

Chen X, Jing R X, Xiao W, et al. *Lactobacillus johnsonii* on growth performance and lipid metabolism in *Monopterus albus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(6): 062604. [陈潇, 景瑞雪, 肖伟, 等. 约氏乳杆菌对黄鳝生长性能和脂质代谢的影响 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(6): 062604.]

约氏乳杆菌对黄鳝生长性能和脂质代谢的影响

陈 潇¹ 景瑞雪¹ 肖 伟² 陈蓉蓉³ 余明进¹ 潘 杰¹ 王自蕊¹
晁碧辉¹ 王文敏² 肖 婧² 杨竹青^{1,2}

(1. 南昌市特色水生生物营养生理与健康养殖重点实验室, 南昌 330045; 2. 江西农业大学公共基础实验教学中心, 南昌 330045; 3. 江西农业大学生物科学与工程学院, 南昌 330045)

摘要: 为了探究约氏乳杆菌CIP103620对黄鳝(*Monopterus albus*)生长性能与脂质代谢的影响, 将180尾黄鳝随机分为对照组(CL, 基础饲料)、发酵组(JF, 1×10^7 CFU/g约氏乳杆菌发酵饲料)和喷洒组(JS, 表面喷洒等量活菌饲料), 正式试验8周。结果表明, 与对照组相比, JF组和JS组均显著提高了黄鳝的末重、增重率和特定生长率($P < 0.05$), 且JS组效果更优。两组均显著提高了全鱼和肌肉的粗脂肪含量($P < 0.05$), 同时降低了肝脏脂质沉积($P < 0.05$)。此外, 两组处理均显著降低了血清甘油三酯、总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇和非酯化游离脂肪酸水平($P < 0.05$), 提高了肝脏肝脂酶、脂蛋白脂酶和总脂酶活性($P < 0.05$)。基因表达分析表明JS组显著上调了脂肪分解相关基因(*cpt1*、*lpl*、*hsl*、*atgl*)及部分合成基因(*acc1*、*fas*)表达, 同时下调*acc2* ($P < 0.05$)基因表达; JF组对脂肪分解相关基因表达的上调幅度较弱。因此, 约氏乳杆菌可能通过增强肝脏脂质分解代谢、调控相关基因表达, 来有效促进黄鳝生长和改善脂质代谢稳态; 综合分析表明活菌喷洒处理在促进生长和调控脂质代谢方面效果更显著, 是更为适宜的益生菌应用方式。

关键词: 生长性能; 脂质代谢; 约氏乳杆菌; 黄鳝

中图分类号: S965.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2026)06-062604-09

doi: 10.3724/1000-3207.2026.2026.0003 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2026.0003



黄鳝(*Monopterus albus*)是我国重要的淡水经济养殖鱼类, 因其肉质鲜美、营养丰富而备受青睐, 市场供不应求。近年来, 随着黄鳝集约化养殖模式发展, 开发安全、高效的饲料添加剂以促进生长和改善健康已成为产业提质增效的关键。益生菌作为绿色添加剂在此背景下备受关注, 其中乳酸菌作为一类能够发酵碳水化合物产生乳酸的微生物, 在调节宿主代谢、改善健康方面展现出巨大潜力^[1]。约氏乳杆菌(*Lactobacillus johnsonii*)是其中具有代表性的益生菌种, 在提高动物生长性能与饲料利用率、增强免疫力及调节脂质代谢等方面效果显著^[2, 3]。其主要通过增强肠道屏障结构与功能、优

化肠道菌群组成及调节宿主免疫状态, 来促进营养物质的消化吸收和动物生长发育, 并缓解炎症^[2-4]。多项畜禽研究为此提供了证据: 在肉鸡日粮中, 添加约氏乳杆菌可通过改善肠道菌群结构和增强肠道屏障, 显著提高肉鸡采食量和饲料效率^[5]; 在断奶仔猪中, 特定的约氏乳杆菌(如RS-7、L531等)能有效提高仔猪的生长性能和饲料转化率、免疫抗氧化能力和对致病菌感染的抵抗力^[6, 7], 有效缓解仔猪腹泻率^[8]; 从绵羊粪便中分离的约氏乳杆菌M5可通过提高断奶羔羊血清和空肠黏膜中抗炎细胞因子水平, 降低促炎细胞因子水平, 增强断奶羔羊的免疫和抗氧化能力, 缓解早期断奶应激导致

收稿日期: 2026-01-06; 修订日期: 2026-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(32260921); 江西省自然科学基金(20242BAB25401); 江西省名特优产业技术体系(JXARS-15)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32260921); the Natural Science Foundation Project of Jiangxi Province (20242BAB25401); Specialized and High-Quality Industry Technology System of Jiangxi Province (JXARS-15)]

作者简介: 陈潇(2000—), 女, 硕士研究生; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: chen15628699251@163.com

通信作者: 杨竹青, E-mail: yangzhuqingxau@hotmail.com

的腹泻与生长抑制^[3]。

除了促进生长外, 约氏乳杆菌还能通过“肠-肝轴”调控宿主全身性的脂质代谢。一方面, 它可通过调节肠道菌群及其有益代谢产物如短链脂肪酸(SCFAs)的丰度, 抑制炎症信号通路(如M1巨噬细胞极化及相关细胞因子表达), 从而改善肠道屏障功能与系统性炎症状态, 间接影响脂质代谢稳态。如Cai等^[9]对DSS诱导结肠炎的小鼠研究发现, 约氏乳杆菌GLJ001可减轻结肠炎引起的体重下降、疾病活动指数升高、结肠缩短及组织损伤等症状, 这主要是通过增加短链脂肪酸的丰度, 抑制M1巨噬细胞标志物(Inos和CD86)和炎症性细胞因子(*tnf-α*和*il-1β*)表达, 恢复肠道屏障功能。另一方面, 它可直接促进肠道上皮细胞增殖, 或激活肠道上皮细胞的肝脏X受体(LXR)通路, 下调胆固醇吸收关键蛋白(NPC1L1)和胆固醇转运蛋白(ABCG5)的表达, 从而降低血清中总胆固醇(T-CHO)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)等循环胆固醇水平^[10]。这些机制在畜禽研究中已得到验证, 例如饲料添加约氏乳杆菌BS15可显著降低肉鸡血清甘油三酯(TG)和LDL-C及腹部脂肪沉积^[11]。

