty acids contents and microbial flora of yellow-feathered broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2026, **38**(3): 1900-1910. [汪涛, 徐灏铖, 李慧, 等. 饲料中添加不同水平溶菌酶对黄羽肉鸡生长性能、免疫功能、抗氧化能力、肠道短链脂肪酸含量及微生物区系的影响 [J]. 动物营养学报, 2026, **38**(3): 1900-1910.]
- [30] He Y, Yu H D, Zhang Z Y, *et al.* Effects of chronic hypoxia on growth performance, antioxidant capacity and protein turnover of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture*, 2022(561): 738673.
- [31] Klykken C, Reed A K, Dalum A S, *et al.* Physiological changes observed in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) with nephrocalcinosis [J]. *Aquaculture*, 2022(554): 738104.
- [32] Wang Y, Guo X Y, Zhang D W, *et al.* Study on the toxicity of cyanobacteria powder added to diet on Chongren Ma chicken [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2019(16): 116-119. [王扬, 郭啸远, 张大文, 等. 日粮中添加蓝藻粉对崇仁麻鸡的毒理作用研究 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019(16): 116-119.]
- [33] Liu S. Effects of soybean meal replacement with *Chlorella* meal and addition of yeast selenium on growth performance, health status and flesh quality of grass carp, *Ctenopharyngodon idellus* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023: 1-28. [刘莎. 日粮中小球藻替代豆粕及添加酵母硒对草鱼生长性能、健康状况及肌肉品质的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023: 1-28.]
- [34] Zheng C Z, Cao J M, Dong X H, *et al.* Apparent digestibility coefficients of seven protein sources for juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(2): 257-268. [郑朝中, 曹俊明, 董晓慧, 等. 珍珠龙胆石斑鱼对7种蛋白源的表现消化率 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(2): 257-268.]
- [35] De Oliveira F C, Coimbra J S, De Oliveira E B, *et al.* Food protein-polysaccharide conjugates obtained via the Maillard reaction: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, **56**(7): 1108-1125.
- [36] Narayan B, Miyashita K, Hosakawa M. Physiological effects of eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA)—A review [J]. *Food Reviews International*, 2006, **22**(3): 291-307.
- [37] López G, Yate C, Ramos A F, *et al.* Production of polyunsaturated fatty acids and lipids from autotrophic, mixotrophic and heterotrophic cultivation of *Galdieria* sp. strain USBA-GBX-832 [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 10791.
- [38] Li B J, Chen L, Yan M Z, *et al.* Integrative transcriptomics and metabolomics analysis of body color formation in the common carp [J]. *Aquaculture*, 2024(579): 740143.
- [39] Yu H, Liang H L, Ge X P, *et al.* Dietary *Chlorella* (*Chlorella vulgaris*) supplementation effectively improves body color, alleviates muscle inflammation and inhibits apoptosis in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022(127): 140-147.
- [40] Zhao H H, Chong J, Tang R, *et al.* Metabolomics investigation of dietary effects on flesh quality in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *GigaScience*, 2018, **7**(10): giy111.
- [41] Ai Y R, Hu Y, Zhang J Z, *et al.* Sodium butyrate addition to low fishmeal diets on growth performance, serum immunity, and intestinal health of catfish *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(11): 82-93. [艾业睿, 胡毅, 张俊智, 等. 低鱼粉饲料中添加丁酸钠对黄颡鱼生长性能、血清免疫及肠道健康的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, **49**(11): 82-93.]
- [42] Wang C H, Zhou Y F, Fang D A, *et al.* Effects of starvation and refeeding on intestinal microflora of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(4): 748-756. [王晨赫, 周彦锋, 方弟安, 等. 饥饿与重摄食对河蟹肠道菌群结构的影响 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(4): 748-756.]
- [43] Hossain T J, Das M, Ali F, *et al.* Substrate preferences, phylogenetic and biochemical properties of proteolytic bacteria present in the digestive tract of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *AIMS Microbiology*, 2021, **7**(4): 528-545.

