



饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼生长性能、 抗氧化能力和脂肪代谢的影响

胡颂钦¹, 林 艳², 史秀兰¹, 迟长虹¹, 严 盈¹,
缪凌鸿^{1,2}, 董在杰^{1,2*}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081)

摘要: 为探讨饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼生长性能、抗氧化能力和脂代谢的影响, 实验选取 240 尾初始体重为 (3.85±0.50) g 的团头鲂幼鱼, 随机分为 4 组, 每组 3 个重复, 每重复 20 尾鱼。各组分别投喂串叶松香草添加水平为 0% (对照组)、2%、4% 和 6% 的实验饲料, 饲喂 8 周后测定鱼体生长性能、肌肉组成、血液生化、肝肠抗氧化和肝脏脂代谢相关基因表达。结果显示, 相较于对照组, 4% 和 6% 串叶松香草组的增重率、特定生长率显著下降, 6% 组的终末均重显著降低, 饵料系数显著增加。在抗氧化能力方面, 2% 串叶松香草组鱼体肠道过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性显著高于对照组。在脂肪沉积和代谢方面, 4% 和 6% 串叶松香草组鱼体肌肉粗脂肪含量显著高于对照组。4% 和 6% 串叶松香草组肠道脂肪酶活性显著低于对照组。6% 串叶松香草组血清中的甘油三酯 (TG)、胆固醇 (TC)、高密度脂蛋白 (HDL)、低密度脂蛋白 (LDL) 均显著高于对照组。4% 和 6% 串叶松香草组肝脏中脂肪合成基因 *fas*、*srebp1c* 的表达量显著升高。同时, 6% 串叶松香草组肝脏中脂肪分解基因 *lpl*、*cpt1a*、*pparβ* 的表达量显著下降。CCl₄ 溶液腹腔注射应激 96 h 后 2% 串叶松香草组累积死亡率低于对照组, 且应激 24 h 后鱼体肝脏 SOD 活性显著高于对照组。研究表明, 在饲料中添加 2% 的串叶松香草对团头鲂幼鱼的生长和饲料利用无不利影响, 并且能够提高肠道的抗氧化能力, 而当添加量增加至 4% 和 6% 时会抑制鱼体生长, 并引起团头鲂幼鱼脂肪沉积。本研究结果为串叶松香草在水产动物饲料中的应用提供了参考。

关键词: 团头鲂; 串叶松香草; 生长性能; 抗氧化能力; 脂代谢

中图分类号: S 965.119

文献标志码: A

随着我国水产养殖业的快速发展, 水产品提供的动物蛋白占人均动物蛋白消费量的 1/3 以上, 为国民的粮食保障作出了重要贡献^[1]。但是, 水产养殖的可持续发展正面临着原料资源短缺和健康养殖两大重要问题。在大宗淡水鱼饲料中, 鱼粉、豆粕、棉粕、菜粕等植物性原料是主要的蛋

白来源^[2]。鱼粉是饲料行业重要的原料, 其蛋白含量高、氨基酸平衡且适口性好, 被广泛应用于水产动物饲料配方中^[3]。豆粕作为第一植物蛋白, 由于其产量受种植面积的限制, 我国豆粕产需缺口较大, 因此严重依赖于进口。菜粕价格低廉, 是水产饲料的重要原料, 但由于其存在抗营养因

收稿日期: 2023-08-23 修回日期: 2023-10-29

资助项目: 现代农业产业技术体系 (CARS-45); 江苏省研究生科研与实践创新计划 (SJCX22_0212)

第一作者: 胡颂钦 (照片), 从事水产动物遗传育种与健康养殖研究, E-mail: 1353341632@qq.com

通信作者: 董在杰, 从事水产遗传育种、繁殖及分子生物学研究, E-mail: dongzj@ffrc.cn



子, 影响水产动物对饲料的利用率^[4]。为了避免水产动物与人争粮, 寻求新饲料原料成为当前水产养殖健康发展的重要方向。

串叶松香草 (*Silphium perfoliatum*) 又名松香草, 为菊科 (Asteraceae) 松香草属 (*Silphium*) 植物, 适应我国盐碱化、沙漠化土壤种植, 具有“不与粮争地”的种植优势^[5]。串叶松香草根系强壮、支根繁多, 高度通常为 2~3 m。有实心茎质、宽大叶片, 叶色为深绿色。开有头状花序, 形似菊芋花序, 花盘直径约为 2~3 cm^[5]。串叶松香草中生物活性成分丰富, 富含生物碱、核黄素、黄酮类和抗氧化酶等物质, 具有良好的药用价值^[6-7]。近年来, 有关其提取物 (如多糖、核黄素、黄酮等生物活性物质) 的抗氧化和免疫促进的功能性研究越来越多^[8-9]。在畜禽动物中, 新鲜的串叶松香草可以替代目前使用的玉米青贮饲料, 是一种潜在的饲料原料。因其具有产量高、草质好、适应性广、抗逆性强等特点, 已成为多种动物青饲料的主要来源^[10]。胡利珍等^[11]用串叶松香草饲喂兴国灰鹅, 能显著降低生产成本。许美解等^[12]用串叶松香草替代 10%、20%、30% 的基础饲料饲喂特种野猪, 发现 20% 替代组的生长性能与对照组相比无显著差异, 而 30% 的替代会对其生长产生负效应。目前, 有关串叶松香草在水产动物中的应用研究尚处空白, 但已有研究报道了同类菊科植物在水产动物饲料中的应用。黄金鲤 (*Yamabaki ogon*) 饲料中添加 0.04% 的万寿菊 (*Tagetes erecta*) 粉能显著改善其生长性能^[13]。暗纹东方鲀 (*Takifugu obscurus*) 幼鱼饲料中添加 0.5% 菊粉对其生长性能无负面影响, 但可增强消化酶活性与非特异性免疫酶活性^[14]。团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 是我国特有的杂食性经济鱼类, 其生长速率快、肉质鲜美, 2021 年全国养殖产量达到了 76.4 万 t^[15]。因此, 本实验以团头鲂幼鱼为对象, 根据其营养需求^[16]和串叶松香草的营养组成, 设置串叶松香草在团头鲂饲料中的添加水平分别为 0%、2%、4%、6%, 通过分析团头鲂幼鱼的生长、抗氧化能力等指标, 评估串叶松香草作为水产动物饲料原料的可能性, 为保障水产饲料行业多元化健康发展提供支撑。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

本实验所用串叶松香草粉为串叶松香草植株茎叶风干后粉碎而成。实验饲料以鱼粉、豆粕、

菜粕、棉粕为主要蛋白源, 以豆油为脂肪源配制基础饲料。在此基础上, 添加 0%、2%、4%、6% 的串叶松香草粉, 配制成 4 组等氮等能的饲料, 分别命名为 SP0、SP2、SP4 和 SP6 组 (饲料配方及营养组成见表 1)。配方中的原料过 60 目筛, 逐级放大混匀后, 与大豆油、水混合, 制成颗粒状饲料, 自然风干后, -15 °C 密封保存备用。

1.2 实验鱼及养殖实验

实验期间, 操作者严格遵循实验动物福利伦理规范, 并按中国水产科学研究院淡水渔业研究中心学术委员会制定的规章制度执行。本实验选用来自于团头鲂良种场的“华海 1 号”(湖北武汉), 首先在中国水产科学研究院淡水渔业研究中心南泉基地可控温的循环水养殖系统中暂养, 暂养期间投喂商品饲料 (通威, 无锡)。暂养 1 周后, 挑选大小均一、体质健壮、初始体重为 (3.85±0.50) g 的团头鲂 240 尾进行养殖实验。将实验鱼分到 12 个可控温循环水桶 (规格为 φ820 mm×700 mm) 中, 随机分为 4 个实验组, 每组设定 3 个重复, 每个重复 20 尾鱼。每日 3 次 (7: 00、12: 00 和 18: 00) 按照总体重的 3%~5% 定量饲喂, 使鱼体表观饱食而无饲料剩余, 养殖 8 周。养殖水质: 水温 26~28 °C, 溶解氧>6.0 mg/L, pH 6.5~7.0, 氨氮含量<0.10 mg/L, 亚硝酸氮<0.10 mg/L。

