

张 颂, 蒋 明, 文 华, 等. 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼生长及糖代谢的影响[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(3): 1-7.

饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼生长及糖代谢的影响

张 颂¹, 蒋 明^{1,2}, 文 华², 黄 凤², 吴 凡², 田 娟², 刘 伟²

(1 华中农业大学 水产学院, 湖北 武汉 430070; 2 中国水产科学研究院 长江水产研究所, 湖北 武汉 430223)

摘要:【目的】研究饲料中碳水化合物(CHO)与脂肪(L)比例[$m(\text{CHO}):m(\text{L})$]对胭脂鱼 *Myxocyprinus asiaticus* 幼鱼生长、饲料利用及糖代谢酶活力的影响, 确定其适宜添加比例. 【方法】以 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 0.29、0.81、1.58、2.88、5.46 和 13.22 的 6 种等氮(粗蛋白质质量分数 41%)等能(16 kJ/g)饲料, 投喂初始体质量为 (4.01 ± 0.02) g 的胭脂鱼幼鱼 8 周, 测定并分析其对胭脂鱼幼鱼增质量率、特定生长率、鱼体营养成分和糖代谢酶活力等指标的影响. 【结果和结论】随着饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 增加, 胭脂鱼幼鱼的增质量率和特定生长率先上升后下降, 均在 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 5.46 时达到最高, 并显著高于其他组 ($P < 0.05$), 饲料系数呈相反趋势; 全鱼粗脂肪含量随 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 增加显著下降 ($P < 0.05$), 肝脏粗脂肪则呈先降后升的趋势, 在 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 2.88 时达到最低; 肌肉粗脂肪含量在 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 13.22 时达最低, 且显著低于 0.29 时 ($P < 0.05$). 随 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 增加, 肝脏三酰甘油的含量显著上升 ($P < 0.05$), 谷草转氨酶和谷丙转氨酶活力先升高后降低, 均在 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 2.88 时达到最高; 肝脏丙酮酸激酶活力随 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 增加显著上升 ($P < 0.05$), 而磷酸烯醇式丙酮酸激酶活力则呈下降趋势, 己糖激酶和葡萄糖-6-磷酸酶活力无显著变化 ($P > 0.05$). 用折线回归模型拟合特定生长率和 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的关系, 得到胭脂鱼幼鱼获得最大生长时, 饲料中 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 4.65.

关键词: 胭脂鱼; 碳脂比; 生长性能; 糖代谢酶
中图分类号: S963 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2014)03-0001-07

Effects of dietary carbohydrate to lipid levels on growth performance and carbohydrate metabolism of juvenile Chinese sucker, *Myxocyprinus asiaticus*

ZHANG Song¹, JIANG Ming^{1,2}, WEN Hua², HUANG Feng², WU Fan², TIAN Juan², LIU Wei²
(1 College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2 Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China)

Abstract:【Objective】This study investigated the influences of dietary carbohydrate-to-lipid $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ on growth performance, feed utilization and carbohydrate metabolism enzymes activities of juvenile Chinese sucker, *Myxocyprinus asiaticus* to detect the suitable addition proportion of $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ to the diet of juvenile Chinese sucker. 【Method】Six isonitrogenous (crude protein 41%) and isoenergetic (16 kJ/g) diets were formulated to contain with graded levels of $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ (0.29, 0.81, 1.58, 2.88, 5.46 and 13.22). Each diet was randomly fed to one treatment of Chinese sucker with an average initial body mass of (4.01 ± 0.02) g for 8 weeks. Mass gain rate (MGR), specific growth rate (SGR), body composition and carbohydrate metabolism enzymes activities of juvenile Chinese sucker were detected and analyzed. 【Result and conclusion】The mass gain rate and specific growth rate increased initially

收稿日期: 2013-06-27 优先出版时间: 2014-03-31
优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.7671/j.issn.1001-411X.2014.03.001.html>
作者简介: 张 颂 (1988—), 女, 硕士研究生, E-mail: zhangsong776@126.com; 通信作者: 文 华 (1965—), 研究员, 博士, E-mail: wenhua_hb@163.com
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203086-06)

but then decreased with the increasing dietary $m(\text{CHO}):m(\text{L})$, thus reaching the highest in fish fed diets with $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ of 5.46, which was significantly higher than those of fish fed other diets ($P < 0.05$), whereas feed coefficient rates (FCR) showed a converse trend; the crude lipid content in whole-body of fish decreased with the increasing dietary $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ significantly ($P < 0.05$), while hepatic crude lipid decreased initially and then increased, reaching the lowest level in fish fed diets with $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ of 2.88; Hepatic triglyceride concentrations increased significantly with the increasing dietary $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ ($P < 0.05$), while activities of aspartate aminotransferase (AST) and alanine aminotransferase (ALT) increased initially and then decreased, reaching the peak with dietary $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ of 2.88; lipid content of muscle was lowest in fish fed diet with $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ of 13.22, which was significantly lower than in fish fed diet with $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ of 0.29 ($P < 0.05$). Hepatic pyruvate kinase (PK) activities increased significantly with the increasing dietary $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ ($P < 0.05$), while phosphoenolpyruvate carboxykinase (PEPCK) showed a converse trend. No significant difference was observed in activities of hepatic hexokinase (HK) and glucose-6-phosphatase (G-6-pase) among dietary treatments ($P > 0.05$). Based on broken-line regression analysis of SGR against dietary $m(\text{CHO}):m(\text{L})$, a $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ of 4.65 was proved to be optimal for the growth of juvenile Chinese sucker.