- [44] Sichert A, Corzett C H, Schechter M S, *et al.* *Verrucomicrobia* use hundreds of enzymes to digest the algal polysaccharide fucoidan [J]. *Nature Microbiology*, 2020, **5**(8): 1026-1039.
- [45] Patel A K, Vadrade A P, Singhanian R R, *et al.* Algal polysaccharides: current status and future prospects [J]. *Phytochemistry Reviews*, 2023, **22**(4): 1167-1196.
- [46] Yu W N, Dai W F, Tao Z, *et al.* Characterizing the compositional and functional structures of intestinal micro-flora between healthy and diseased *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, **42**(3): 399-409. [郁维娜, 戴文芳, 陶震, 等. 健康与患病凡纳滨对虾肠道菌群结构及功能差异研究 [J]. 水产学报, 2018, **42**(3): 399-409.]

DIETARY SOYBEAN MEAL WITH CHLORELLA ON GROWTH PERFORMANCE, MUSCLE QUALITY, AND INTESTINAL FLORA OF MIRROR CARP (*CYPRINUS CARPIO* VAR. *SPECULARIS*)

TANG Li, JIA Lu-Yao, SUN Jian, JI Hong, YU Hai-Bo and LI Han-Dong

(College of Animal Science and Technology, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To investigate the effects of substituting dietary soybean meal with *Chlorella* on growth performance, muscle quality, and intestinal microbiota of mirror carp (*Cyprinus carpio* var. *specularis*), five experimental diets were formulated by replacing dietary 0, 25%, 50%, 75%, and 100% of soybean meal with *Chlorella*, which named CV0 (Control), CV25, CV50, CV75, and CV100, respectively. The mirror carp with an initial body weight of (20.00±0.01) g were fed five experimental diets for 60d. The results showed that compared with the CV0, the final body weight in CV50 and CV75 groups, the weight gain rate in CV50, CV75 and CV100 groups, the specific growth rate and lipid retention efficiency in CV25, CV50, CV75 and CV100 groups, as well as the protein retention efficiency in CV25, CV50 and CV75 groups were significantly increased ($P<0.05$). The activities of α -amylase, trypsin and lipase in the intestine of CV50 group were significantly higher than those in the CV0 ($P<0.05$). Meanwhile, the villus height and muscularis thickness of intestine CV25 and CV50 groups were also significantly increased ($P<0.05$). In terms of health status, replacing dietary 50% soybean meal with *Chlorella* significantly increased the T-AOC levels and SOD activity in both liver and intestine ($P<0.05$), while also markedly reducing liver MDA level ($P<0.05$). Meanwhile, intestinal CAT activity was seriously enhanced in the CV25 and CV50 groups ($P<0.05$). Compared with the control group, the CV50 group showed obviously increased serum alkaline phosphatase levels, while serum alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase levels were significantly declined ($P<0.05$). Pathological damage was observed in both liver and kidney tissues in the CV100 group. In terms of muscle quality, substituting 50% dietary soybean meal with *Chlorella* significantly improved the nutritional value of fish by increasing the crude protein and crude lipid level in both whole body and muscle, as well as the muscle NEAA, EAA, and PUFA level ($P<0.05$). Principal component analysis of muscle texture characteristics showed that the CV50 group exhibited superior texture properties compared to other groups, indicating that replacing dietary 50% soybean meal with *Chlorella* improved muscle texture. Additionally, replacing 50%, 75%, and 100% of soybean meal with *Chlorella* increased muscle redness and yellowness ($P<0.05$). The 50% dietary soybean meal was substituted by *Chlorella* elevated the relative abundance of dominant intestinal microbiota (*Proteobacteria* and *Verrucomicrobiota*). The quadratic regression analysis based on growth performance indicated that the optimal replacement level of soybean meal with *Chlorella* was 58.14%—70.54%. In conclusion, complete replacement of soybean meal with *Chlorella* had no negative effects on the growth performance of mirror carp, but caused damage to liver and kidney tissues. However, appropriate replacement of soybean meal with *Chlorella* promoted the growth, improved muscle quality of mirror carp, with the optimal replacement level being 58.14%—70.54%.

Key words: Soybean meal; *Chlorella*; New protein source; Growth performance; Muscle quality; Intestinal flora; *Cyprinus carpio* var. *specularis*