1.3 样本采集

养殖实验结束后, 禁食 24 h。用丁香油快速麻醉后计数并称量总重, 随后, 每一养殖桶中随机捞取 6 尾, 测量体长并称重, 用于计算生长性能和个体指数。采用 1 mL 的一次性无菌注射器在尾部静脉处取血, 取血液样品于抗凝管中 4 °C 下静置, 离心分离血浆, 用于血浆生化指标测定。随后, 快速剖开腹腔, 将内脏团、肝脏、肠道等组织分离, 再将内脏团和肝脏称重。将肝脏和肠道组织置于离心管中, -20 °C 低温保存, 用于测定肝肠抗氧化指标与肠道消化酶指标。另取部分肝脏组织放入液氮低温冷冻, 后将其放置 -80 °C 进行保存。最后, 取实验鱼背部无鳞肌肉, -20 °C 低温保存, 进行肌肉营养成分检测。

1.4 肝脏急性氧化损伤应激实验

50% CCl₄ 溶液按照 CCl₄ (分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司) 与橄榄油 (化学纯, 上海源叶生物科技有限公司) 1:1 (体积比) 配制, 现用

表 1 饲料配方及营养组成

Tab. 1 Formulation and proximate composition of the diets

项目 items	组别 groups			
	SP0 (对照组) control group	SP2	SP4	SP6
饲料组成/% ingredient				
串叶松香草 silphium ¹⁾	0.00	2.00	4.00	6.00
鱼粉 fishmeal ²⁾	4.00	4.00	4.00	4.00
豆粕 soybean meal ²⁾	25.00	25.00	25.00	25.00
菜粕 cottonseed meal ²⁾	18.00	17.50	17.20	16.80
棉粕 rapeseed meal ²⁾	8.00	8.00	8.00	8.00
棉籽蛋白 cottonseed protein concentrate ³⁾	4.00	4.00	4.00	4.00
小麦粉 wheat starch	18.00	17.00	16.00	15.00
米糠 rice bran	10.00	10.00	10.00	10.00
豆油 soybean oil ⁴⁾	3.00	3.00	3.00	3.00
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.00	1.00	1.00	1.00
矿物质预混料 mineral premix ⁵⁾	0.50	0.50	0.50	0.50
维生素预混料 vitamin premix ⁵⁾	0.50	0.50	0.50	0.50
维生素C vitamin C	0.50	0.50	0.50	0.50
氯化胆碱 choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	4.50	4.00	3.30	2.70
膨润土 bentonite	2.00	2.00	2.00	2.00
诱食剂 phagostimulant	0.50	0.50	0.50	0.50
合计 total	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 (风干基础) nutrients composition (natural dry basis)				
总能/(kJ/kg) gross energy	21.21	20.84	20.25	20.73
水分/% moisture	10.58	11.31	11.78	10.73
粗蛋白/% crude protein	31.49	30.55	30.52	30.25
粗脂肪/% crude lipid	5.97	5.85	5.99	5.60

注: 1)由南京天香菊生物技术有限公司提供。串叶松香草粉(g/kg)含: 干物质, 924.57 g; 粗蛋白, 218.87 g; 粗脂肪, 137.39 g; 粗灰分, 151.80 g; 水分, 75.43 g; 酸性洗涤不溶蛋白, 15 g; 中性洗涤不溶蛋白, 56 g; 酸性洗涤纤维, 318 g; 无灰分中性洗涤纤维, 398 g; 非纤维碳水化合物, 55 g; 木质素, 117 g; 淀粉, 69 g; 钙, 20.1 g; 磷, 2.8 g; 镁, 3.5 g; 钾, 24.6 g; 硫, 1.7 g; 氯, 3.7 g; 氮, 3.7 g。2)由通威股份有限公司(中国, 无锡)提供; 3)由金兰股份有限公司(中国, 新疆)提供; 4)购买自商品福临门大豆油; 5)由无锡华诺威动物保健品有限公司(中国, 无锡)提供。维生素预混料(IU/kg或mg/kg)包括维生素A, 900 000 IU; 维生素D, 25 000 IU; 维生素E, 4 500 mg; 维生素K₃, 220 mg; 维生素B₁, 320 mg; 维生素B₂, 1 090 mg; 维生素B₅, 2 000 mg; 维生素B₆, 5 000 mg; 维生素B₁₂, 116 mg; 泛酸, 1 000 mg; 叶酸, 165 mg; 胆碱, 60 000 mg; 生物素, 50 mg; 烟酸, 2 500 mg; 矿物质预混料(g/kg)包含: 二磷酸钙20 g; 氯化钠2.6 g; 氯化钾5 g; 硫酸镁2 g; 硫酸亚铁0.9 g; 硫酸锌0.06 g; 硫酸铜0.02 g; 硫酸锰0.03 g; 氯化钴0.05 g; 碘化钾0.004 g。

Notes: 1) Obtained from Nanjing Tian Xiang Ju Biotechnology Co., Ltd. (Nanjing, China). *S. perfoliatum* pollen (g/kg): dry matter, 924.57 g; crude protein, 218.87 g; ether extract, 137.39 g; crude ash, 151.80 g; moisture, 75.43 g; ADICP, 15 g; NDICP, 56 g; ADF, 318 g; aNDFom, 398 g; NFC, 55 g; lignin, 117 g; starch, 69 g; Ca, 20.1 g; P, 2.8 g; Mg, 3.5 g; K, 24.6 g; S, 1.7 g; Cl, 3.7 g; NH₃, 3.7 g. 2) Obtained from Wuxi Tongwei feedstuffs Co., Ltd. (Wuxi, China). 3) Obtained from Xinjiang Jinlan Co., Ltd. (Xinjiang, China). 4) Purchased from commodity Fulinmen soybean oil. 5) Provided by Wuxi Hanove Animal Health Products Co., Ltd. (Wuxi, China). Vitamin (IU/kg or mg/kg of premix), vitamin A, 900 000 IU; vitamin D, 25 000 IU; vitamin E, 4 500 mg; vitamin K₃, 220 mg; vitamin B₁, 320 mg; vitamin B₂, 1 090 mg; vitamin B₅, 2 000 mg; vitamin B₆, 5 000 mg; vitamin B₁₂, 116 mg; pantothenic acid, 1 000 mg; folic acid, 165 mg; choline, 60 000 mg; biotin, 50 mg; niacin, 2 500 mg; Mineral premix composition (g/kg of premix): calcium diphosphate, 20 g; sodium chloride, 2.6 g; potassium chloride, 5 g; magnesium sulfate, 2 g; ferrous sulfate, 0.9 g; zinc sulfate, 0.06 g; cupric sulfate, 0.02 g; manganese sulfate, 0.03 g; cobalt chloride, 0.05 g; potassium iodide, 0.004 g.

现配, 并经过超微过滤确保无菌。养殖实验结束后, 在各养殖桶中随机捞出 12 尾实验鱼, 用丁香油快速麻醉后, 按照每 100 g 鱼体重腹腔注射 0.5 mL 50% CCl₄ 溶液, 诱导急性肝损伤。在注射 CCl₄ 溶液 24 h 后, 从每个养殖桶中随机捞取 3 尾, 采取其肝脏组织检测其抗氧化指标, 并制作组织

切片进行病理学观察。同时, 注射后 0、6、9、12、24、48、72 和 96 h 统计鱼的死亡数量。

1.5 检测指标

生长指标计算 生长性能指标按以下公式进行计算:

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

特定生长率 (SGR, %/d)=($\ln W_t - \ln W_0$)/ $t \times 100\%$

饵料系数 (FCR)= $F/(W_t - W_0)$

肝体比 (HSI, %)=(G_1/W_b) $\times 100\%$

脏体比 (VSI, %)=(G_2/W_b) $\times 100\%$

肥满度 (CF, g/cm³)= $W_b/L^3 \times 100$

式中, W_0 为鱼初始均重 (g); W_t 为鱼终末均重 (g); t 为饲喂天数 (d); F 为每尾鱼平均摄食饲料总量 (风干基础) (g); G_1 为实验末鱼肝脏重 (g); G_2 为实验末鱼内脏团重 (g); W_b 为每尾鱼末体重 (g); L 为每尾鱼末体长 (cm);

常规营养成分测定 肌肉营养成分参照国标规定方法进行测定, 采用常压干燥法 (GB/T 6435—2014) 测定水分含量, 采用凯氏定氮法 (GB/T 6432—2018) 测定粗蛋白质含量, 采用索氏抽提法 (GB/T 6433—2006) 测定粗脂肪含量, 采用马弗炉 550 °C 灼烧法 (GB/T 6438—2007) 测灰分含量。