Key words: *Myxocyprinus asiaticus*; carbohydrate to lipid level; growth performance; carbohydrate metabolism enzyme

在鱼饲料中使用适宜水平的非蛋白质能源物质(碳水化合物和脂肪)可起到节约蛋白,提高饲料效率的作用。但饲料非蛋白质能源的选择不当或含量不合适都会对鱼类的生长、饲料效率、营养物质沉积率和鱼体生化成分产生直接影响。如添加过量的脂肪容易引起饲料颗粒质量问题,不利于鱼类生长^[1],同时造成鱼体脂肪含量过高,影响鱼肉风味,而过高的糖会引起鱼类抗病力低、生长缓慢、死亡率高等症状^[2-3]。因此,很有必要确定饲料中适宜的碳、脂比例,以便获得最佳的生长和饲料效率。目前已经在阳光鲈鱼 *Morone chrysops* × *M. saxatilis*^[4]、杂交胡子鲇 *Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*^[5]、罗非鱼 *Tilapia zilli*^[6] 以及尖齿胡子鲇 *Clarias gariepinus*^[7] 等鱼中有过关于饲料中适宜的碳、脂比例的研究报道,其饲料中适宜的碳、脂比例分别为 2.5 ~ 16.8、3.83 ~ 11.24、0.81 ~ 8.76 和 1.7 ~ 3.4。

胭脂鱼 *Myxocyprinus asiaticus* 属鲤形目亚口鱼科(胭脂鱼科)胭脂鱼属,是我国名贵淡水珍稀鱼类,国家二级野生保护动物。由于其生长快、肉质鲜美、体型奇特、抗病力强等特点,胭脂鱼具有较高的经济价值。目前,有关胭脂鱼的营养与饲料开展了仔鱼开口饵料^[8]、蛋白质需要量^[9-10]、植物蛋白源利用^[11]以及饲料脂肪适宜添加水平^[12]的研究,本试验拟在已有研究基础上,确定胭脂鱼饲料中适宜的碳、脂比例。

<http://xuebao.scau.edu.cn>

1 材料与方法

1.1 试验饲料与试验设计

试验饲料为半纯化饲料,以鱼粉、酪蛋白和明胶为蛋白源,糊精作为糖源,鱼油作为脂肪源,分别配成6种不同碳、脂比例的等氮等能的试验饲料,饲料中的粗蛋白质质量分数和总能水平分别为41%和16 kJ/g左右(表1),通过糊精等能替代脂肪,使得饲料中碳、脂比例[$m(\text{CHO}):m(\text{L})$]分别为0.29、0.81、1.58、2.88、5.46和13.22。各饲料原料粉粹后过60目分筛,按配比精确称量、混合,制成短条状饲料,用电风扇鼓风吹干至水分8%左右,后破碎成直径大约1 mm的颗粒饲料,置于-20℃冰柜中冷藏备用。

1.2 试验用鱼和饲养管理

试验用胭脂鱼幼鱼购自万州水产研究所胭脂鱼繁殖场,试验鱼运回消毒后暂养2周,暂养期间投喂商品饲料,使其适应试验环境及试验饲料。

正式试验开始前,将试验鱼饥饿24 h后,选取规格一致、体格健壮、采食活跃的幼鱼360尾,平均体质量为 (4.01 ± 0.02) g,将试验鱼随机分为6组,每组设3个重复,每个重复20尾鱼,饲养于18个体积为400 L的玻璃纤维养殖桶中,分别投喂6组试验饲料,每天表观饱食投喂3次(8:00、12:00和16:00各1次)。养殖试验持续8周,每两周称量1次体质量,

并根据鱼体生长、摄食情况和水温等环境状况及时调整投喂量. 每日记录水温、试验鱼摄食及死亡情况, 试验期间水温 20 ~ 28 ℃, pH 6.5 ~ 7.0, 溶解氧大于 5 mg/L, 氨氮质量浓度小于 0.05 mg/L.

表 1 试验饲料原料及基本营养组成
Tab.1 Formulation and proximate analysis of experimental diets

<i>m</i> (CHO): <i>m</i> (L)	饲料原料及比例/%										营养组成及比例/%					总能/ (kJ·g ⁻¹)
	酪蛋白	明胶	鱼粉	鱼油	糊精	维生素 预混料 ¹⁾	矿物质 预混料 ²⁾	氯化 胆碱	羧甲基 纤维素	微晶 纤维素	水分	粗蛋白	粗脂肪	碳水 化合物	粗灰分	
0.29	34	8.5	10	14.5	5.0	1	4	0.5	1	21.5	8.65	41.21	15.12	4.38	4.42	16.46
0.81	34	8.5	10	12.0	11.6	1	4	0.5	1	17.4	8.52	40.79	12.48	10.11	4.72	16.40
1.58	34	8.5	10	9.5	18.2	1	4	0.5	1	13.3	8.67	40.88	10.03	15.85	4.44	16.42
2.88	34	8.5	10	7.0	24.8	1	4	0.5	1	9.2	8.59	41.07	7.49	21.59	4.55	16.39
5.46	34	8.5	10	4.5	31.4	1	4	0.5	0	6.1	8.62	41.18	5.01	27.38	4.45	16.41
13.22	34	8.5	10	2.0	38.0	1	4	0.5	0	2	8.64	40.79	2.50	33.05	4.25	16.38