综上所述, 约氏乳杆菌是一种在改善动物生长性能与调控脂质代谢等方面具有巨大潜力的益生菌。然而, 目前相关研究主要集中在陆生畜禽, 其在重要水产养殖动物(如黄鳝)中的应用效果与作用机制尚属空白。鉴于此, 本研究通过约氏乳杆菌CIP103620发酵饲料和活菌喷洒饲料, 来系统研究其对黄鳝生长与脂质代谢的影响, 并评价其适宜的应用方式, 以期为黄鳝专用益生菌饲料添加剂开发提供理论依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 实验鱼及试验设计

选择体质健康、体重均匀(16 ± 0.05) g的黄鳝180尾, 随机分为3组, 每组3个重复, 每个重复20尾。分别投喂以下3种饲料: (1)对照组(CL): 未作任何处理的基础饲料; (2)发酵组(JF): 使用 1×10^7 CFU/g约氏乳杆菌CIP103620 (本实验室保藏)发酵制备的饲料; (3)喷洒组(JS): 喷洒同浓度菌悬液的基础饲料, 最终菌量为 1×10^7 CFU/g。鱼粉、豆粕、玉米蛋白粉以及大豆浓缩蛋白等主要饲料原料均购自南昌市经济技术开发区诚信饲料店, 豆油和小麦芯粉购自益海嘉里食品营销有限公司。基础饲料原料经粉碎后过80目筛, 混合均匀后膨化、制粒, 加工成粒径1 mm的颗粒饲料(表1)。发酵饲料制备方法如下: 将 1×10^7 CFU/g约氏乳杆菌与基

础饲料原料混匀, 加入灭菌水调节含水量至40%, 装入带单向排气阀的发酵密封袋, 于37℃发酵48h, 略经晾干后制粒。喷洒组饲料制备时, 将约氏乳杆菌悬液均匀喷洒到基础饲料颗粒表面, 使其达到目标菌量(1×10^7 CFU/g), 随后立即置于-20℃冰箱保存, 所有实验饲料均在3d内使用。

表1 饲料配方及主要营养物质(%干物质基础)

Tab. 1 The ingredient and proximate composition of the diet (% dry matter)

原料Ingredient	对照组Control group
鱼粉Fish meal	28.00
玉米蛋白粉Corn gluten meal	6.00
豆粕Soybean meal	6.00
脱酚棉籽蛋Mineral Premixture	6.00
豆油Soybean oil	10.00
大豆浓缩蛋Soy protein concentrate	16.00
小麦芯Wheatmeal	20.00
蚯蚓粉Lumbricina powder	1.50
虾壳粉Crayfish shell powder	1.50
啤酒酵母粉Beer yeast powder	2.00
胆碱60% Choline	0.50
磷酸二氢钙Ca(HPO) ₂	1.50
维生素预混Vitamin Premix ¹	0.50
矿物质预混Mineral Premix ²	0.50
总计Total	100.00
营养成Nutrient composition	
粗蛋白Crude protein	42.15
粗脂肪Crude fat	10.83

注: ¹维生素预混料(per kg): 维生素A, 15000 IU; 维生素D₃, 5000 IU; 维生素E, 75 mg; 维生素K₃, 22.5 mg; 维生素B₁, 4.5 mg; 维生素B₂, 7.2 mg; 维生素B₆, 45 mg; 维生素B₁₂, 0.05 mg; 维生素C, 50 mg; 烟酰胺, 105 mg; 叶酸, 7.5 mg; 泛酸钙, 45 mg; 生物素, 0.15 mg; 肌醇, 60 mg; ²矿物质预混料(per kg): 氯化钠(NaCl), 1000 mg; 五水硫酸铜(CuSO₄·5H₂O), 10 mg; 七水硫酸亚铁(FeSO₄·7H₂O), 150 mg; 一水硫酸锌(ZnSO₄·H₂O), 50 mg; 四水硫酸锰(MnSO₄·4H₂O), 20 mg; 七水硫酸镁(MgSO₄·7H₂O), 500 mg; 五水亚硒酸钠(NaSeO₃·5H₂O), 0.3 mg; 氯化钴(CoCl₂), 0.4 mg; 碘化钾(KI), 0.8 mg; 磷酸二氢钙Ca(H₂PO₄)₂, 12.45 g

Note: ¹Vitamin premix (per kg): Vitamin A, 15000 IU; Vitamin D₃, 5000 IU; Vitamin E, 75 mg; Vitamin K₃, 22.5 mg; Vitamin B₁, 4.5 mg; Vitamin B₂, 7.2 mg; Vitamin B₆, 45 mg; Vitamin B₁₂, 0.05 mg; Vitamin C, 50 mg; Nicotinamide, 105 mg; Folic acid, 7.5 mg; Calcium pantothenate, 45 mg; Biotin, 0.15 mg; Inositol, 60 mg; ²Mineral premix (per kg): NaCl, 1000 mg; CuSO₄·5H₂O, 10 mg; FeSO₄·7H₂O, 150 mg; ZnSO₄·H₂O, 50 mg; MnSO₄·4H₂O, 20 mg; MgSO₄·7H₂O, 500 mg; NaSeO₃·5H₂O, 0.3 mg; CoCl₂, 0.4 mg; KI, 0.8 mg; Ca(H₂PO₄)₂, 12.45 g

1.2 日常管理

所有黄鳝饲养于江西农业大学水产养殖基地的同一温室大棚的养殖箱(150 cm×100 cm×100 cm), 水面铺设水葫芦以模拟自然生态环境。

养殖用水经充分曝气,水深20—30 cm (视气温和水温动态调整),水温 25—30℃, pH 6.8—7.0, 溶解氧> 6.0 mg/L, 氨氮< 1.4 mg/L, 亚硝酸盐< 0.01 mg/L, 并根据水质情况换水2—3次/周,光照为自然光。预试验2周,正式试验8周。每日17:00定时饱食投喂,并及时清理残饵和记录黄鳝摄食和死亡情况。

1.3 样品采集及指标测定

样品采集 在正式试验结束后,每组随机选择30尾(每箱10尾)用250 mg/L MS-222 (Sigma Aldrich, USA)麻醉,解剖,收集血液、肝脏、肌肉和全鱼等样品,用于血液理化指标、体成分、肝脏脂质及脂肪代谢相关酶活性等测定,并严格按照实验要求采集分子实验所需的肝脏RNA样品。

生长性能与形体指标测定 在正式试验结束后,统计每箱黄鳝采食量和存活尾数。随后进行解剖,分离内脏、肝脏、肠道及脾脏等组织器官并精确称重,同时测定胴体重、体长、头肛长等形态数据。根据以下公式计算相关指标:

增重率(WGR, %)= [(末重-初重)/初重]×100

特定生长率(SGR, %/d)= [(ln 末重 - ln 初重) / 饲养天数] ×100

日均采食量[ADFI, g/(I·d)]=总采食量/(总尾数×饲养天数)

存活率(SR, %)=(终末尾数/初始尾数)×100

脏体指数(VSI)=(内脏重/体重)×100

肝体指数(HSI)=(肝脏重/体重)×100

肠体指数(VI)=(肠道重/体重)×100

脾体指数(SI)=(脾脏重/体重)×100

体成分测定 取全鱼、肝脏和肌肉样品,参照AOAC法(AOAC, 1995)测定其常规养分含量:采用105℃烘箱干燥恒重法(GB/T 6435-86)测定水分含量,采用凯氏定氮法(GB/T 6432-94)测定粗蛋白含量,采用索氏抽提法(GB/T 6433-94)测定粗脂肪含量,采用550℃马弗炉灼烧法(GB/T 6438-92)测定粗灰分含量。

血糖血脂测定 黄鳝禁食24h后,采用断尾法采集血液于1.5 mL离心管中,4℃静置2h后,2500 r/min冷冻离心10min,吸取上层血清,-80℃冰箱保存待测。血清葡萄糖(GLU: A154-1-1)、TG (A110-1-1)、T-CHO (A111-1-1)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C: A112-1-1)、LDL-C (A113-1-1)及非酯化游离脂肪酸(NEFA: A042-2-1)含量均使用南京建成生物工程研究所试剂盒测定,所有操作严格按照说明书进行。

肝脏脂质含量与脂质代谢相关酶活性测定 解剖后迅速取肝脏组织,液氮速冻后转移至-80℃冰

箱保存。测定前,将肝脏组织与预冷的磷酸盐缓冲液(PBS, pH 7.4)按重量体积比1:9进行匀浆,随后于4℃、3000 r/min离心10min,取上清液作为待测样品。肝脏TG (A110-1-1)、T-CHO (A111-1-1)、LDL-C (A113-1-1)、HDL-C (A112-1-1)、总蛋白(TP: A045-4)、脂蛋白脂酶(LPL: A067-1-2)、肝脂酶(HL: A067-1-2)和总脂酶(TL: A067-1-2)的活性,均使用南京建成生物工程研究所试剂盒进行测定,所有操作严格按照说明书执行。

肝脏脂质代谢相关基因表达分析(实时荧光定量PCR) 采用TRIzol 试剂(TaKaRa, 日本)提取肝脏总RNA,使用NanoDrop2000 (Thermo Fisher, 美国)检测RNA浓度与纯度。经质检合格后,利用PrimeScript™ 反转录试剂盒(TaKaRa, 日本)合成cDNA。采用Bio-Rad CFX96系统进行实时荧光定量PCR。反应体系为10 μL,其中TB Green Premix Ex TagII (TliRNaseH Plus)5 μL, ROX Reference Dye 0.2 μL, 上下游引物各0.4 μL, 1 μL cDNA模板及3 μL DEPC水。反应程序: 95℃ 预变性30s, 随后进行40个循环的扩增(95℃ 变性5s, 55—60℃ 退火30s以及72℃ 延伸20s),最终绘制熔解曲线验证产物特异性。以18S rRNA 为内参基因,采用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 法计算目标基因的相对表达量。引物序列见表2。

表2 脂质代谢相关基因的引物序列

基因名称 Gene name	引物序列 Primer sequence (5'—3')	参考序列 Reference sequence
<i>lpl</i>	TTGACATCGGAGACCTGA AAAGACCACCTTGGACTGA	XM_020613041.1
<i>cpt1</i>	GTGGCTCTTGCTCATCTTC CTTTGGTGGTGTGGACAT	XM_020606315.1
<i>hsl</i>	ATCTGTGCGGAGCTTATT ATCCCTATCGGTTTCGTTT	XM_020590197.1
<i>atgl1</i>	TGTGGGATGGATTCAAGAG AACCTGGATGGGAGGGACT	XM_020585490.1
<i>atgl2</i>	GTCACGGGAGTTTGTCTTG CAGGTAAATGAAGGGTGC	XM_020585490.1
<i>atgl3</i>	ATCTTCCCTCTGATGCTC CCTTTGAATGATGGTGGT	XM_020615107.1
<i>fas</i>	CTGTCCGAGGCGGCATAAT TCACCGCTGGACGAAGGAT	XM_020608887.1
<i>acc1</i>	GAACAACCCGAAGAACAG TTAGGGAAGTCATCAGCAC	XM_020598745.1
<i>dgat1</i>	TAAGCCAATGTTGAAGAGG GGAAGCGACTAACAAACC	XM_020597631.1
<i>lipin1a</i>	TGATATGACCCGAGGCTAC AAGGTGCTTGATGTCTGTAAG	XM_020590026.1
<i>lipin1b</i>	GAGCGACTCTGAACATAATA C	XM_020623677.1
<i>acc2</i>	GACAAACTGGTGGAAGGT AAAGCGGGAATATCGTTC	XM_020594328.1
<i>srebp1</i>	GATTACATTGCCAAGTCGT GAAGACGCCAAGCCAAAT	XM_020594328.1
<i>18S</i>	CTGCCAGATGAGCAAAAGC GTGGAGCGATTTGTCTGGTTA	XM_020606315.1
	CGGACATCTAAGGGCATCAC	

1.4 统计分析

所有数据采用SPSS 25.0统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 结果以平均值±标准误(mean±SE)表示。若组间差异显著($P<0.05$), 则进一步采用Duncan's法进行多重比较, 以区分各组间的差异性。所有图表均使用GraphPad Prism 8.0软件绘制。

2 结果

2.1 约氏乳杆菌对黄鳝生长性能和形体指标的影响

各组黄鳝的生长性能和形体指标结果见表3。与对照组(CL)相比, 约氏乳杆菌发酵饲料组(JF)和活菌喷洒组(JS)均显著提高了黄鳝的末均重(FBW)、增重率(WGR)和特定生长率(SGR)($P<0.05$), 其中JS组的促生长效果更为显著。此外, JF组的日均采食量(ADFI)显著高于对照组和JS组($P<0.05$)。两种处理方式对黄鳝的存活率(SR)均未产生显著影响。在形体指标方面, JF组与JS组均显著降低了黄鳝的脾体指数(SI; $P<0.05$), 但对脏体指数(VSI)、肝体指数(HSI)及肠体指数(VI)均无显著影响($P>0.05$)。