血浆生化指标测定 血浆葡萄糖 (glucose, GLU)、总胆固醇 (cholesterol, TC)、甘油三酯 (triglycerides, TG)、高密度脂蛋白 (high-density lipoprotein, HDL) 及低密度脂蛋白 (low-density lipoprotein, LDL) 含量采用深圳迈瑞全自动生化分析仪 (BS-400 Q2080) 测定, 试剂盒购自深圳迈瑞有限公司。

组织抗氧化酶活性测定 分别将肝脏、肠道样品与无菌生理盐水按质量体积比 1 : 9 匀浆后离心, 收集上清液, 制备 10% 组织匀浆液, 用于肝脏、肠道抗氧化指标测定。过氧化氢酶 (CAT) 活性、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、丙二醛

(MDA) 含量的测定采用南京建成生物工程研究所的试剂盒, 详细测定方法见说明书。

肠道消化酶活性测定 将肠道样品与无菌生理盐水按质量体积比 1 : 9 匀浆后离心, 收集上清液, 制备 10% 组织匀浆液, 用于肠道消化酶活性指标测定。 α -淀粉酶 (AMS) 活性、胰蛋白酶 (tTPS) 活性、脂肪酶 (LPS) 活性的测定均采用南京建成生物工程研究所的试剂盒, 详细测定方法见说明书。

基因相对表达量测定 使用 Trizol 法提取团头鲂肝脏组织中总 RNA, 用 NanoDrop 2000 (Thermo Fisher Scientific, 美国) 测定 RNA 浓度和质量, 选择 OD_{260nm}/OD_{280nm} 值在 1.8~2.0 之间的 RNA, 利用 PrimeScript™ RT reagent Kit with gDNA Eraser 反转录试剂盒 (TaKaRa) (大连) 合成 cDNA。使用 TB Green® Premix Ex Taq™ II 两步法试剂盒 (TaKaRa) (大连) 进行 RT-PCR 反应 (Biorad CFX96) (美国)。荧光定量程序: 95 °C 30 s, 95 °C 5 s, 60 °C 30 s (39 个循环); 95 °C 10 s, 60 °C 60 s, 95 °C 10 s。基因 mRNA 相对表达水平用 2^{- $\Delta\Delta C_t$} 方法来计算。

用 qPCR 测定肝脏中脂蛋白脂酶 (*lpl*)、脂肪合成酶 (*fas*)、过氧化物酶体增殖物激活受体 α (*ppara*)、过氧化物酶体增殖物激活受体 β (*ppar β*)、肝脏固醇调节元件结合蛋白 1c (*srebp1c*) 和肉毒碱棕榈酰基转移酶 1a (*cpt1a*) 的基因表达量, 以团头鲂 β -肌动蛋白 (*β -actin*) (XM_048192430.1) 为内参基因, 引物序列见表 2。引物均由上海生工生物工程股份有限公司合成。

表 2 RT-PCR 的引物序列

Tab. 2 Primer sequences of RT-PCR

引物 primers	序列信息 sequence information(5'-3')	基因序号 genebank no.	扩增片段长度/bp amplification length
β -肌动蛋白 <i>β-actin</i>	F:TCGTCCACCGCAAATGCTTCTA R:CCGTCACCTTCACCGTTCCAGT	XM_048192430.1	152
脂蛋白脂肪酶 <i>lpl</i>	F:TCTGATGGGATCTGGCAC R:GTTTCTGGATTGGGTCG	XM_048164066.1	85
脂肪合成酶 <i>fas</i>	F:GAATGGGCCGTAGCTGATG R:TGAGCAAGCGAGACACAC	XM_048171583.1	102
过氧化物酶体增殖物激活受体 α <i>ppara</i>	F:GTGCCAATACTGTCGCTTTCAG R:CCGCCTTAACCTCAGCTTCT	XM_048158021.1	104
过氧化物酶体增殖物激活受体 β <i>pparβ</i>	F:CATCTCACGGCAAGAC R:TGGCAGCGGTAGAAGACA	XM_048209548.1	150
肝脏固醇调节元件结合蛋白 1c <i>srebp1c</i>	F:TGCTGGCGTGTCTGCTATCT R:TGTTGGCAGTCGTGGAGG	XM_048187188.1	126
肉毒碱棕榈酰基转移酶 1a <i>cpt1a</i>	F:TACTTCCAAAGCGGTGAG R:AGAGGTATTGTCCGAGCC	XM_048158345.1	142

1.6 数据分析

实验数据用 SPSS 26.0 软件进行统计分析, 数据均符合正态分布和方差齐性检验, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 进行 Duncan 氏多重比较检验, $P < 0.05$ 为差异显著, 所有结果均以平均值 \pm 标准误表示。

2 结果

2.1 饲料中添加串叶松香草对团头鲂生长和脏器系数的影响

养殖实验期间, 各组团头鲂摄食正常, 无疾

病和死亡现象。随着串叶松香草添加量的增加, 生长性能呈下降趋势, 且饵料系数上升 (表 3)。其中, SP2 组 FBW、WGR、SGR 和 FCR 与 SP0 组相比均无显著差异 ($P > 0.05$); SP4 组的 FBW 与 FCR 与 SP0 组相比无显著差异 ($P > 0.05$), 而 WGR、SGR 均显著降低 ($P < 0.05$); SP6 组的 FBW、WGR、SGR 均显著低于 SP0 组 ($P < 0.05$), 且 FCR 显著高于其他各组 ($P < 0.05$)。从形态学指标上看, SP0 组团头鲂幼鱼 VSI 均显著降低 ($P < 0.05$), SP2 组鱼体 CF 显著低于其他各组 ($P < 0.05$), 各组间 HSI 无显著差异。

表 3 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼生长和脏器系数的影响

Tab. 3 Effects of dietary *S. perfoliatum* on growth and visceral index of juvenile *M. amblycephala*

项目 items	组别 groups			
	SP0 (对照组) control group	SP2	SP4	SP6
生长和饲料利用 growth and feed utilization				
初始均重/g IBW	3.77 \pm 0.12	3.78 \pm 0.10	3.80 \pm 0.10	3.78 \pm 0.09
终末均重/g FBW	14.42 \pm 0.32 ^b	13.82 \pm 0.24 ^b	13.41 \pm 0.38 ^{ab}	12.55 \pm 0.34 ^a
增重率/% WGR	283.49 \pm 14.39 ^c	265.51 \pm 6.50 ^{bc}	253.16 \pm 7.47 ^{ab}	231.70 \pm 2.27 ^a
特定增长率/(%/d) SGR	2.53 \pm 0.07 ^c	2.44 \pm 0.03 ^{bc}	2.38 \pm 0.04 ^{ab}	2.26 \pm 0.01 ^a
饵料系数 FCR	1.79 \pm 0.03 ^a	1.79 \pm 0.07 ^a	1.90 \pm 0.07 ^a	2.13 \pm 0.08 ^b
脏器系数 visceral index				
肥满度/(g/cm ³) CF	2.42 \pm 0.04 ^b	2.31 \pm 0.05 ^a	2.44 \pm 0.03 ^b	2.46 \pm 0.03 ^b
肝体比/% HSI	1.59 \pm 0.15	1.80 \pm 0.11	1.74 \pm 0.16	1.99 \pm 0.17
脏体比/% VSI	12.39 \pm 0.60 ^a	15.38 \pm 0.46 ^b	15.12 \pm 0.66 ^b	15.85 \pm 0.45 ^b

注: IBW 初均重, FBW 末均重。同行不同的上标字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Notes: IBW, initial bodyweight, FBW, final bodyweight. Different superscript letters in the same row indicate significant differences ($P < 0.05$); the same below.