1) 维生素预混料组成为每 1 000 g 饲料中含有: 硫胺素盐酸盐 15 mg; 核黄素 20 mg; 盐酸吡哆醇 10 mg; 维生素 B₁₂ 0.02 mg; 叶酸 10 mg; 维生素 K₃ 10 mg; 肌醇 400 mg; 泛酸钙 400 mg; 烟酰胺 120 mg; 生物素 1 mg; 维生素 A 2000 IU; 维生素 D₃ 2000 IU; 维生素 E 250 mg; 维生素 C 400 mg. 2) 矿物质预混料组成为每 1 000 g 饲料中含有: Ca(H₂PO₄)₂·H₂O 16 g; KH₂PO₄ 12 g; NaCl 4 g; KIO₃ 4.8 mg; CoCl₂·6H₂O 40 mg; CuSO₄·5H₂O 10 mg; FeSO₄·H₂O 80 mg; ZnSO₄·H₂O 120 mg; MnSO₄·H₂O 80 mg; MgSO₄ 2.4 g.

1.3 取样

养殖试验结束后, 将鱼体饥饿 24 h, 以桶为单位称量试验鱼总质量. 每桶随机取 8 尾鱼, 其中 3 尾用于测定全鱼的营养成分, 另外 5 尾用于测定鱼体生长性能、肝脏脂质指标和糖代谢酶活性. 具体操作如下: 先测量体长和体质量, 再解剖, 分离肝脏, 最后取背部两侧肌肉. 将所有样品存放在 -80 ℃ 冰箱备用.

1.4 分析方法

全鱼及饲料的水分含量采用 105 ℃ 恒温干燥失重法测定, 粗脂肪采用索氏抽提法 (GB/T5009.6). 粗蛋白采用凯氏定氮法 (GB/T5009.3). 粗灰分采用马福炉灰化法 (GB/T5009.4). 肝脏脂质指标: 肝脏样品在 4 ℃ 下解冻, 剪碎, 按质量体积比 1:9 加入生理盐水, 冰水浴匀浆, 匀浆液经 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 取上清液待测. 总胆固醇 (TC)、三酰甘油 (TG) 的含量和谷丙转氨酶 (ALT)、谷草转氨酶 (AST) 的活性采用 Sysmex 全自动生化分析仪 (Chemix-800) 测定. 肝脏糖代谢酶活力指标: 所有酶的活性均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定. 在 4 ℃ 条件下, 称取 0.5 g 肝组织, 加入一定量的缓冲液充分匀浆, 匀浆液经 2 000 ~ 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 取上清液待测. 己糖激酶 (HK) 和丙酮酸激酶 (PK) 利用紫外分光光度计比色法测定, 葡萄糖-6-磷酸酶 (G-6-pase) 和磷酸烯醇式丙酮酸激酶 (PEPCK) 利用酶标仪测定. 己糖激酶活力单位定义为: 在 37 ℃ pH7.6 的条件下, 每克组织

蛋白在本反应体系中每分钟生成 1 mmol 的 NADPH 为 1 个酶活力单位 (U); 丙酮酸激酶活力单位定义为: 在 37 ℃ pH 7.6 的条件下, 每克组织蛋白每分钟将 1 μmol 的 PEP 转变成丙酮酸为 1 个酶活力单位 (U); 其中肝脏组织蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定 (试剂盒, 南京建成生物工程研究所提供). 葡萄糖-6-磷酸酶 (G-6-pase) 和磷酸烯醇式丙酮酸激酶 (PEPCK) 活力单位定义为: 在 37 ℃ 条件下, 每克组织蛋白每分钟水解 1 μmol 底物为 1 个酶活力单位 (U).

1.5 计算公式及数据统计

胭脂鱼幼鱼增质量率、特定生长率、饲料系数、蛋白质效率和成活率分别根据以下公式计算:

增质量率 = $(m_t - m_0) / m_0 \times 100\%$;
特定生长率 = $[(\ln m_t - \ln m_0) / t] \times 100\%$;
饲料系数 = $m_f / (m_t - m_0)$;
蛋白质效率 = $(m_t - m_0) / (m_f \times w_D \times w_P) \times 100\%$;
成活率 = 终尾数 / 初尾数 $\times 100\%$.

式中, m_t 代表终末体质量 (g), m_0 代表初始体质量 (g), t 为饲养时间 (56 d), m_f 为摄入饲料的总质量 (g), w_D 为饲料中干物质的质量分数 (%), w_P 为饲料中粗蛋白质量分数 (%).

数据均以平均值 ± 标准差表示, 采用 SPSS 18.0 统计软件中 One-way ANOVA 方差分析和 Duncan's 多重比较法分析试验结果的差异显著性.

2 结果

2.1 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼生长及饲料利用的影响

由表 2 可知,胭脂鱼幼鱼的生长随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的增加而呈先上升后下降的趋势, $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 5.46 组的试验鱼终末均体质量、增质量率及特定生长率最高,且显著高于其他各组 ($P < 0.05$); $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 1.58、2.88、

13.22 组特定生长率无显著差异 ($P > 0.05$); 饲料系数随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的增加而呈先下降后上升的趋势, $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 5.46 组饲料系数最低,为 1.35; 蛋白质效率的变化趋势与饲料系数的正好相反; 根据饲料碳、脂比例与试验胭脂鱼特定生长率的关系,经折线模型回归分析得回归方程为: $y = 0.087(x - 4.65) + 1.92$, $R^2 = 0.864$ (图 1), 得胭脂鱼幼鱼获得最大生长时饲料中最适碳、脂比例为 4.65.