表3 约氏乳杆菌对黄鳝生长性能和形体指标的影响

Tab. 3 The effect of *Lactobacillus johni* on growth performance and morphometric indices of *M. albus* ($n=6$)

指标 Index	CL	JF	JS
初重IBW (g)	15.99±0.05	16.00±0.05	15.98±0.04
末重FBW (g)	31.87±0.51 ^b	33.96±0.66 ^a	35.87±0.53 ^a
增重率WGR (%)	99.65±3.41 ^b	112.69±4.25 ^a	124.79±3.46 ^a
特定生长率SGR (%/d)	1.15±0.03 ^b	1.26±0.03 ^a	1.35±0.03 ^a
日均采食量ADFI [g/(I·d)]	0.36±0.01 ^b	0.38±0.01 ^a	0.37±0.01 ^{ab}
存活率SR (%)	90.00±5.00	90.00±0.00	91.67±4.41
脏体指数VSI	9.96±0.21	9.46±0.26	9.45±0.28
肝体指数HSI	5.69±0.29	5.36±0.24	5.42±0.22
肠体指数VI	3.09±0.21	3.05±0.13	2.76±0.11
脾体指数SI	0.45±0.05 ^a	0.31±0.02 ^b	0.32±0.02 ^b

注: 同一行不同上标字母表示存在显著差异($P<0.05$); 下同

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

2.2 约氏乳杆菌对黄鳝体成分的影响

各组黄鳝的体成分分析结果见表4。与CL组相比, JF和JS组均显著提高了全鱼和肌肉的粗脂肪含量($P<0.05$), 同时显著降低了肝脏粗脂肪含量($P<0.05$)。两种处理对全鱼的水分、粗蛋白、粗灰分以及肌肉水分均无显著影响($P>0.05$)。此外, JF组与JS组之间的全鱼水分、粗灰分及肌肉水分等均未表现出显著差异($P>0.05$)。

表4 约氏乳杆菌对黄鳝体成分的影响(%干物质基础, $n=6$)

Tab. 4 The effect of *Lactobacillus johni* on the nutritional content of *M. albus* (% dry basis, $n=6$)

指标Index	CL	JF	JS
全鱼Whole fish			
水Moisture	76.07±0.52	74.45±0.55	74.63±0.55
粗脂肪Crude lipid	3.81±0.16 ^b	5.32±0.37 ^a	4.96±0.20 ^a
粗蛋白Crude protein	15.49±0.08	15.24±0.20	15.88±0.26
粗灰Ash	2.82±0.04	2.71±0.21	2.71±0.10
肌肉Muscle			
水Moisture	74.96±0.38	74.85±0.62	74.52±0.29
粗脂肪Crude lipid	3.76±0.15 ^b	4.35±0.18 ^a	4.76±0.10 ^a
肝脏Liver			
粗脂肪Crude lipid	2.23±0.13 ^a	1.76±0.04 ^b	1.77±0.04 ^b

表5 约氏乳杆菌对黄鳝血糖血脂的影响

Tab. 5 The effect of *Lactobacillus johni* on blood gluco-lipid of *M. albus* ($n=6$)

指标Index	CL	JF	JS
葡萄糖GLU (mmol/L)	2.18±0.20	2.28±0.20	2.44±0.03
甘油三酯TG (mmol/L)	1.86±0.35	1.42±0.14	1.45±0.14
游离脂肪酸NEFA (mol/L)	383.87±28.93 ^a	314.77±14.74 ^b	261.81±13.20 ^b
总胆固醇T-CHO (mmol/L)	4.50±0.31 ^a	4.08±0.39 ^{ab}	3.32±0.32 ^b
高密度脂蛋白胆固醇HDL-C (mmol/L)	1.89±0.28	2.17±0.20	2.26±0.22
低密度脂蛋白胆固醇LDL-C (mmol/L)	1.04±0.09 ^a	0.94±0.11 ^{ab}	0.67±0.08 ^b

2.3 约氏乳杆菌对黄鳝血糖血脂的影响

各组黄鳝血清生化指标测定结果见表5。约氏乳杆菌处理显著改善了黄鳝的血糖血脂状况。与CL组相比, JS组显著降低了血清NEFA、T-CHO及LDL-C含量($P<0.05$), JF组仅显著降低了NEFA含量($P<0.05$), 对血清T-CHO与LDL-C含量无显著影响。

2.4 约氏乳杆菌对黄鳝肝脏脂质代谢的影响

约氏乳杆菌对黄鳝肝脏脂质含量与代谢相关酶活性的影响 黄鳝肝脏脂质含量与代谢相关酶活性结果见表6。与CL组相比, 发酵组(JF)黄鳝肝脏的HL活性显著升高($P<0.05$), 而TG含量、LPL及TL活性无显著变化($P>0.05$)。喷洒组(JS)则表现出不同的调节模式: 与对照组相比, JS组显著降低了肝脏TG含量($P<0.05$), 同时显著提高了LPL与TL活性($P<0.05$), 但其HL活性与对照组无显著差异。此外, 两组处理均显著降低了肝脏的T-CHO和LDL-C含量, 并显著提高了有益胆固醇HDL-C含量($P<0.05$)。

约氏乳杆菌对黄鳝肝脏脂质代谢相关基因表达的影响 黄鳝肝脏脂质代谢相关基因的表达

水平如图1所示。约氏乳杆菌处理对黄鳝肝脏中多种脂质代谢相关基因的表达量具有显著调节作用。与对照组相比, 喷洒组(JS)显著上调了脂肪甘油三酯脂肪酶(*atgl1*, *atgl2*和*atgl3*)和肉碱棕榈酰转移酶1(*cpt1*)等多个脂肪分解相关基因的表达($P<0.05$), 而发酵组(JF)中这些基因的表达量无显著变化; 两种处理方式还显著上调了多个涉及脂肪分解与合成的基因, 包括脂蛋白脂酶(*lpl*)、激素敏感脂肪酶(*hsl*)、脂肪酸合酶(*fas*)、二酰基甘油酰基转移酶1(*dgat1*)、乙酰辅酶A羧化酶1(*acc1*)及固醇调节元件结合蛋白1(*srebp1*; $P<0.05$)。值得注意的是, *fas*基因在JF组中的上调幅度显著高于JS组