2.2 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼肌肉成分的影响

养殖 8 周后, 摄食不同实验饲料对团头鲂幼鱼肌肉中的水分、粗蛋白、粗灰分的含量无显著影响 ($P > 0.05$) (表 4)。而肌肉粗脂肪随着饲料中串叶松香草添加量的增加而升高, SP4、SP6 组肌肉粗脂肪含量显著高于 SP0 组和 SP2 组 ($P < 0.05$)。

2.3 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼血浆生理指标的影响

串叶松香草添加组血浆中的 GLU 含量显著低于 SP0 组 ($P < 0.05$) (表 5)。与 SP0 组相比, 低水平串叶松香草的添加 (SP2) 对团头鲂幼鱼血浆中的 TG、TC、HDL 无显著影响 ($P > 0.05$), 而 SP4

组的 TG 和 LDL、SP6 组的 TG、TC、LDL 及 HDL 与 SP0 组相比均显著升高 ($P < 0.05$)。

2.4 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼肠道消化酶和抗氧化能力的影响

团头鲂幼鱼肠道脂肪酶的活性随着饲料中串叶松香草添加量的增加而呈现降低的趋势, 其中 SP4、SP6 组肠道脂肪酶活性显著低于 SP0 组与 SP2 组 ($P < 0.05$) (表 6)。各组间鱼体肠道淀粉酶与胰蛋白酶均无显著差异 ($P > 0.05$)。从抗氧化指标来看, 不同实验饲料对鱼体肠道 SOD、CAT 活性影响显著, SP2 组肠道中的 SOD、CAT 的活性相较于 SP0 组显著提升 ($P < 0.05$)。团头鲂幼鱼肠道中 GSH 和 MDA 含量则均不受饲料中串叶松香草添加量的影响 ($P > 0.05$)。

表 4 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼肌肉成分的影响

Tab. 4 Effects of dietary *S. perfoliatum* on muscle composition of juvenile *M. amblycephala* %

项目 (鲜样) items (fresh)	组别 groups			
	SP0 (对照组) control group	SP2	SP4	SP6
水分 moisture	78.61±0.19	78.74±0.37	77.43±0.50	77.91±0.86
粗蛋白 crude protein	18.63±0.07	18.43±0.27	18.06±0.15	18.25±0.60
粗脂肪 crude lipid	1.75±0.03 ^a	1.79±0.04 ^a	1.94±0.07 ^b	1.94±0.03 ^b
粗灰分 crude ash	1.27±0.04	1.46±0.27	1.25±0.26	1.20±0.05

表 5 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼血浆生理指标的影响

Tab. 5 Effects of dietary *S. perfoliatum* on the plasma biochemistry of juvenile *M. amblycephala*

项目 items	组别 groups			
	SP0 (对照组) control group	SP2	SP4	SP6
葡萄糖/(mmol/L) GLU	18.97±1.17 ^b	13.21±1.51 ^a	12.45±0.55 ^a	12.16±0.63 ^a
甘油三酯/(mmol/L) TG	5.76±0.33 ^a	5.93±0.23 ^a	7.43±0.41 ^b	8.42±0.25 ^c
总胆固醇/(mmol/L) TC	5.33±0.22 ^a	5.58±0.17 ^a	5.63±0.13 ^a	6.81±0.27 ^b
低密度脂蛋白/(mmol/L) LDL	1.44±0.07 ^a	1.74±0.09 ^b	1.76±0.09 ^b	2.36±0.12 ^c
高密度脂蛋白/(mmol/L) HDL	2.64±0.13 ^a	2.67±0.10 ^a	2.57±0.09 ^a	2.98±0.08 ^b

表 6 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼肠道消化酶和抗氧化能力的影响

Tab. 6 Effects of dietary *S. perfoliatum* on intestinal digestive enzyme activity and antioxidant capability of juvenile *M. amblycephala*

项目 items	组别 groups			
	SP0 (对照组) control group	SP2	SP4	SP6
肠道消化酶活性 intestinal digestive enzyme activity				
淀粉酶/(U/mg prot) AMS	1.35±0.09	1.43±0.08	1.24±0.05	1.36±0.09
脂肪酶/(U/mg prot) LPS	11.72±0.51 ^b	12.07±0.37 ^b	9.72±0.29 ^a	9.60±0.41 ^a
胰蛋白酶/(U/mg prot) TPS	244.13±14.07	238.53±17.00	249.15±13.93	231.93±9.61
肠道抗氧化能力 intestinal antioxidant capability				
超氧化物歧化酶/(U/mg prot) SOD	152.50±6.50 ^a	172.68±6.46 ^b	150.86±1.97 ^a	148.22±5.68 ^a
过氧化氢酶/(U/mg prot) CAT	18.46±0.50 ^{ab}	23.59±1.52 ^c	22.48±1.51 ^{bc}	17.01±2.13 ^a
谷胱甘肽/(mg/g prot) GSH	10.15±0.39	9.44±0.18	9.38±0.33	9.29±0.46
丙二醛/(nmol/mg prot) MDA	1.28±0.10	1.48±0.15	1.34±0.15	1.46±0.10

2.5 饲料中添加串叶松香草对急性肝损伤后团头鲂的保护作用

养殖 8 周后, 对团头鲂幼鱼进行腹腔注射 CCl₄ 溶液, 刺激诱导急性肝脏损伤, 注射后观察并统计鱼体死亡情况 (图 1)。从饲料中的串叶松香草添加量来看, SP2 组的死亡率最低, SP4、SP6 组的死亡率高于 SP0 组。其中, 注射 9 h 后 SP2 组的死亡率趋于稳定, 为 22.2%~27.8%。注射 96 h 后, SP2 组的累计死亡率显著低于其他各组 ($P<0.05$)。从肝脏抗氧化指标来看, 饲料中添加串叶松香草

饲喂 8 周后 (CCl₄ 溶液注射前) 对团头鲂肝脏中 SOD 和 CAT 活性、GSH 和 MDA 含量无影响 ($P>0.05$)。注射 CCl₄ 溶液急性损伤肝脏组织 24 h 后, SP2 组肝脏的超氧化物歧化酶 (SOD) 活性显著高于 SP0 和 SP4 组 ($P<0.05$) (表 7)。

2.6 饲料中添加串叶松香草对团头鲂肝脏脂肪代谢相关基因表达量的影响

随着串叶松香草添加量的增加, 脂质合成相关基因 *fas* 和 *sreb1c* 的表达呈上调趋势, 而脂质分解相关基因 *lpl* 和 *cpt1a* 的表达量呈下调趋势

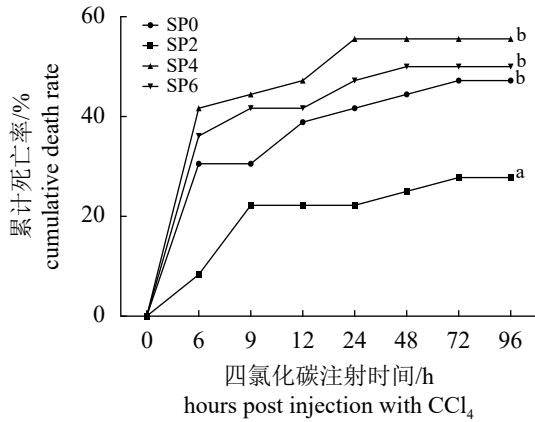


图 1 饲料中添加串叶松香草对 50% CCl₄ 溶液注射后团头鲂幼鱼的累计死亡率影响
不同字母表示注射 96 h 后累计死亡率差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 Effects of dietary *S. perfoliatum* on the mortality of juvenile *M. amblycephala* after 50% CCl₄ solution injection

Different letters indicates a significant difference of mortality at 96 h post-injection ($P < 0.05$).

(图 2)。其中, SP6 组 *fas* 表达显著高于 SP4 组 ($P < 0.05$), 且 SP4 组显著高于 SP0 和 SP2 组 ($P < 0.05$), 而 SP0 和 SP2 组无显著差异 ($P > 0.05$)。SP2 和 SP4 组 *srebplc* 的表达无显著差异 ($P > 0.05$), 但均显著高于 SP0 组 ($P < 0.05$), 且均显著低于 SP6 组 ($P < 0.05$)。SP2 组的 *lpl* 和 *cpt1a* 的相对表达量与 SP0 组相比无显著差异 ($P > 0.05$), SP6 组 *lpl*、*cpt1a* 相对表达量显著低于 SP0 和 SP2 组, SP4 组 *cpt1a* 的相对表达量显著低于 SP0 和 SP2 组, 且显著高于 SP6 组 ($P < 0.05$)。SP0 组 *pparβ* 的表达高于其他各

组, 且与 SP2 和 SP6 组差异显著 ($P < 0.05$)。各组间 *ppara* 的表达不受串叶松香草添加量的影响 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼生长性能的影响

渔用饲草是一种营养价值高, 能满足草食性鱼类正常生长发育需求的优质新型饲料原料^[17]。近年来, 水产上对于渔用饲草的应用研究日益增多。饲喂新鲜黑麦草的鲂鮈杂交种的体重增加率和特定生长率均显著低于配合饲料组, 但可提高鱼肉滋味值^[18], 草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 的增重率与特定生长率随着精饲料中浮萍 (*Lemna minor*) 干粉的增加而降低^[19]。这与本实验的结果类似, 饲料中串叶松香草粉添加量增加至 2% 对团头鲂幼鱼的生长性能无影响, 而当增加至 6% 时, 增重率和特定生长率显著下降, 且饵料系数显著上升。串叶松香草中的粗纤维含量较高, 当串叶松香草添加量过高时可能会导致团头鲂幼鱼对饲料消化吸收能力降低, 进而抑制生长。

