



日粮中碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼生长性能、 体组成及健康状况的影响

钟明智¹, 朱凌威¹, 吉红^{1*}, 武文一^{1,2}, 苟妮娜^{1,3}

(1. 西北农林科技大学动物科技学院, 水产动物营养与饲料研究室, 陕西 杨凌 712100;

2. 河南牧业经济学院动物科技学院, 河南 郑州 450046;

3. 陕西省动物研究所, 陕西 西安 710000)

摘要: 为探究多鳞白甲鱼幼鱼日粮中最佳碳水化合物添加类型, 以葡萄糖、麦芽糖、糊精、玉米淀粉及纤维素 5 种碳水化合物为糖源, 分别配制 5 种日粮, 对多鳞白甲鱼幼鱼进行了为期 56 d 的养殖实验。结果显示, ①生长及饲料利用率方面, 麦芽糖组的终末体重、特定生长率、饵料系数以及蛋白质效率等指标最佳, 纤维素组最差。②体成分方面, 纤维素组全鱼粗脂肪水平最低, 粗灰分水平显著高于麦芽糖组, 麦芽糖组及纤维素组肌糖原含量最低, 糊精组肝糖原含量最低。③主成分分析表明, C16:0、SFA、MUFA 和 PUFA 比例对肝脏脂肪比例产生主要影响, 其中, C16:0 和 SFA 比例在麦芽糖组显著提高, MUFA 比例在糊精组显著提高, 而 PUFA 在纤维素组显著提高; C18:1n-9 和 MUFA 比例对肌肉和脂肪组织总体脂肪酸组成产生主要影响, 二者比例在麦芽糖组显著提高。④血清生化指标方面, 麦芽糖组及纤维素组谷丙转氨酶活性、麦芽糖组谷草转氨酶活性显著较高, 葡萄糖组及纤维素组碱性磷酸酶活性、球蛋白含量较高, 而血糖含量反之。⑤抗氧化能力方面, 麦芽糖组肝脏过氧化氢酶、总超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶活性最高, 纤维素组丙二醛含量最高。研究表明, 麦芽糖是多鳞白甲鱼幼鱼适宜的碳水化合物源, 玉米淀粉及糊精次之, 纤维素及葡萄糖不是多鳞白甲鱼幼鱼适宜的碳水化合物源, 实际生产中推荐玉米淀粉作为碳水化合物源。本研究将为多鳞白甲鱼专用饲料研发提供重要参考。

关键词: 多鳞白甲鱼; 生长; 体组成; 健康; 麦芽糖

中图分类号: S 963.7

文献标志码: A

当前, 基于环境及成本的压力, 植物性原料被大量用于饲料生产中, 因此, 饲料中可消化和不可消化的碳水化合物对鱼类的影响不容忽视。研究表明, 养殖鱼类的饲料成分应包括适当的碳水化合物^[1]。适宜的碳水化合物水平有利于提高鱼类的生长性能^[1-2], 而超过鱼类对糖的耐受水平, 则会不利于鱼类生长^[3-4], 造成血液甘油三酯水平

升高^[5]、免疫损伤^[6-7]等负面影响。鱼类吸收利用碳水化合物的情况与其分子结构密切相关^[8], 一般认为, 鱼类对复杂多糖的利用能力超过小分子糖类^[9-10]。经过特殊加工的多糖, 如淀粉的糊化处理会导致淀粉颗粒水合、膨胀, 其对酶的敏感性会升高, 鱼类对淀粉的消化率也会提高^[11-12]。适宜类型的碳水化合物有利于提高养殖鱼类的生长

收稿日期: 2021-11-18 修回日期: 2022-02-23

资助项目: 秦巴山区多鳞白甲鱼人工繁育关键技术研究专项 (K3380216011)

第一作者: 钟明智 (照片), 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: 1748446304@qq.com;

朱凌威, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: zhulingwei408500@126.com

通信作者: 吉红, 从事水产动物营养与饲料、水产健康养殖研究, E-mail: jihong@nwsuaf.edu.cn



性能, 确保健康, 反之则会造成负面影响。相比于其他糖类, 葡萄糖降低了军曹鱼 (*Rachycentron canadum*) 的生长及饲料利用率^[13]; 且由于葡萄糖在机体能快速被吸收的特点, 会导致日本沼虾 (*Macrobrachium nipponense*) 长期高血糖症并造成氧化应激^[14]。果糖被认为不合适作为史氏鲟 (*Acipenser schrenckii*) 的碳水化合物来源^[10], 不同的碳水化合物源对凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 肠道菌群结构及多样性也存在显著影响^[15]。因此, 在鱼类养殖过程中, 确定饲料中添加适宜的碳水化合物类型非常重要, 目前在大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)^[16-17]、达氏鲟 (*A. dabryanus*)^[18]、鞍带石斑鱼 (*Epinephelus lanceolatus*)^[19]、褐鲟 (*Salmo trutta*)^[4] 等鱼中已有相关报道。