表6 约氏乳杆菌对黄鳝肝脏脂质含量与脂质代谢相关酶活的影响

Tab. 6 Effects of *Lactobacillus johni* on lipid content and lipid metabolism-related enzyme activity in the liver of *M. albus* ($n=6$)

指标Index	CL	JF	JS
甘油三酯TG (mmol/g prot)	0.31±0.01 ^a	0.28±0.01 ^{ab}	0.27±0.02 ^b
总胆固醇T-CHO (mmol/g prot)	2.12±0.00 ^a	1.97±0.02 ^b	2.00±0.03 ^b
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C (mmol/g prot)	0.30±0.03 ^a	0.20±0.02 ^b	0.21±0.01 ^b
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C (mmol/g prot)	0.20±0.00 ^b	0.26±0.01 ^a	0.25±0.02 ^a
脂蛋白脂酶LPL (U/mg prot)	2.24±0.05 ^b	2.35±0.07 ^{ab}	2.55±0.07 ^a
肝脂酶HL (U/mg prot)	2.92±0.12 ^b	3.20±0.02 ^a	3.07±0.08 ^{ab}
总脂酶TL (U/mg prot)	5.19±0.17 ^b	5.44±0.06 ^{ab}	5.66±0.16 ^a

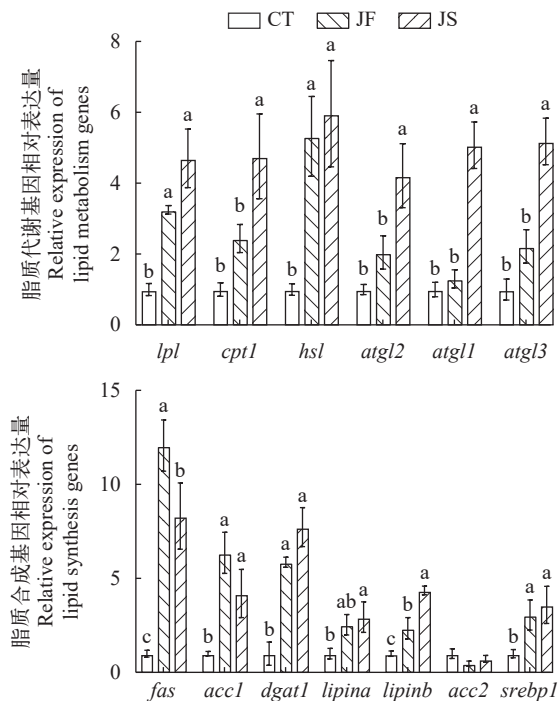


图1 约氏乳杆菌对黄鳝肝脏脂质代谢相关基因表达的影响

Fig. 1 The effects of *Lactobacillus johnsonii* on the expression of lipid metabolism-related genes in liver of *M. albus* ($n=6$)

($P<0.05$)。此外, 约氏乳杆菌处理显著下调了乙酰辅酶A羧化酶2(*acc2*)的表达($P<0.05$); 对于脂素1(*lipin1*)基因家族, JS组显著上调了*lipin1a* ($P<0.05$)和*lipin1b* ($P<0.01$)的表达, 而JF组仅显著上调了*lipin1b*的表达量($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 约氏乳杆菌对黄鳝生长性能和体成分的影响

益生菌作为饲料添加剂在提高水产动物生长性能和饲料利用率等方面展现出巨大潜力^[12-14]。本研究结果表明饲料经约氏乳杆菌CIP103620发酵或喷洒处理后, 均显著提高了黄鳝的末重、增重率和特定生长率。这一促生长效应在其他鱼类中也有广泛报道, 如饲料添加植物乳酸杆菌显著提高了巴沙鱼的特定生长率^[12]; 热灭活植物乳杆菌可显著提高罗非鱼的末重、增重率及特定生长率等生长性能^[13]; 鼠李糖乳杆菌可促进乌鳢生长^[14], 也可通过调节斑马鱼的肠道菌群来增进食欲和促进生长^[15]; 乳酸菌发酵芝麻粕可提高罗非鱼的末重、增重率及特定生长率等生长性能^[16]。这表明, 尽管菌种与宿主存在差异, 但乳酸菌改善鱼类生长性能具有普遍性。值得注意的是, JF组(发酵饲料)的日均采食量显著高于其他两组, 而喷洒组在采食量未显著增加的情况下仍表现出最强的促生长效果。这说明两种处理方式的促生长机制可能不同, 发酵处理可能通过改变饲料的营养组成、产生风味物质或改善适口性, 从而提高摄食量, 这与斑马鱼研究中添加鼠李糖乳杆菌可增加摄食的报道相符^[15]; 活菌喷洒则可能通过直接作用于鱼体或肠道菌群, 更高效地促进营养物质吸收利用与代谢, 从而在相同摄食水平下实现更高的生长性能。

除生长性能外, 本研究还发现约氏乳杆菌可显著改变黄鳝的体成分。两种处理不仅显著提高了黄鳝全鱼及肌肉的粗脂肪含量, 还显著降低了肝脏粗脂肪含量。这一结果与Hung等^[17]在布氏鲮鲤中的研究发现一致, 乳酸菌发酵豆粕可提高肌肉粗脂肪含量, 并降低肝脏脂肪蓄积。在罗非鱼研究中也发现乳酸菌发酵芝麻粕可促进肝脏脂肪分解^[16]。这提示约氏乳杆菌可能促进了膳食脂肪向肌肉组织的定向沉积, 同时减轻了肝脏的代谢负担。值得注意的是, 活菌喷洒处理在提高肌肉脂肪沉积方面优于发酵处理, 推测其机制可能与喷洒的活菌更易在肠道定植有关。定植的活菌不仅能调节肠道微生物组成、增强吸收功能^[15], 其代谢产物如(R)-亮氨酸还可能通过调控*cd36*等基因的表达, 直接影响肠道脂肪酸的吸收与转运, 从而促进肌肉脂质的沉

积^[18]。这与Xin等^[19]关于约氏乳杆菌通过调节肠道菌群促进仔猪生长的研究结论相呼应。因此, 约氏乳杆菌CIP103620可能通过提高肠道定植、改善消化吸收及调控营养物质分配, 来调控黄鳝的生长性能与体成分。