3.2 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼肝肠抗氧化能力的影响

氧化应激是由于机体内产生大量自由基导致的, 是造成动物疾病的主要因素^[20-21]。自由基为正常代谢中间产物, 能氧化细胞内多种物质, 破坏机体正常功能^[22]。在呼吸和代谢过程中, 鱼体

表 7 饲料中添加串叶松香草对四氯化碳溶液胁迫前后团头鲂幼鱼肝脏抗氧化能力的影响

Tab. 7 Effects of dietary *S. perfoliatum* on the hepatic antioxidant capacity of juvenile *M. amblycephala* before and after 50% CCl₄ solution injection

项目 items	组别 groups			
	SP0 (对照组) control group	SP2	SP4	SP6
四氯化碳溶液注射前肝脏抗氧化能力 hepatic antioxidant capability before 50% CCl₄ solution injection				
超氧化物歧化酶/(U/mg prot) SOD	234.82±5.53	252.48±6.43	241.97±16.77	236.40±7.60
过氧化氢酶/(U/mg prot) CAT	28.97±4.60	34.81±2.81	29.03±4.02	25.30±3.70
谷胱甘肽/(mg/g prot) GSH	11.26±0.71	9.82±0.69	9.84±0.89	11.63±1.13
丙二醛/(nmol/mg prot) MDA	0.96±0.11	1.28±0.07	1.23±1.73	1.02±0.09
四氯化碳溶液注射 24 h 后肝脏抗氧化能力 hepatic antioxidant capability at 24 h after 50% CCl₄ solution injection				
超氧化物歧化酶/(U/mg prot) SOD	133.68±6.19 ^a	153.26±5.67 ^b	135.95±2.95 ^a	139.50±6.55 ^{ab}
过氧化氢酶/(U/mg prot) CAT	23.11±0.84	21.64±1.30	21.82±2.99	25.18±3.03
丙二醛/(nmol/mg prot) MDA	2.23±0.23	1.85±0.26	2.12±0.13	2.36±0.22

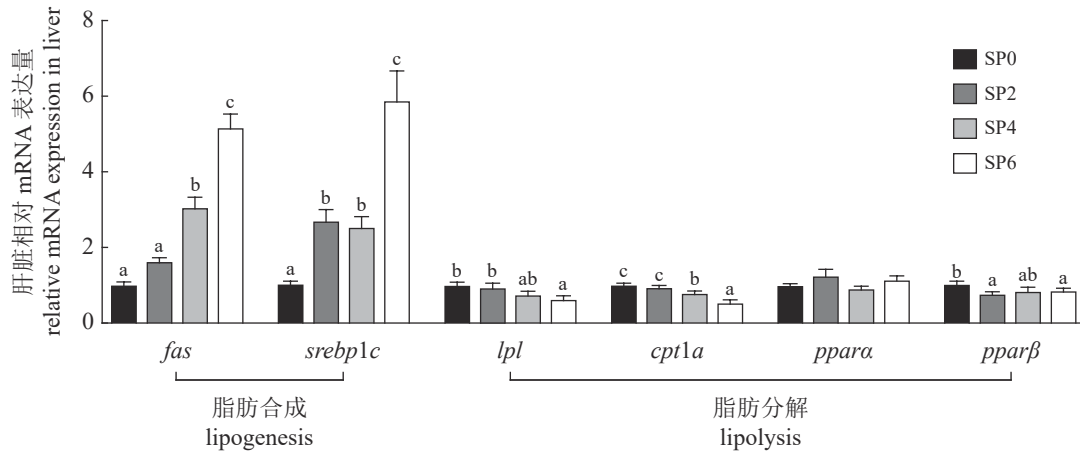


图2 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼肝脏脂肪代谢相关基因表达量的影响

数据柱形标注不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 2 Effects of dietary *S. perfoliatum* on the expression of genes related to liver lipid metabolism of juvenile *M. amblycephala*

Different letters on columns indicate significant differences between groups ($P < 0.05$).

会产生氧自由基。对机体所产生的过量自由基进行及时清理,可降低其氧化损伤程度^[23]。机体抗氧化系统主要由酶促抗氧化系统与非酶促抗氧化系统共同组成, SOD与CAT为主要的酶促抗氧化系统,是衡量机体抗氧化能力的重要指标^[24-25]。MDA是脂质过氧化作用的最终分解产物,其含量高低可以反映机体的脂质过氧化水平^[26]。本研究发现,饲料中添加2%的串叶松香草对肝脏抗氧化能力无影响,但能显著提升团头鲂幼鱼肠道的SOD与CAT活性。串叶松香草富含的生物碱、核黄素、黄酮类和抗氧化酶类等成分,具有抗氧化和免疫促进的功能^[6-7]。在小鼠的实验中发现,串叶松香草SOD能提高小鼠血清中SOD、CAT及GSH-Px的活性,降低其MDA含量^[8]。在本研究中也发现,饲料中添加适量串叶松香草可使团头鲂幼鱼肠道抗氧化功能获得一定程度的强化和改善,这可能与串叶松香草中富含的SOD有关。进一步的急性肝损伤诱导实验显示,在饲料中添加2%的串叶松香草能大大降低团头鲂幼鱼在诱导急性肝损伤后的死亡率,同时显著提升肝脏SOD活性,并降低肝脏中MDA的含量。急性肝损伤是短时间内由于外界因素引发的急性肝脏炎症性疾病^[27]。CCl₄是诱导实验动物急性肝损伤使用最广泛的化学性毒物,广泛应用于评估小鼠、畜禽、水产动物肝脏毒性和开发肝脏药物的经典模型^[28-33]。串叶松香草中含有的SOD可以通过清除CCl₄在肝脏内代谢产生的大量自由基,从而增强机体抗氧化能力^[10]。这也解释了在饲料中添加

2%的串叶松香草能显著提升CCl₄诱导肝损伤后团头鲂幼鱼的存活率与抗氧化能力。

3.3 饲料中添加串叶松香草对团头鲂幼鱼脂肪代谢的影响

一般而言,饲料脂肪水平的增加会导致肌肉粗脂肪含量增加,而饲料中粗纤维的增加可能降低肌肉粗脂肪含量^[34]。有研究报道,用青饲料饲喂或饲料中添加青饲料会显著降低肌肉的粗脂肪含量,如,鲂鮈杂交种摄食新鲜黑麦草(*Secale cereale*)后肌肉中的粗脂肪含量显著降低^[18];草鱼肌肉中粗脂肪含量随着饲料中浮萍干粉量的增加而显著降低^[19]。不同的是,本研究发现饲料中串叶松香草添加量的增加(4%与6%)显著提高了团头鲂幼鱼肌肉粗脂肪含量。另一方面,从鱼体的肥满度和脏器比来看,饲料中添加串叶松香草(2%、4%与6%)会提高鱼体脏器比指数。TG和TC主要在肝脏中合成,是反映机体脂质代谢的重要指标^[35]。血浆中TG水平上升意味着机体脂肪沉积增加,分解代谢能力降低^[36]。HDL和LDL在机体中起着运输TC的作用,TC含量增加反映了机体脂肪合成能力的提高^[37]。当饲料中串叶松香草添加量为6%时,团头鲂幼鱼血浆TG、TC、HDL、LDL均显著上升,说明饲料中添加过量串叶松香草会导致HDL、LDL转运增加,从而促使血浆中TC水平升高,TG也随之上升,破坏机体脂质代谢稳态,这在肝脏脂肪代谢中也得到了印证。脂肪酶(LPS)主要作用于饲料中脂类物质的

消化, 肠道中脂肪酶活性增加有助于脂肪分解能力的提高^[38]。本研究发现, 虽然 SP4 和 SP6 组肌肉粗脂肪含量增加, 但是团头鲂幼鱼肠道中 LPS 活性显著降低。已发表的研究中也有类似发现, 在齐口裂腹鱼 (*Schizothorax prenanti*) 饲料中添加 300 mg/kg 胆汁酸, 其 LPS 活性显著提高, 而肌肉粗脂肪含量显著降低^[39]。在黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 饲料中添加 0.50% 酸化剂, 其肠道 LPS 活性相较于未添加组显著提高, 肌肉粗脂肪含量则显著降低^[40], 但是二者之间可能的关系及具体的发生原因仍需要进一步研究。串叶松香草中的纤维素属于非淀粉多糖, 研究发现非淀粉多糖能与肠道中的脂肪酶耦联, 使其活性降低^[41]。因此, 当其添加量为 4% 与 6% 时, 团头鲂幼鱼肠道中的脂肪酶活性显著降低, 说明此时肠道脂肪分解的能力降低。