表 2 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼生长性能和饲料利用的影响¹⁾

Tab.2 Growth performances and feed utilization efficiency of Chinese sucker fed diets with varying carbohydrate to lipid ratios

$m(\text{CHO}):m(\text{L})$	初始均体 质量/g	终末均体 质量/g	增质量 率/%	特定生长 率 ²⁾ /%	饲料系数	蛋白质 效率/%	成活率/%
0.29	3.93 ± 0.15a	9.09 ± 0.59a	1.32 ± 0.11a	1.50 ± 0.09a	2.08 ± 0.27c	1.17 ± 0.11a	75.00 ± 0.05a
0.81	3.94 ± 0.04a	9.76 ± 0.35b	1.47 ± 0.11ab	1.62 ± 0.08ab	2.05 ± 0.25c	1.22 ± 0.15ab	75.00 ± 0.00a
1.58	4.01 ± 0.13a	10.14 ± 0.31bc	1.53 ± 0.12b	1.66 ± 0.10bc	1.92 ± 0.24bc	1.30 ± 0.17ab	78.30 ± 0.03ab
2.88	4.01 ± 0.04a	10.97 ± 0.16d	1.74 ± 0.06c	1.80 ± 0.04c	1.51 ± 0.09a	1.62 ± 0.09c	80.00 ± 0.05ab
5.46	4.01 ± 0.04a	12.12 ± 0.12e	2.03 ± 0.01d	2.00 ± 0.01d	1.35 ± 0.05a	1.78 ± 0.06c	83.30 ± 0.03b
13.22	4.03 ± 0.15a	10.43 ± 1.02cd	1.61 ± 0.13bc	1.71 ± 0.09bc	1.76 ± 0.02bc	1.39 ± 0.04b	76.70 ± 0.03ab

1) 表中数据为平均值 ± 标准差,同列数据后凡有一个相同小写字母者表示差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法); 2) 指饲养期内每天的特定生长率.

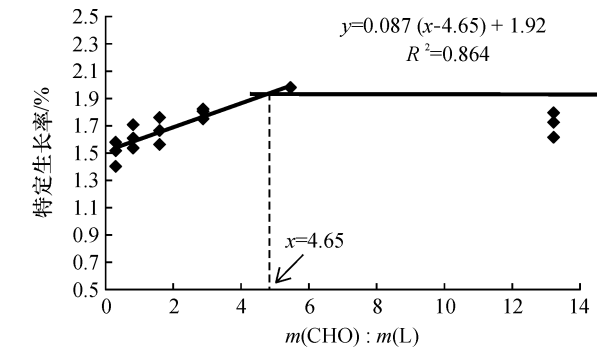


图 1 饲料碳、脂比[$m(\text{CHO}):m(\text{L})$]与胭脂鱼幼鱼特定生长率的回归分析

Fig.1 Regression analysis between dietary[$m(\text{CHO}):m(\text{L})$] levels and specific growth rate of juvenile Chinese sucker

2.2 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼鱼体营养成分的影响

由表 3 可见,饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 对胭脂鱼全鱼和肌肉的水分、粗蛋白含量无显著影响 ($P > 0.05$); 全鱼粗脂肪含量随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的增加而呈显著的下降趋势, $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 0.29、0.81 和 1.58 处理组粗脂肪含量显著高于其余 3 组 ($P < 0.05$), 这 3 组含量依次降低但差异不显著 ($P > 0.05$); 随 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的增加, 全鱼粗灰分呈先下降后上升的趋势, $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为

2.88 和 5.46 组含量显著低于 0.29、0.81 和 13.22 组 ($P < 0.05$); 肌肉粗脂肪含量随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的增加而下降, $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 13.22 组粗脂肪含量显著低于 0.29 组 ($P < 0.05$); 肝脏粗脂肪随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的增加呈先下降后上升的趋势, 在 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 2.88 组含量最低.

2.3 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼肝脏生化指标的影响

由表 4 可见,饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 对胭脂鱼幼鱼肝脏中总胆固醇含量无显著影响 ($P > 0.05$); 随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的增加肝脏三酰甘油的含量呈一直上升趋势, 当 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 13.22 时, 其含量达到最大且显著高于其他 5 组 ($P < 0.05$); 肝脏中谷草转氨酶和谷丙转氨酶活力随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的增加呈先上升后下降的趋势, 均在 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 2.88 时达到最大值, 且显著高于其他各组 ($P < 0.05$). 根据饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 与试验鱼肝脏谷草转氨酶活力的关系, 经二次曲线模型回归分析得回归方程为 $y = -1.7125x^2 + 14.054x + 461.7$, $R^2 = 0.8931$ (图 2), 得饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 4.10 时试验胭脂鱼幼鱼肝脏谷草转氨酶活力最高.