3.2 约氏乳杆菌对黄鳝血糖血脂的影响

血糖血脂是评估机体脂质代谢稳态的核心指标。在胆固醇代谢中, LDL-C负责将肝脏内胆固醇转运至外周组织, 而HDL-C则将胆固醇逆转运回肝脏分解并排出, 这一过程对维持机体脂质代谢至关重要^[20]。本研究发现约氏乳杆菌发酵或活菌喷洒处理饲料均显著降低了黄鳝血清TG、T-CHO、NEFA和LDL-C含量。这一系列变化表明约氏乳杆菌有效促进了黄鳝对脂肪的分解代谢, 并可能通过加速胆固醇的逆向转运与清除, 缓解了由高脂饲料可能引发的脂质代谢负担。该结论与多项哺乳动物模型的研究结果相互印证。例如, 乳酸杆菌CQPC05能降低肥胖小鼠血清T-CHO、TG及LDL-C水平^[21]; 鼠李糖乳酸杆菌可通过调节小鼠的脂质分解与运输, 来降低血清T-CHO和TG含量^[22]; 在斑马鱼中, 鼠李糖乳酸杆菌同样表现出改善脂代谢紊乱、降低T-CHO和TG的作用^[15]。此外, Teixeira等^[23]的研究进一步指出约氏乳杆菌能显著影响血清长链脂肪酸的组成谱, 这为其调节全身脂代谢提供了直接证据。因此, 约氏乳杆菌对黄鳝血脂指标的改善作用, 是其调节宿主全身脂代谢稳态功能的重要体现。

3.3 约氏乳杆菌对黄鳝肝脏脂质代谢的影响

肝脏是机体脂质分解代谢的核心器官^[24]。本研究发现约氏乳杆菌发酵或喷洒饲料均能有效降低黄鳝肝脏中TG、T-CHO和LDL-C含量, 而显著升高了HDL-C含量及HL、LPL和TL活性。HL和LPL是脂质降解的关键酶, LPL负责催化甘油三酯水解为单酰甘油和游离脂肪酸^[25], 其活性直接影响肝脏脂肪含量与循环脂质水平^[26]。上述酶活性的增强与肝脏脂质含量的降低, 表明约氏乳杆菌有效提升了黄鳝肝脏的脂解能力, 这与哺乳动物中观察到的乳酸杆菌减少肝脏脂质蓄积的结果一致^[27, 28]。

约氏乳杆菌对脂质代谢调控机制可能涉及对关键信号通路的激活。例如, Ding等^[29]发现约氏乳杆菌可能通过激活AMPK α /PPAR α /CPT-1信号通路促进脂肪酸氧化, 从而降低血清脂质水平。因此, 我们推测本研究中观察到的肝脏脂质代谢改善可能与约氏乳杆菌激活相关通路有关。从基因表达层面进一步揭示了其调控网络。约氏乳杆菌处理上调了黄鳝肝脏中*acc1*、*hsl*、*lpl*、*atgl*和*dgat1*等

多个关键脂质代谢相关基因, 同时抑制了*acc2*表达。*acc1*与*acc2*虽然均催化产生丙二酰辅酶A, 但功能迥异: *acc1*产物主要用于脂肪酸从头合成; 而*acc2*产物则作为信号分子抑制脂肪酸进入线粒体氧化^[30]。因此, *acc1*上调和*acc2*下调的协同作用, 可能在维持基础合成需求的同时, 为脂肪酸氧化分解创造了有利条件。此外, 脂肪酸合酶(FAS)作为脂肪酸合成的关键执行者, 其表达受转录因子固醇调节元件结合蛋白1c (SREBP-1c)的调控^[31, 32]。值得注意的是, 本研究中黄鳝肝脏*fas*与*srebp1*的表达上调, 而肉碱棕榈酰转移酶1 (*cpt1*)-脂肪酸 β -氧化的限速酶^[33]及多个脂解基因(*lpl*、*hsl*和*atgl*)也同步上调。这一看似矛盾的基因表达谱, 即脂肪合成与分解途径的关键基因同时被激活, 提示约氏乳杆菌的作用并非简单的单向抑制或促进, 而是对肝脏脂代谢进行了一次系统性重编程。此现象与多项前人研究相吻合, 例如乳酸菌可通过AMPK/ACC/CPT-1信号轴^[34]、PPAR信号通路^[35]或同时下调*srebp1*、*acc*与上调*ppara*和*cpt1a*^[36]来综合调控脂代谢。脂肪甘油三酯脂酶(ATGL)作为启动TG水解的第一步关键酶^[37], 其过表达可促进游离脂肪酸的释放与氧化, 改善肝脏脂质代谢^[38]。本研究发现*atgl*等基因表达上调, 进一步强化了约氏乳杆菌的脂解能力。同时, 调控脂肪组织形成与分化的关键基因——脂素1 (*lipin1*)的不同剪接变体(*lipin1a*, *lipin1b*)^[39]也表现出差异性的调节, 其复杂的双相功能可能与精细平衡磷脂合成与脂质储存有关^[40]。综上所述, 我们提出一个整合性的解释模型: 约氏乳杆菌的介入, 可能通过激活以AMPK/PPAR α /CPT-1为核心的分解代谢信号轴, 强力驱动脂肪酸进入 β -氧化途径。与此同时, 适度上调的合成相关基因为细胞膜更新、脂蛋白合成等基本生理过程提供了底物保障。在这种重编程的代谢网络中, 脂质流向分解途径的通量与速率可能显著超过了合成与储存的份额, 最终导致肝脏脂质含量下降、血清脂质谱改善的净效应, 从而有效缓解了肝脏脂质异常蓄积的风险。