肝脏是鱼类脂肪生成的重要场所, 这是由于相较于其他组织, 肝细胞中的脂肪生成酶活性更高^[42]。固醇调节元件蛋白 (SREBP1c) 是维持脂质稳态的关键因子, 能通过调节脂肪合成中的关键酶 (如 FAS) 来调控机体的脂肪合成^[43-45], *fas* 基因表达量直接影响 FAS 活性水平, 其活性升高会促进 TG 的合成, 从而增加脂质聚积^[46-47]。本实验进一步检测了鱼体肝脏中脂肪代谢调控基因 mRNA 水平的表达量, 发现脂肪合成相关基因 *srebp1c* 与 *fas* 的相对表达量随着饲料中串叶松香草添加量的增加而增加, 说明在饲料中添加串叶松香草对脂肪的生成具有促进作用, 这与本实验中血浆 TG、TC 的变化趋势一致。脂肪酸的氧化供能是多种酶共同作用的结果, 其中就包括 LPL 与 CPT1^[48-49]。LPL 是脂质代谢的关键限速酶, 能将 TG 分解为游离脂肪酸^[50-51]。棕榈脂酰肉碱转移酶 A (CPT1A) 是肝细胞脂肪酸 β -氧化的调节酶, 可促进脂肪酸的分解, 调控机体脂质沉积^[49, 52]。本实验结果显示, 随着饲料中串叶松香草的增加, 团头鲂肝脏中 *lpl* 和 *cpt1a* 的相对表达量均呈显著下降趋势, 同样说明饲料中串叶松香草添加量的增加会降低鱼体肝脏脂质分解的能力, 最终造成机体脂质的过度沉积, 这些说明饲料中添加 4% 和 6% 串叶松香草会提高肝脏脂质合成能力, 同时又降低脂质分解能力, 从而影响脂质代谢稳态, 引起机体脂肪沉积。

4 结论

综上所述, 饲料中添加 2% 的串叶松香草能

够提高肠道的抗氧化能力, 并降低鱼体由于 CCl_4 诱导急性肝损伤的死亡, 提高肝脏抗氧化应激损伤的能力。当饲料中串叶松香草的添加量增加至 4% 和 6%, 会抑制鱼体生长, 并引起团头鲂幼鱼机体脂肪沉积。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 张文博, 马旭洲. 中国水产品的可持续供给 [J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(5): 1304-1316.
Zhang W B, Ma X Z. Sustainable supply of aquatic food in China[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(5): 1304-1316 (in Chinese).
- [2] 胡秀聪, 刘建高, 陈宇航, 等. 菜粕替代面粉对黄颡鱼生长性能和形体指标的影响 [J]. 广东饲料, 2021, 30(08): 23-26.
Hu X C, Liu J G, Chen Y H, et al. Effects of replacing flour with rapeseed meal on growth performance and body indexes of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Guangdong Feed, 2021, 30(08): 23-26 (in Chinese).
- [3] 瞿子惠, 刘丽宅, 韩振强, 等. 饲料中去皮豆粕替代鱼粉对长须胡鲶生长性能、体成分及血清生化指标的影响 [J]. 饲料研究, 2022, 45(21): 62-66.
Qu Z H, Liu L Z, Han Z Q, et al. Effects of dehulled soybean meal replaced fish meal on growth performance, body composition and serum biochemical indicators of *Clarias longibarbis*[J]. Feed Research, 2022, 45(21): 62-66 (in Chinese).
- [4] 宋鹏, 曹申平, 唐建洲, 等. 饲料中发酵芝麻粕替代菜粕对草鱼生长性能、肠道形态和微生物及小肽转运相关基因表达的影响 [J]. 水生生物学报, 2019, 43(6): 1147-1154.
Song P, Cao S P, Tang J Z, et al. Effects of dietary rapeseed meal on the growth performance, intestinal morphology and microflora of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Journal of Aquatic Biology, 2019, 43(6): 1147-1154 (in Chinese).
- [5] 于海洋. 串叶松香草栽培与利用 [J]. 现代畜牧兽医, 2009(4): 38-39.
Yu H Y. Cultivation and utilization of perfoliate rosinweed[J]. Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2009(4): 38-39 (in Chinese).
- [6] 张志儒, 李超欣, 马骏, 等. 高蛋白白草串叶松香草不

- 同生长期营养成分分析[J]. 中国饲料, 2020(21): 130-133.
- Zhang Z R, Li C X, Ma J, *et al.* Analysis of nutritional components of *Silphium perfoliatum* L. in different growth stages[J]. China Feed, 2020(21): 130-133 (in Chinese).
- [7] 秦令祥, 丁昱婵, 赵俊芳, 等. 串叶松香草超氧化物歧化酶提取工艺优化及对 D-半乳糖致衰老模型小鼠的保护作用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 122-129.
- Qin L X, Ding Y C, Zhao J F, *et al.* Optimization of extraction process of superoxide dismutase from *Silphium perfoliatum* L. and its protective effect on D-galactose induced aging model mice[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(1): 122-129.
- [8] Guo Y, Shang H M, Zhao J C, *et al.* Enzyme-assisted extraction of a cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) polysaccharide and its antioxidant and hypoglycemic activities[J]. *Process Biochemistry*, 2020, 92: 17-28.
- [9] Shang H M, Zhou H Z, Li R, *et al.* Extraction optimization and influences of drying methods on antioxidant activities of polysaccharide from cup plant (*Silphium perfoliatum* L.)[J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0183001.
- [10] Peni D, Stolarski M J, Bordiean A, *et al.* *Silphium perfoliatum*—a herbaceous crop with increased interest in recent years for multi-purpose use[J]. *Agriculture*, 2020, 10(12): 640.
- [11] 胡利珍, 刘林秀, 谷德平, 等. 菊科牧草对兴国灰鹅生产性能及效益分析[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2014(6): 32-36.
- Hu L Z, Liu L X, Gu D P, *et al.* Analysis of production performance and benefits of Asteraceae pasture grass on Xingguo gray goose[J]. Jiangxi Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2014(6): 32-36 (in Chinese).
- [12] 许美解, 罗庆平. 串叶松香草饲喂特种野猪的效果试验[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2008(6): 98-100.
- Xu M X, Luo Q P. Experiment on the effect of feeding *Silphium perfoliatum* on special wild boars[J]. *Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2008(6): 98-100 (in Chinese).
- [13] 张宝龙, 曲木, 赵子续, 等. 饲料中添加万寿菊粉和小球藻对黄金鲤鱼生长及体色的影响[J]. 养殖与饲料, 2020, 19(8): 25-30.
- Zhang B L, Qu M, Zhao Z X, *et al.* Effects of supplemental marigold powder and chlorella in feed on the growth and body color of *Yamabaki ogon*[J]. *Farming and Feeding*, 2020, 19(8): 25-30 (in Chinese).
- [14] 蒋飞, 严银龙, 施永海. 饲料中添加菊粉对暗纹东方鲀幼鱼生长、消化及非特异性免疫能力的影响[J]. 动物学杂志, 2020, 55(5): 599-605.
- Jiang F, Yan Y L, Shi Y H. Effect of supplemental inulin in dietary on the growth, digestive enzyme and nonspecific immunity in juvenile *Takifugu obscurus*[J]. Chinese Journal of Zoology, 2020, 55(5): 599-605 (in Chinese).
- [15] 朱德杰, 吴亚明, 陈宇龙, 等. 团头鲂咽齿发育相关基因系统进化及其表达分析[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 192-200.
- Zhu D J, Wu Y M, Chen Y L, *et al.* Phylogeny and expression analysis of genes related to tooth development in *Megalobrama amblycephala*[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 192-200.
- [16] 任鸣春, 周群兰, 缪凌鸿, 等. 团头鲂营养需求与健康研究进展[J]. 水产学报, 2015, 39(5): 761-768.
- Ren M C, Zhou Q L, Miao L H, *et al.* Advances on the nutrition requirements and effects of dietary nutrition on immunity for blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala* Yin[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(5): 761-768 (in Chinese).
- [17] 陈丽婷, 肖光明, 王晓清, 等. 投喂不同饲草的草鱼主养池塘中鱼类的生长和效益比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(4): 419-422.
- Chen L T, Xiao G M, Wang X Q, *et al.* Effect of different herbages on fish growth and economic efficiency in pond mainly culturing grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2013, 39(4): 419-422 (in Chinese).
- [18] 林欣, 郑国栋, 苏晓磊, 等. 黑麦草与配合饲料对鲂鮈杂交种生长、消化及鱼肉品质的影响[J]. 水产科学, 2022, 41(5): 769-777.
- Lin X, Zheng G D, Su X L, *et al.* Effects of green grass food and compound feed on growth, digestion and fish quality of hybrid between bluntnose black bream *Megalobrama amblycephala* and topmouth culter *Culter alburnus*[J]. Fisheries Science, 2022, 41(5): 769-777 (in Chinese).