表3 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼鱼体组成的影响¹⁾

Tab.3 Effects of dietary carbohydrate to lipid ratios on body composition of Chinese sucker (fresh mass percentage) %

$m(\text{CHO}):m(\text{L})$	全鱼				肌肉			肝脏	
	$w(\text{水分})$	$w(\text{粗脂肪})$	$w(\text{粗蛋白})$	$w(\text{粗灰分})$	$w(\text{水分})$	$w(\text{粗脂肪})$	$w(\text{粗蛋白})$	$w(\text{水分})$	$w(\text{粗脂肪})$
0.29	71.22±0.68a	8.04±0.09c	16.88±1.30a	2.71±0.08c	73.9±0.41a	3.25±0.21b	17.92±0.30a	67.79±2.69a	9.14±0.22c
0.81	71.04±0.13a	8.03±0.15c	16.71±0.44a	2.58±0.10bc	74.04±0.71a	3.13±0.13ab	17.50±0.50a	69.28±1.21a	9.07±0.41bc
1.58	71.43±0.80a	7.95±0.10c	17.20±0.51a	2.51±0.06ab	74.09±0.43a	3.16±0.14ab	17.63±0.33a	67.37±1.42a	8.65±0.21ab
2.88	71.53±0.31a	7.59±0.13b	16.44±0.60a	2.38±0.06a	73.19±0.66a	3.09±0.16ab	17.32±0.81a	67.83±2.59a	8.56±0.22a
5.46	71.35±0.53a	7.50±0.05b	16.78±0.42a	2.41±0.07a	73.54±0.48a	3.14±0.22ab	17.37±0.47a	67.55±0.96a	8.99±0.46abc
13.22	71.76±0.82a	7.28±0.18a	16.47±0.70a	2.70±0.06c	74.42±1.20a	2.96±0.33a	17.56±0.27a	68.29±1.47a	9.12±0.33c

1) 表中数据为平均值±标准差(以湿质量计),同列数据后凡有一个相同小写字母者表示差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)。

表4 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼肝脏生化指标的影响¹⁾

Tab.4 Effects of dietary carbohydrate to lipid ratios on liver biochemical parameters of Chinese sucker

$m(\text{CHO}):m(\text{L})$	$c(\text{总胆固醇})/$ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	$c(\text{三酰甘油})/$ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	谷草转氨酶活性/ ($\text{U}\cdot\text{L}^{-1}$)	谷丙转氨酶活性/ ($\text{U}\cdot\text{L}^{-1}$)
0.29	2.56±0.18a	1.35±0.10a	427.45±6.08b	90.67±6.03a
0.81	3.03±0.43a	1.50±0.07a	474.74±10.29c	92.00±3.00ab
1.58	3.17±0.82a	2.29±0.22b	485.67±8.53c	96.33±5.03ab
2.88	2.75±0.39a	2.37±0.56b	517.32±7.37d	110.67±2.08c
5.46	2.87±0.36a	2.97±0.32c	465.09±11.36c	101.33±6.51b
13.22	3.04±0.90a	3.71±0.41d	350.52±13.46a	99.67±6.03ab

1) 表中数据为平均值±标准差,同列数据后凡有一个相同小写字母者表示差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)。

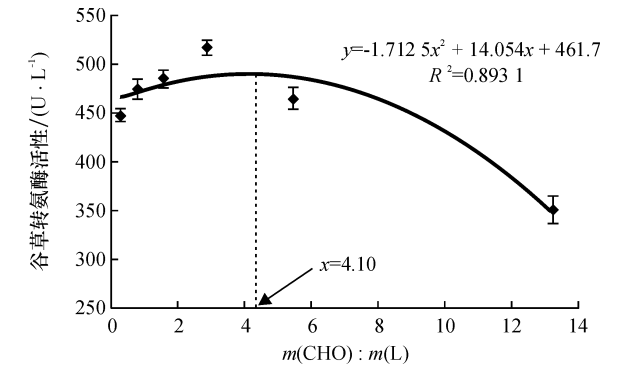


图2 饲料碳、脂比[$m(\text{CHO}):m(\text{L})$]与胭脂鱼幼鱼肝脏谷草转氨酶的回归分析
Fig.2 Regression analysis between dietary[$m(\text{CHO}):m(\text{L})$] levels and liver aspartate aminotransferase activities of juvenile Chinese sucker

2.4 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼肝脏糖酵解及糖异生酶活力的影响

由表5可见,饲料中 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 对胭脂鱼肝脏丙酮酸激酶活力影响显著,随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 增加,丙酮酸激酶活力呈上升趋势, $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为5.46和13.22组丙酮酸激酶活力显著高于其余各组($P<0.05$);肝脏磷酸烯醇式丙酮酸激酶活力随 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 升高呈下降趋势, $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为2.88、5.46和13.22组磷酸烯醇式丙酮酸激酶活力显著低于其余3个组($P<0.05$),但这3组之间无显著差异($P>0.05$);饲料中 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 对肝脏己糖激酶和葡萄糖-6-磷酸酶活力无显著影响($P>0.05$)。

表5 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼肝脏糖代谢酶活力的影响¹⁾

Tab.5 Effects of dietary carbohydrate to lipid ratios on liver activities of carbohydrate metabolism enzymes of Chinese sucker

$m(\text{CHO}):m(\text{L})$	己糖激酶活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	丙酮酸激酶活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	葡萄糖-6-磷酸酶活性/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	磷酸烯醇式丙酮酸 激酶活性/($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)
0.29	3.95±0.80a	29.64±4.96a	11.09±1.02a	19.27±1.41c
0.81	3.12±1.10a	34.53±0.26ab	10.87±0.60a	18.04±0.61bc
1.58	3.53±1.24a	38.51±4.82b	11.64±1.16a	17.05±1.57b
2.88	2.97±0.26a	45.50±2.39b	11.19±0.15a	14.73±0.75a
5.46	2.58±0.92a	61.42±6.55c	11.07±0.11a	13.98±1.11a
13.22	3.18±0.94a	72.38±6.09c	10.59±0.76a	12.86±0.74a