4 结论

约氏乳杆菌CIP103620发酵和喷洒饲料均可有效促进黄鳝生长, 并改善其脂质代谢。其作用机制涉及增强肝脏脂解酶活性、调控脂肪合成与分解基因表达, 从而降低血清和肝脏的脂质蓄积, 维持脂代谢稳态。综合生长性能与脂代谢各项指标, 活菌喷洒的处理方式效果更为显著, 是黄鳝养殖中更具应用潜力的益生菌添加策略。
(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Biswas G, Korenaga H, Nagamine R, *et al.* Cytokine responses in the Japanese pufferfish (*Takifugu rubripes*) head kidney cells induced with heat-killed probiotics isolated from the Mongolian dairy products [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, **34**(5): 1170-1177.
- [2] Bai Y, Lyu M, Satoh T, *et al.* *Lactobacillus johnsonii* colonizing in mice intestine contributes to control the gut barrier function via regeneration of the crypt in DSS-treated mice [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture Reports*, 2024, **4**(9): 336-347.
- [3] Wang Z, Zhao Y, Fan D, *et al.* Sheep-derived *Lactobacillus johnsonii* M5 enhances immunity and antioxidant capacity, alleviates diarrhea, and improves intestinal health in early-weaned lambs [J]. *Microorganisms*, 2025, **13**(2): 404-423.
- [4] Ni X Q, Cao X L, Zeng D, *et al.* Effects of porcine *Lactobacillus johnsonii* JJB3 and *Bacillus subtilis* JS01 on development of faecal *SIgA* and intestinal microflora of piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2008, **20**(3): 275-280. [倪学勤, 曹希亮, 曾东, 等. 猪源约氏乳酸杆菌JJB3和枯草芽孢杆菌JS01对仔猪肠道分泌型免疫球蛋白A和菌群的影响 [J]. *动物营养学报*, 2008, **20**(3): 275-280.]
- [5] Alsudani-Ali A. Investigation into the effects of probiotic, prebiotic and synbiotic feed supplements on gut microbiota, immune function and performance of broiler chickens [D]. Nottingham Trent University, 2018: 118-124.
- [6] Zhao K, Yin H, Yan H, *et al.* Dietary supplementation of *Lactobacillus johnsonii* RS-7 improved antioxidant and immune function of weaned piglets [J]. *Animals*, 2023, **13**(10): 1595-1604.
- [7] He T, Zhu Y H, Yu J, *et al.* *Lactobacillus johnsonii* L531 reduces pathogen load and helps maintain short-chain fatty acid levels in the intestines of pigs challenged with *Salmonella enterica* Infantis [J]. *Veterinary Microbiology*, 2019(230): 187-194.
- [8] Yin Z, Wang K, Liu Y, *et al.* *Lactobacillus johnsonii* improves intestinal barrier function and reduces post-weaning diarrhea in piglets: involvement of the endocannabinoid system [J]. *Animals*, 2024, **14**(3): 493-506.
- [9] Cai Y, Huang Y, Wang Y, *et al.* *Lactobacillus johnsonii* GLJ001 prevents DSS-induced colitis in mice by inhibiting M1 macrophage polarization via gut microbiota-SCFAs axis [J]. *International Immunopharmacology*, 2025, **10**(144): 113671-113681.
- [10] Yoon H, Lee Y, Park H, *et al.* *Lactobacillus johnsonii* BFE6154 ameliorates diet-induced hypercholesterolemia [J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2023, **15**(3): 451-459.
- [11] Wang H S, Ni X Q, Qing X D, *et al.* Live probiotic *Lactobacillus johnsonii* BS15 promotes growth performance and lowers fat deposition by improving lipid metabolism, intestinal development, and gut microflora in broilers [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017(8): 1073-1086.
- [12] Van Doan H, Doolgindachaporn S, Suksri A. Effects of low molecular weight agar and *Lactobacillus plantarum* on growth performance, immunity, and disease resistance of basa fish (*Pangasius bocourti*, Sauvage 1880) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2014, **41**(2): 340-345.
- [13] Dawood M A O, Magouz F I, Salem M F I, *et al.* Modulation of digestive enzyme activity, blood health, oxidative responses and growth-related gene expression in GIFT by heat-killed *Lactobacillus plantarum* (L-137) [J]. *Aquaculture*, 2019(505): 127-136.
- [14] Li R M, Chen X M, Tian J X, *et al.* Effect of traditional Chinese medicine fermented by *Lactobacillus rhamnosus* on the growth, disease resistance and intestinal antioxidant capacity in snakehead *Channa argus* [J]. *Feed Industry*, 2023, **44**(20): 43-48. [李若铭, 陈秀梅, 田佳鑫, 等. 鼠李糖乳杆菌发酵中药对乌鳢生长性能、抗病力以及肠道抗氧化能力的影响 [J]. *饲料工业*, 2023, **44**(20): 43-48.]
- [15] Falcinelli S, Picchietti S, Rodiles A, *et al.* *Lactobacillus rhamnosus* lowers zebrafish lipid content by changing gut microbiota and host transcription of genes involved in lipid metabolism [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1): 9336-9346.
- [16] Mukhopadhyay N, Ray-A K. Effect of fermentation on the nutritive value of sesame seed meal in the diets for rohu, *Labeo rohita* (Hamilton), fingerlings [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1999, **5**(4): 229-236.
- [17] Mai H V, Nguyen T D, Thi N T T, *et al.* Effects of dietary fermented soybean meals on tissue lipid level, bile acid concentration, lipase activity and lipid digestibility in pompano fish (*Trachinotus blochii*) [J]. *Pakistan Journal of Zoology*, 2022, **54**(3): 1177-1185.
- [18] Li Y, Zhang Z, Han Q, *et al.* *Lactobacillus johnsonii*-derived leucic acid promotes fatty acid absorption and deposition by targeting CD36 [J]. *Science China Life Sciences*, 2025, **68**(6): 1727-1739.
- [19] Xin J, Zeng D, Wang H, *et al.* Probiotic *Lactobacillus johnsonii* BS15 promotes growth performance, intestinal immunity, and gut microbiota in piglets [J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2020, **12**(1): 184-193.
- [20] Pszeny V, Ehrenman K, Romano J D, *et al.* A lipolytic lecithin: cholesterol acyltransferase secreted by *Toxoplasma* facilitates parasite replication and egress [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2016, **291**(8): 3725-3746.
- [21] Zhu K, Tan F, Mu J, *et al.* Anti-obesity effects of *Lactobacillus fermentum* CQPC05 isolated from Sichuan pickle in high-fat diet-induced obese mice through PPAR- α signaling pathway [J]. *Microorganisms*, 2019, **7**(7): 194-209.