- [19] 郭建林, 马恒甲, 孙丽慧, 等. 不同精、青饲料比例对草鱼生长、形体及肌肉营养成分的影响 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2012, 31(6): 503-508.
Guo J L, Ma H J, Sun L H, *et al.* Effects of different proportion of pelleted feed and duckweed on growth, body shape and muscle composition of grass carp (*Ctenopharyngon idella*)[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2012, 31(6): 503-508 (in Chinese).
- [20] 钟琴, 陈代文, 余冰, 等. 氧化应激对断奶仔猪的影响及营养的调控作用 [J]. 动物营养学报, 2019, 31(5): 2022-2029.
Zhong Q, Chen D W, Yu B, *et al.* Effects of oxidative stress on weaned piglets and regulation of nutrition[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(5): 2022-2029 (in Chinese).
- [21] 苏建青, 王晓娅, 张馨予, 等. 刺五加茎皮总黄酮的抗氧化活性研究 [J]. 饲料研究, 2022, 45(17): 80-84.
Su J Q, Wang X Y, Zhang X Y, *et al.* Study on antioxidant activity of total flavonoids from *Acanthopanax senticosus* stem bark[J]. Feed Research, 2022, 45(17): 80-84 (in Chinese).
- [22] 梁璐, 王海涛, 侯振中, 等. 棉酚对雄性小鼠肾脏 MDA 含量和 SOD、GSH-Px 活性的影响 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(6): 185-187.
Liang L, Wang H T, Hou Z Z, *et al.* Effects of cotton phenol on renal MDA content and SOD, GSH-Px activity in male mice[J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2017(6): 185-187 (in Chinese).
- [23] Chen S Y, Lin Y, Miao L H, *et al.* Ferulic acid alleviates lipopolysaccharide-induced acute liver injury in *Megalobrama amblycephala*[J]. *Aquaculture*, 2021, 532: 735972.
- [24] 周东来, 刘凡, 杨琼, 等. 桑叶水提物对鳊生长、脂质代谢、抗氧化能力和肝脏肠道健康的影响 [J]. 中国水产科学, 2023, 30(2): 206-217.
Zhou D L, Liu F, Yang Q, *et al.* Effects of mulberry leaf water extract on growth, lipid metabolism, antioxidant capacity, and liver and intestinal health of *Siniperca chuatsi*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(2): 206-217 (in Chinese).
- [25] 孙如意, 程银峰, 张博洋, 等. 饲料中添加槲皮素对黄河鲤生长性能、消化酶活性以及免疫和抗氧化功能的影响 [J]. 动物营养学报, 2023, 35(4): 2514-2523.
Sun R Y, Cheng Y F, Zhang B Y, *et al.* Effects of dietary quercetin on growth performance, digestive enzyme activities, immune and antioxidant functions of *Cyprinus carpio*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(4): 2514-2523 (in Chinese).
- [26] Parvez S, Raisuddin S. Protein carbonyls: novel biomarkers of exposure to oxidative stress-inducing pesticides in freshwater fish *Channa punctata* (Bloch)[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2005, 20(1): 112-117.
- [27] 冯大明, 王双, 唐雅玲, 等. 水蓑衣提取物对 CCl₄ 诱导的小鼠急性肝损伤的保护作用 [J]. 世界华人消化杂志, 2005, 13(9): 1098-1101.
Feng D M, Wang S, Tang Y L, *et al.* Protective effect of extraction from *Hygrophila salicifolia* on mice acute hepatic injury[J]. World Chinese Journal of Digestology, 2005, 13(9): 1098-1101 (in Chinese).
- [28] 龚倩梅, 刘永仕, 袁何玲, 等. 大蒜辣素缓解 CCl₄ 致小鼠急性肝损伤的作用研究 [J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(3): 530-538.
Gong Q M, Liu Y S, Yuan H L, *et al.* Effects of allicin on alleviating carbon tetrachloride-induced acute liver injury in mice[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(3): 530-538 (in Chinese).
- [29] 付双楠, 高达, 郭佳佳, 等. 四氯化碳致小鼠急性肝损伤模型建立与考察 [J]. 肝脏, 2022, 27(9): 1036-1040.
Fu S N, Gao D, Guo J J, *et al.* Establishment and investigation of carbon tetrachloride-induced acute liver injury model in mice[J]. Chinese Hepatology, 2022, 27(9): 1036-1040 (in Chinese).
- [30] 刘捷, 刘德金, 乔飞鸿, 等. 四氯化碳致鸡肝脏和肾脏损伤实验动物模型的建立 [J]. 南京农业大学学报, 2008, 31(3): 117-120.
Liu J, Liu D J, Qiao F H, *et al.* Establishment of experimental animal model of chicken liver and kidney damages induced by carbon tetrachloride[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2008, 31(3): 117-120 (in Chinese).
- [31] Jia R, Cao L P, Du J L, *et al.* The protective effect of silymarin on the carbon tetrachloride (CCl₄)-induced liver injury in common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Animal*, 2013, 49(3): 155-161.
- [32] Yang J Y, Li Y, Wang F, *et al.* Hepatoprotective effects

- of apple polyphenols on CCl₄-induced acute liver damage in mice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(10): 6525-6531.
- [33] Fu Y M, Zheng S Z, Lin J G, *et al.* Curcumin protects the rat liver from CCl₄-caused injury and fibrogenesis by attenuating oxidative stress and suppressing inflammation[J]. *Molecular Pharmacology*, 2008, 73(2): 399-409.
- [34] 陈诺, 李琦华, 杨凯, 等. 桑叶作为非常规饲料资源的开发与利用的研究进展 [J]. 饲料研究, 2023, 46(1): 133-136.
- Chen N, Li Q H, Yang K, *et al.* Research progress development and utilization of mulberry leaf as unconventional feed resource[J]. *Feed Research*, 2023, 46(1): 133-136 (in Chinese).
- [35] 陈洁, 熊邦喜, 顾钱洪, 等. 内源及外源因子对鱼类血液生理生化指标的影响 [J]. 湖北农业科学, 2011, 50(9): 1861-1865.
- Chen J, Xiong B X, Gu Q H, *et al.* The effect of endogenous and environment factors on hematology physiological and biochemical indices of fish[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(9): 1861-1865 (in Chinese).
- [36] 谢瑞涛. 饲料脂肪与蛋白质对杂交石斑鱼(褐点石斑鱼♀×清水石斑鱼♂)生长及代谢的影响 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021.
- Xie R T. Effects of dietary lipid levels and protein levels on growth and physiological metabolism of the hybrid (*Epinephelus fuscoguttatus*♀× *E. polyphkadion*♂)[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021 (in Chinese).
- [37] 李玉, 徐怡钟, 梁婷, 等. 绿茶粉和绿茶多酚对犬的降脂作用 [J]. *动物营养学报*, 2018, 30(12): 5107-5117.
- Li Y, Xu Y Z, Liang T, *et al.* Lipid-lowering effect of green tea powder and green tea polyphenols in canines[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(12): 5107-5117 (in Chinese).
- [38] 张树泽, 王常安, 陆绍霞, 等. 饲料中添加肌醇对施氏鲟消化生理的影响 [J]. 饲料工业, 2022, 43(16): 53-59.
- Zhang S Z, Wang C A, Lu S X, *et al.* Effects of dietary myo-inositol on digestive physiology of *Acipenser schrenckii*[J]. *Feed Industry*, 2022, 43(16): 53-59 (in Chinese).
- [39] 向泉, 曾本和, 王睿, 等. 胆汁酸对齐口裂腹鱼幼鱼脂肪沉积、脂肪代谢酶活性及相关基因表达的影响 [J]. 水产学报, 2022, 46(6): 1045-1052.
- Xiang X, Zeng B H, Wang R, *et al.* Effects of dietary bile acid on lipid deposition, lipid metabolism enzyme activities and related gene expression to juvenile *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(6): 1045-1052 (in Chinese).
- [40] 王波, 徐伟, 关舒, 等. 酸化剂对黄颡鱼生长、抗氧化能力和非特异性免疫的影响 [J]. 动物营养学报, 2023, 35(4): 2490-2502.
- Wang B, Xu W, Guan S, *et al.* Effects of acidifiers on growth, antioxidant capacity and non-specific immunity of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(4): 2490-2502 (in Chinese).
- [41] 吴仓仓, 何吉祥, 吴本丽, 等. 饲料中添加发酵蚕沙对草鱼生长、消化、免疫及炎症反应的影响 [J]. *动物营养学报*, 2023, 35(3): 1883-1894.
- Wu C C, He J X, Wu B L, *et al.* Effects of dietary fermented silkworm excrement on growth, digestive, immune and inflammation of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(3): 1883-1894 (in Chinese).
- [42] Henderson R J, Sargent J R. Chain-length specificities of mitochondrial and peroxisomal β -oxidation of fatty acids in livers of rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Comparative Biochemistry*, 1985, 82(1): 79-85.
- [43] 杨磊, 袁星星, 李莹, 等. 基于 AMPK/SREBP-1c 信号通路探讨益气健脾汤对非酒精性脂肪性肝病小鼠糖脂代谢的影响 [J]. 现代中西医结合杂志, 2021, 30(36): 4002-4007.
- Yang L, Yuan X X, Li Y, *et al.* Effects of Yiqi Jianpi Decoction on glucose and lipid metabolism in mice with NAFLD based on the changes of AMPK/SREBP-1c signaling pathway[J]. *Modern Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine*, 2021, 30(36): 4002-4007 (in Chinese).
- [44] Dai Y J, Jiang G Z, Yuan X Y, *et al.* High-fat-diet-induced inflammation depresses the appetite of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) through the transcriptional regulation of leptin/mammalian target of rapamycin[J]. *British Journal of Nutrition*, 2018, 120(12): 1422-1431.
- [45] 宓伟, 于敏, 李宁, 等. 基于 AMPK/SREBP-1c 分子通