1) 表中数据为平均值±标准差,同列数据后凡有一个相同小写字母者表示差异不显著($P>0.05$,Duncan's 法)。

3 讨论与结论

3.1 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼生长性能的影响

本试验中,胭脂鱼幼鱼在饲喂 56 d 后,各试验组的终末均体质量、增质量率和特定生长率随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 增加呈先上升后下降的趋势,均在 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 5.46 时达到最大值,且显著高于其他试验组,同时,本试验中蛋白质效率在 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 过高或过低时也显著下降,这表明饲料中适宜的碳、脂比例,可以增强鱼类利用脂肪和糖类时的协同效应,进而促进鱼类生长、提高饲料利用率。同样,在攀鲈 *Anabas testudineus*^[13]、杂交胡子鲇^[5]和尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*^[14]等研究中也类似的发现。高脂肪低碳水化合物饲料会导致试验鱼生长缓慢和饲料效率降低,可能是高的脂肪含量导致鱼类的总摄食量降低,而摄食过量的饲料糖也会降低鱼类生长和饲料利用,饲料中鱼类的必需脂肪酸缺乏可能是高碳水化合物低脂肪饲料处理组鱼生长和饲料效率下降的原因之一。以特定生长率为评价指标,胭脂鱼饲料中最适碳、脂比例为 4.65,这个结果比瓦氏黄颡鱼 *Pelteobagrus vachelli*^[15]、长吻鮠 *Leiocassis longirostris*^[16]中报道的适宜比例要高,因此推断胭脂鱼因其杂食习性而比肉食性鱼类对饲料碳水化合物有更好的耐受性。

3.2 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼鱼体营养成分的影响

饲料中的脂肪含量是影响鱼体脂肪含量的最重要因素。本试验中全鱼粗脂肪含量随 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 的增加而显著减少。一些研究发现,随饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 升高,尖齿胡子鲇 *Clarias gariepinus*^[17]和星斑川鲿 *Platichthys stellatus*^[18]等鱼体脂肪含量降低,全鱼脂肪和饲料中脂肪含量呈正相关性,产生这种现象的主要原因是脂肪绝对摄入量的减少。这一结果表明饲料中过量的脂肪比可消化糖更易以脂肪形式沉积在胭脂鱼鱼体内。当饲料中 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 从 0.29 增加到 2.88 时,随饲料中脂肪比例的降低胭脂鱼肝脏脂肪的合成和沉积减少;而当 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 从 2.88 增加到 13.22 时,其肝脏中的脂肪含量显著增加,可能是饲料中的高含量碳水化合物[较高的 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$]会促进胭脂鱼肝脏的脂肪合成并在肝脏沉积。

3.3 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼肝脏生化指标的影响

碳水化合物代谢与脂类代谢之间存在着密切的

联系。在糖代谢的过程中,糖酵解产物丙酮酸在有氧条件下先氧化脱羧生成乙酰辅酶 A,进而合成总胆固醇和三酰甘油。本试验中,胭脂鱼幼鱼肝脏的三酰甘油含量与饲料中 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 呈正相关,可能是饲料中的脂肪抑制了鱼体三酰甘油的合成,有研究表明,随着饲料中脂肪含量的增加,鱼体参与磷脂合成的葡萄糖增加,从而抑制了葡萄糖参与三酰甘油的合成^[2]。谷草转氨酶和谷丙转氨酶是氨基酸代谢过程中 2 个重要的氨基转移酶,正常生理机能情况下,这 2 种酶主要存在于肝脏细胞内,当组织细胞受损时,大量谷草转氨酶和谷丙转氨酶从细胞内逸出进入血液,肝组织内这 2 种酶的活性就会降低,它们是目前发现的反映肝损伤的主要敏感指标^[19]。本研究中,在饲料 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 过高和过低时,肝脏谷草转氨酶和谷丙转氨酶活力均显著降低,说明幼鱼肝脏内的部分谷草转氨酶和谷丙转氨酶可能已进入血液,其肝功能可能受到了损害,即摄食高水平含量的碳水化合物或脂肪容易造成胭脂鱼鱼体代谢负担,损害其肝脏功能。

3.4 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼肝脏糖酵解酶活力的影响

糖酵解是鱼体内葡萄糖分解供能的一条重要途径。己糖激酶和丙酮酸激酶是糖酵解过程中的关键酶,已有研究表明,己糖激酶专一性差, K_m 值低,易饱和而失去活力,在鱼类中活性较低,因此改变饲料组成,己糖激酶的活性不发生变化,在南方鲇 *Southern catfish*^[20]、翘嘴红鲌 *Erythroculter ilishaeformis*^[21]等相关研究中发现饲料中的糖水平对己糖激酶没有显著影响,这与本研究中饲料碳水化合物水平的变化对己糖激酶活力影响不显著的结果一致。丙酮酸激酶活力随饲料中糖含量的增加而显著增强,说明高糖饲料能显著提高胭脂鱼幼鱼肝脏丙酮酸激酶活力。在金头鲷 *Sparus aurata*^[22]、欧洲舌齿鲈 *Dicentrarchus labrax*^[23]的相关研究中也类似报道,而一些研究发现饲料糖水平对鱼类的丙酮酸激酶活力没有产生显著影响,例如用高糖饲料喂养虹鳟 *Oncorhynchus mykiss*,没有显著提高丙酮酸激酶的 mRNA 表达量^[24],因此,鱼类丙酮酸激酶活力的调节可能是由基因转录后的修饰作用完成,这有待进一步研究。