- [22] Nocianitri K A, Antara N S, Sugitha I M, *et al.* The effect of two *Lactobacillus rhamnosus* strains on the blood lipid profile of rats fed with high fat containing diet [J]. *International Food Research Journal*, 2017, **24**(2): 795-802.
- [23] Teixeira L D, Torrez Lamberti M F, Debose-Scarlett E, *et al.* *Lactobacillus johnsonii* N6.2 and Blueberry phytophenols affect lipidome and gut microbiota composition of rats under high-fat diet [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021(8): 757256-757272.
- [24] Kietzmann T. Metabolic zonation of the live: The oxygen gradient revisited [J]. *Redox Biology*, 2017(11): 622-630.
- [25] Saera-Vila A, Calduch-Giner J A, Gómez-Requeni P, *et al.* Molecular characterization of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) lipoprotein lipase. Transcriptional regulation by season and nutritional condition in skeletal muscle and fat storage tissues [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B, Biochemistry & Molecular Biology*, 2005, **142**(2): 224-232.
- [26] Auwerx J, Leroy P, Schoonjans K. Lipoprotein lipase: recent contributions from molecular biology [J]. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, 1992, **29**(3-4): 243-268.
- [27] Hu X, Wang T, Li W, *et al.* Effects of NS *Lactobacillus* strains on lipid metabolism of rats fed a high-cholesterol diet [J]. *Lipids in Health and Disease*, 2013, **12**(1): 67-78.
- [28] Xu J, Zhou Y, Cheng S, *et al.* *Lactobacillus johnsonii* attenuates liver steatosis and bile acid dysregulation in parenteral nutrition-fed rats [J]. *Metabolites*, 2023, **13**(10): 1043-1057.
- [29] Ding C, Wu H, Cao X, *et al.* *Lactobacillus johnsonii* 3-1 and *Lactobacillus crispatus* 7-4 promote the growth performance and ileum development and participate in lipid metabolism of broilers [J]. *Food & Function*, 2021, **12**(24): 12535-12549.
- [30] McGarry J D, Leatherman G F, Foster D W. Carnitine palmitoyltransferase I. The site of inhibition of hepatic fatty acid oxidation by malonyl-CoA [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1978, **253**(12): 4128-4136.
- [31] Jung E-J, Kwon S-W, Jung B-H, *et al.* Role of the AMPK/SREBP-1 pathway in the development of orotic acid-induced fatty liver [J]. *Journal of Lipid Research*, 2011, **52**(9): 1617-1625.
- [32] Leamy A K, Egnatchik R A, Young J D. Molecular mechanisms and the role of saturated fatty acids in the progression of non-alcoholic fatty liver disease [J]. *Progress in Lipid Research*, 2013, **52**(1): 165-174.
- [33] IJlst L, Mandel H, Oostheim W, *et al.* Molecular basis of hepatic carnitine palmitoyltransferase I deficiency [J]. *The Journal of Clinical Investigation*, 1998, **102**(3): 527-531.
- [34] Kim Y, Yoon S, Lee S B, *et al.* Fermentation of soy milk via *Lactobacillus plantarum* improves dysregulated lipid metabolism in rats on a high cholesterol diet [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(2): 88231-88238.
- [35] Qing X, Zeng D, Wang H, *et al.* Analysis of hepatic transcriptome demonstrates altered lipid metabolism following *Lactobacillus johnsonii* BS15 prevention in chickens with subclinical necrotic enteritis [J]. *Lipids in Health and Disease*, 2018, **17**(1): 93-102.
- [36] Nguyen H T, Gu M, Werlinger P, *et al.* *Lactobacillus sakei* MJM60958 as a potential probiotic alleviated non-alcoholic fatty liver disease in mice fed a high-fat diet by modulating lipid metabolism, inflammation, and gut microbiota [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, **23**(21): 13436-13457.
- [37] Cerk I K, Wechselberger L, Oberer M. Adipose triglyceride lipase regulation: an overview [J]. *Current Protein & Peptide Science*, 2018, **19**(2): 221-233.
- [38] Jain S S, Chabowski A, Snook L A, *et al.* Additive effects of insulin and muscle contraction on fatty acid transport and fatty acid transporters, FAT/CD36, FABPpm, FATP1, 4 and 6 [J]. *Federation of European Biochemical Societies Letters*, 2009, **583**(13): 2294-2300.
- [39] Manmontri B, Sariahmetoglu M, Donkor J, *et al.* Glucocorticoids and cyclic AMP selectively increase hepatic lipin-1 expression, and insulin acts antagonistically [J]. *Journal of Lipid Research*, 2008, **49**(5): 1056-1067.
- [40] Donkor J, Sariahmetoglu M, Dewald J, *et al.* Three mammalian lipins act as phosphatidate phosphatases with distinct tissue expression patterns [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2007, **282**(6): 3450-3457.

LACTOBACILLUS JOHNSONII* ON GROWTH PERFORMANCE AND LIPID METABOLISM IN *MONOPTERUS ALBUS

CHEN Xiao¹, JING Rui-Xue¹, XIAO Wei², CHEN Rong-Rong³, YU Ming-Jin¹, PAN Jie¹, WANG Zi-Rui¹,
CHAO Bi-Hui¹, WANG Wen-Min², XIAO Jing² and YANG Zhu-Qing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Featured Hydrobios Nutritional Physiology and Healthy Breeding, Nanchang 330045, China;

2. Public Basic Experiment Teaching Center of Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

3. College of Bioscience and Bioengineering of Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: To investigate the effects of *Lactobacillus johnsonii* CIP103620 on the growth performance and lipid metabolism of *Monopterus albus*, 180 *M. albus* individuals were randomly divided into a control group (CL, basic feed), a fermentation group (JF, 1×10^7 CFU/g *L. johnsonii* fermentation feed), and a spraying group (JS, surface spraying with the same amount of live bacteria feed). The feeding experiment lasted for 8 weeks. Results showed that compared with the control group, the final weight, weight gain rate, and specific growth rate were significantly increased in both the JF group and JS group ($P < 0.05$), with a more pronounced effect observed in the JS group. Both treatment groups significantly increased the crude fat content in whole fish and muscle ($P < 0.05$) and reduced the lipid deposition in the liver ($P < 0.05$). In addition, both groups significantly reduced the levels of serum triglycerides, total cholesterol, low-density lipoprotein cholesterol, and non-esterified free fatty acids ($P < 0.05$), and increased the activities of hepatic lipase, lipoprotein lipase, and total lipase ($P < 0.05$). Gene expression analysis revealed that the expression of lipolysis-related genes (*cpt1*, *lpl*, *hsl*, *atgl*s) and some lipogenic genes (*acc1*, *fas*) was significantly up-regulated in the JS group, while the expression of *acc2* gene was down-regulated ($P < 0.05$). The up-regulation of lipolysis-related gene expression in the JF group was weaker. Therefore, *L. johnsonii* may effectively promote the growth of *M. albus* and improve lipid metabolism homeostasis by enhancing lipid catabolism in the liver and regulating the expression of related genes. Comprehensive analysis showed that the live bacteria spraying treatment had a more significant effect on promoting growth and regulating lipid metabolism, and was a more suitable application method for probiotics.

Key words: Growth performance; Lipid metabolism; *Lactobacillus johnsonii*; *Monopterus albus*