- 路的山楂原花青素调控脂质代谢机制 [J]. *食品科学*, 2023, 44(15): 129-136.
- Mi W, Yu M, Li N, *et al.* Hawthorn procyanidins regulate lipid metabolism through the AMPK/SREBP-1c signaling pathway[J]. *Food Science*, 2023, 44(15): 129-136 (in Chinese).
- [46] Zheng G D, Wu C B, Liu J, *et al.* Transcriptome analysis provides new insights into the growth superiority of a novel backcross variety, *Megalobrama amblycephala* ♀ × (*M. amblycephala* ♀ × *Culter alburnus* ♂) ♂[J]. *Aquaculture*, 2019, 512: 734317.
- [47] Wang C C, Jiang G Z, Cao X F, *et al.* Effects of dietary docosahexaenoic acid on growth performance, fatty acid profile and lipogenesis of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, 26(2): 502-515.
- [48] 刘嘉欣, 张木子, 黎明, 等. 氨氮胁迫下饥饿与复投喂对黄颡鱼肝脏中脂质代谢相关酶活性及相关基因表达的影响 [J]. *动物营养学报*, 2021, 33(1): 436-447.
- Liu J X, Zhang M Z, Li M, *et al.* Effects of starvation and re-feeding on enzyme activities and gene expression involved in liver lipid metabolism of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) under ammonia nitrogen stress[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(1): 436-447 (in Chinese).
- [49] 屠云洁, 巨晓军, 单艳菊, 等. “花山麻鸡”CPT1A 基因时空表达规律研究 [J]. *中国家禽*, 2021, 43(6): 20-24.
- Tu Y J, Ju X J, Shan Y J, *et al.* Temporal and spatial expression of CPT1A gene in huashan partridge chicken[J]. *China Poultry*, 2021, 43(6): 20-24 (in Chinese).
- [50] Mohapatra S, Chakraborty T, Reza M A N, *et al.* Short-term starvation and realimentation helps stave off *Edwardsiella tarda* infection in red sea bream (*Pagrus major*)[J]. *Comparative biochemistry and physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2017, 206: 42-53.
- [51] 唐丹, 苏胜彦, 朱文彬, 等. 饲料中添加竹炭对红罗非鱼幼鱼肌肉脂肪酸组分及脂代谢相关基因表达的影响 [J]. *水产学报*, 2019, 43(4): 1092-1103.
- Tang D, Su S Y, Zhu W B, *et al.* Effects of dietary addition of bamboo charcoal on muscle fatty acid composition and lipid metabolism related genes of juvenile red tilapia (*Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(4): 1092-1103 (in Chinese).
- [52] Frazier-Wood A C, Aslibekyan S, Absher D M, *et al.* Methylation at CPT1A locus is associated with lipoprotein subfraction profiles[J]. *Journal of Lipid Research*, 2014, 55(7):

Effects of dietary supplementation of *Silphium perfoliatum* on growth performance, antioxidant capacity and lipid metabolism of juvenile *Megalobrama amblycephala*

HU Songqin¹, LIN Yan², SHI Xiulan¹, CHI Changhong¹, YAN Ying¹,
MIAO Linghong^{1,2}, DONG Zaijie^{1,2*}

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;

2. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi 214081, China)

Abstract: In order to avoid competition between aquatic animals and humans, seeking new feed raw materials has become an important direction for the healthy development of aquaculture. *Silphium perfoliatum*, also known as rosin, has the advantage of “not competing with grain for land”. This study is conducted to investigate the effects of dietary *S. perfoliatum* (SP) supplementation on the growth performance, antioxidant capacity and lipid metabolism of juvenile *Megalobrama amblycephala*. Four experimental diets were formulated containing 0% (control group), 2%, 4% and 6% *S. perfoliatum* (SP). Two hundred and forty healthy *M. amblycephala* juveniles (3.85 ± 0.50 g) were randomly fed one of the four experimental diets in triplicates (20 fish per tank) for 8 weeks. After the 8-week feeding trial, the growth performance, muscle composition, plasma biochemical indicators, hepatic and intestinal antioxidant capability, and gene expressions related to lipid metabolism were measured. The results showed the following. Compared to the control group, the weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR) were significantly lower in the 4% and 6% SP supplementary groups ($P < 0.05$). In the 6% group, the final body weight (FBW) was significantly lower than that of the control group ($P < 0.05$), while the feed coefficient ratio (FCR) was significantly higher ($P < 0.05$). As to the antioxidant capability, the levels of catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) in the intestine were significantly higher in SP supplementary groups compared to the control group ($P < 0.05$). In terms of fat deposition and lipid metabolism, fat contents in the muscle of the 4% and 6% SP supplementary groups were significantly higher than that in the control group ($P < 0.05$). The intestinal lipase activity was significantly lower in the 4% and 6% SP supplementary groups compared to the control group ($P < 0.05$). The contents of plasma triglycerides (TG), cholesterol (TC), high-density lipoprotein (HDL), and low-density lipoprotein (LDL) in the 6% SP supplementation group were significantly higher than those in the control group ($P < 0.05$). Meanwhile, the gene expressions of hepatic *fas* and *srebp1c*, relating to lipid synthesis, were significantly activated in the 4% and 6% SP supplementary groups ($P < 0.05$). The gene expressions of hepatic *lpl*, *cpt1a* and *ppar β* , relating to lipolysis metabolism, were significantly inhibited in the 6% SP supplementary group ($P < 0.05$). At the end of the 8-week feeding trial, a challenge test of intraperitoneal injecting 50% CCl₄ solution was performed. It was found that the cumulative mortality rate of the 2% SP supplementary group was lower than that of the control group at 96 h post-injection. Further analysis of hepatic antioxidant capacity at 24 h post-injection revealed that the hepatic SOD activity of the 2% SP supplementary group was significantly higher than that of the control group ($P < 0.05$). In general, the supplementation of 2% *S. perfoliatum* in diet showed no negative effect on the growth and feed utilization of juvenile *M. amblycephala*, but improved the intestinal antioxidant capacity. 4% and 6% dietary supplementation levels of *S. perfoliatum* inhibited the growth and resulted in fat deposition in the muscle. All the results of this study provide a reference for further application of *S. perfoliatum* in aquatic feed.

Key words: *Megalobrama amblycephala*; *Silphium perfoliatum*; growth performance; antioxidant capacity; lipid metabolism

Corresponding author: DONG Zaijie. E-mail: dongzj@ffrc.cn

Funding projects: China Agriculture Research System (CARS-45); Jiangsu Province Graduate Research and Practice Innovation Program (SJCX22_0212)