3.5 饲料碳、脂比例对胭脂鱼幼鱼肝脏糖异生酶活力的影响

糖异生是维持血糖恒定、肝脏补充或恢复糖原储备的重要途径。葡萄糖-6-磷酸酶作为糖异生途径的第一个限速酶,对氧化 6-磷酸葡萄糖去磷酸化生成

葡萄糖从而保持血糖的恒定有着重要的作用. 本研究中饲料碳水化合物水平的变化对肝脏葡萄糖-6-磷酸酶活力没有显著影响,与虹鳟^[25]、欧洲舌齿鲈^[23]的相关研究结果一致. 但鲤鱼 *Cyprinus carpio*^[26]、金头鲷^[27]的葡萄糖-6-磷酸酶活性和基因表达量在高糖饲料条件下受到显著抑制,就目前看,关于饲料碳水化合物含量对鱼类葡萄糖-6-磷酸酶调控作用的研究还没有一致的结果,可能与该酶 mRNA 的表达水平受饲料碳水化合物的负反馈影响较小有关,而是否与鱼类的食性有关,还待进一步的研究. 对鲤鱼^[28]、翘嘴红鲌^[29]的研究表明,在投喂高糖饲料时,鱼体内的磷酸烯醇式丙酮酸激酶活性会随之下降,本试验中肝脏磷酸烯醇式丙酮酸激酶活性随 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 升高呈下降趋势,与前述研究报道一致,表明饲料中高水平的糖能有效降低胭脂鱼肝脏中的磷酸烯醇式丙酮酸激酶活性.

3.6 结论

在本试验中,胭脂鱼幼鱼在 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 5.46 时表现出了最高的增质量率、特定生长率和蛋白质效率,表明胭脂鱼对饲料碳水化合物有较强的耐受力. 在本试验条件下,以特定生长率为指标求得胭脂鱼幼鱼饲料的最适 $m(\text{CHO}):m(\text{L})$ 为 4.65.

参考文献:

- [1] ERFANULLAH A K J. Effect of dietary carbohydrate-to-lipid ratio on growth and body composition of walking catfish (*Clarias batrachus*) [J]. Aquaculture, 1998, 161 (1/2/3/4): 159-168.
- [2] BRAUGE C, CORRAZE G, MEDALE F. Effects of dietary levels of carbohydrate and lipid on glucose oxidation and lipogenesis from glucose in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, reared in freshwater or in seawater [J]. Comp Biochem Physiol, 1995, 111A(1): 117-124.
- [3] TAN Qingsong, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al. Effect of dietary carbohydrate-to-lipid ratios on growth and feed utilization in Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther) [J]. J Appl Ichthyol, 2007, 23(5): 605-610.
- [4] NEMATIPOUR G R, BROWN M L, GATLIN III D M. Effect of dietary carbohydrate: lipid ratio on growth and body composition of hybrid striped bass [J]. J World Aquacult Soc, 1992, 23(2): 128-132.
- [5] JANTRAROTAI W, SITASIT P, RAICHAPAKDEE S. The optimum carbohydrate to lipid ratio in hybrid *Clarias* catfish (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) diets containing raw broken rice [J]. Aquaculture, 1994, 127 (1): 61-68.
- [6] EL-SAYED A M, GARLING D L. Carbohydrate-to-lipid ratios in diets for *Tilapia zilli* fingerlings [J]. Aquaculture, 1988, 73(1/2/3/4): 157-163.
- [7] ALI M Z, JAUNCEY K. Optimal dietary carbohydrate to lipid ratio in African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell 1822) [J]. Aquacult Int, 2004, 12(2): 169-180.
- [8] 龚宏伟,蔡春芳,阙林林. 长江胭脂鱼开口饵料的研究 [J]. 水产科学, 2005, 24(11): 7-9.
- [9] ZHANG Guobin, GONG Shiyuan, YUAN Yongchao, et al. Dietary protein requirement for juvenile Chinese sucker, *Myxocyprinus asiaticus* [J]. J Appl Ichthyol, 2009, 25 (6): 715-718.
- [10] YUAN Yongchao, GONG Shiyuan, LUO Zhi, et al. Effects of dietary protein to energy ratios on growth and body composition of juvenile Chinese sucker, *Myxocyprinus asiaticus* [J]. Aquacult Nutr, 2010, 16(2): 205-212.
- [11] YUAN Yongchao, GONG Shiyuan, YANG Huijun, et al. Effects of supplementation of crystalline or coated lysine and/or methionine on growth performance and feed utilization of the Chinese sucker, *Myxocyprinus asiaticus* [J]. Aquaculture, 2011, 316(1/2/3/4): 31-36.
- [12] 王朝明,罗莉,张桂众,等. 饲料脂肪水平对胭脂鱼生长、肠道消化酶活性和脂肪代谢的影响 [J]. 动物营养学报, 2010, 22(10): 969-976.
- [13] ALI M Z, ZAHER M, ALAM M J, et al. Effect of dietary carbohydrate to lipid ratios on growth, feed conversion, protein utilization and body composition in climbing perch, *Anabas testudineus* [J]. Int J Fish Aquacult, 2012, 4(1): 1-6.
- [14] ALI A, AL-ASGAH N A. Effect of feeding different carbohydrate to lipid ratios on the growth performance and body composition of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings [J]. Anim Res, 2001, 50(1): 91-100.
- [15] 张世亮,艾庆辉,徐 玮,等. 饲料中糖/脂肪比例对瓦氏黄颡鱼生长、饲料利用、血糖水平和肝脏糖酵解酶活力的影响 [J]. 水生生物学报, 2012, 36(3): 466-473.
- [16] 谭青松. 异育银鲫和长吻鮠对饲料碳水化合物利用的比较研究 [D]. 北京:中国科学院, 2005.
- [17] 王广宇,刘波,谢俊,等. 鱼类糖代谢几种关键酶的研究进展 [J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(3): 377-383.
- [18] LEE S M, LEE J H. Effect of dietary glucose, dextrin and starch on growth and body composition of juvenile starry flounder *Platichthys stellatus* [J]. Fisheries Sci, 2004, 70 (1): 53-58.
- [19] GIANNINI E G, TESTA R, SAVARINO V. Liver enzyme alteration: A guide for clinicians [J]. Can Med Assoc J, 2005, 172(3): 367-379.

(下转第23页)

- idella)[J]. Fish Shellfish Immunol,2010,28(1):712-718.
- [7] WEI Liangmeng, JIAO Peirong, YUAN Runyu, et al. Goose Toll-like receptor 7 (TLR7), myeloid differentiation factor 88 (MyD88) and antiviral molecules involved in anti-H5N1 highly pathogenic avian influenza virus response [J]. Vet Immunol Immunopathol, 2013, 29(2):99-106.
- [8] JIAO Peirong, WEI Liangmeng. Molecular cloning, characterization, and expression analysis of the Muscovy duck Toll-like receptor 3 (MdTLR3) gene [J]. Poultry Sci, 2012, 91(1):2475-2481.
- [9] WAGNER H. The immuno-biology of the TLR9 subfamily [J]. Trends Immunol, 2004, 25(7):381-386.
- [10] TAKEUCHI O, AKIRA S. Recognition of viruses by innate immunity[J]. Immunol Rev, 2007, 220(1):214.
- [11] LIVAK K J, SCHMITTGEN T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C_T}$ method [J]. Methods, 2001, 25(4):402-408.
- [12] TAKAHASHI K, YONEYAMA M. Nonself RNA-sensing mechanism of RIG-I helicase and activation of antiviral immune responses [J]. Mol Cell, 2008, 29(2):428-440.
- [13] SATH T, KATO H, KUMAGAI Y, et al. LGP2 is a positive regulator of RIG-I- and MDA5-mediated antiviral responses [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107(2):1512-1517.
- [14] LUND J M, ALEXOPOULOU L, SATO A, et al. Recognition of single stranded RNA viruses by Toll-like receptor 7 [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, 101(15):5598-5603.
- [15] KARL W, BOEHME, TERESA COMOTON. Innate sensing of viruses by toll-like receptors [J]. Virol, 2004, 78(15):7867-7873.
- 【责任编辑 柴 焰】

(上接第 7 页)

- [20] 林小植, 罗毅平, 谢小军. 饲料碳水化合物水平对南方鲇幼鱼餐后糖酵解酶活性及血糖浓度的影响 [J]. 水生生物学报, 2006, 30(3):304-311.
- [21] 戈贤平, 刘波, 谢骏, 等. 饲料中不同碳水化合物水平对翘嘴红鲌生长及血液指标和糖代谢酶的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2007, 30(3):88-93.
- [22] FERNANDEZ F, MIQUEL A G, CORDOBA M, et al. Effects of diets with distinct protein-to-carbohydrate ratios on nutrient digestibility, growth performance, body composition and liver intermediary enzyme activities in gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) fingerlings [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2007, 343(1):1-10.
- [23] ENES P, PANSERAT S, KAUSHIK S. Effect of normal and waxy maize starch on growth, food utilization and hepatic glucose metabolism in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles [J]. Comp Biochem Physiol: A: Mol Integr Physiol, 2006, 143(1):89-96.
- [24] PANSERAT S, PLAGNES-JUAN E, KAUSHIK S. Nutritional regulation and tissue specificity of gene expression for proteins involved in hepatic glucose metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. J Exp Biol, 2001, 204(13):2351-2360.
- [25] PANSERAT S, MÉDALE F, BRQUE J, et al. Lack of significant long-term effect of dietary carbohydrates on hepatic glucose-6-phosphatase expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. J Nutr Biochem, 2000, 11(1):22-29.
- [26] PANSERAT S, MÉDALE F, BLIN C, et al. Hepatic glucokinase is induced by dietary carbohydrates in rainbow trout, gilthead sea bream, and common carp [J]. Am J Physiol Reg I, 2000, 278(5):1164-1170.
- [27] ENES P, PANSERAT S, KAUSHIK S, et al. Hepatic glucokinase and glucose-6-phosphatase responses to dietary glucose and starch in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) juveniles reared at two temperatures [J]. Comp Biochem Physiol, 2008, 149(1):80-86.
- [28] PANSERAT S, PLAGNES-JUAN E, KAUSHIK S. Gluconeogenic enzyme gene expression is decreased by dietary carbohydrates in common carp (*Cyprinus carpio*) and gilthead seabream (*Sparus aurata*) [J]. Biochim Biophys Acta, 2002, 1579(1):35-42.
- [29] 俞菊华, 戈贤平, 唐永凯, 等. 碳水化合物、脂肪对翘嘴红鲌 PEPCK 基因表达的影响 [J]. 水产学报, 2007, 31(3):371-376.
- 【责任编辑 柴 焰】