多鳞白甲鱼 (*Onychostoma macrolepis*) 亦名多鳞铲颌鱼, 又有梢白甲、钱鱼、赤鳞鱼、砖鱼等地方名, 为鲤科 (Cyprinidae) 白甲鱼属 (*Onychostoma*)^[20]。在我国陕西、甘肃、山东以及湖北西部等地的山溪河流中均有分布^[21]。经济价值较高, 兼具肉质鲜美、营养丰富的特点, 曾被作为贡鱼, 也是“水中活化石”。我国 2021 年颁布的《国家重点保护野生动物名录》已把该鱼的野生种群列为国家 II 级重点保护动物 (仅限野生种群)。多鳞白甲鱼在国内养殖技术取得一定突破, 并形成一定的养殖规模, 已有繁育^[22-25]、营养价值^[26-27]、生理^[28] 等多方面的研究。在营养饲料学方面, 仅明确了多鳞白甲鱼亲鱼及 1 龄鱼的蛋白质需求^[29] 和幼鱼脂质需求^[30-32], 本团队对其碳水化合物需求的研究表明, 添加水平以 20.7%~26.7% 为宜, 基于特定生长率, 以 25.67% 为最佳^[33]。

本研究通过对多鳞白甲鱼幼鱼分别饲喂含有葡萄糖、麦芽糖、玉米淀粉、糊精及纤维素这 5 种不同碳水化合物类型的精制日粮, 评估其生长性能、生物学性状、常规成分、糖原、脂肪酸、抗氧化指标及血清生化指标等方面的表现, 旨在确定多鳞白甲鱼日粮适宜的碳水化合物类型, 为其专用饲料的开发提供参考资料, 助力产业发展。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验鱼为安康市镇坪县饮源生态资源保护开发有限公司提供的 1 冬龄幼鱼。

在已知的多鳞白甲鱼幼鱼蛋白质^[29]、脂质^[30]

及碳水化合物水平的基础上, 选择葡萄糖、麦芽糖、玉米淀粉、糊精以及纤维素 (睢县甘淳商贸有限公司, 商丘) 5 种类型的碳水化合物, 进行实验日粮设计。以鱼粉 (陕西华秦农牧科技有限公司)、酪蛋白 (武汉伊美特生物科技有限公司, 武汉) 为蛋白源, 将豆油 (益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司)、鱼油 (迅达海洋生物有限责任公司) 及猪油 (康乐市场, 杨凌示范区) 等 3 种油脂按 1:1:1 的比例等重量混合, 作为脂肪源, 配制 5 种等氮等脂精制日粮。所有原料粉碎后过 40 目筛, 按配比称量后并混匀, 用机器进行挤压制粒, 室内风干 (24 h), 根据实验鱼个体大小, 将各组饲料破碎为 2 mm 粒径颗粒, 用塑料袋封装后于冰箱 -20 °C 保存。配方及营养组成见表 1 和表 2。

1.2 实验设计

本研究经过西北农林科技大学实验动物伦理委员会审核, 符合动物保护、动物福利和伦理原则, 符合国家实验动物福利伦理的相关规定。选择规格整齐、健康无病、同一批次的 1 龄幼鱼, 在西北农林科技大学安康水产试验示范站循环水养殖系统的养殖桶 (300 L) 内进行 2 周的驯化暂养, 暂养期间用商业鲟饲料 (粗蛋白 38%, 粗脂肪 7%, 湖北加益加生物科技有限公司) 进行驯食投喂。通过灯光模拟自然光照, 光照时长 12 h (8:00—20:00 开灯)。驯养结束后, 将 150 尾无病无伤, 体重为 (5.45±0.83) g 的多鳞白甲鱼幼鱼随机分为 5 组, 每组 3 个重复, 每个重复 10 尾鱼, 随机分配到 15 个养殖桶内, 进行为期 56 d 的养殖实验。分鱼后禁食 24 h, 之后每日 3 次 (8:30、12:30、16:30) 饲喂, 达到表观饱食状态。饲养期间水温为 (23.53±1.62) °C, 溶解氧为 (7.76±1.36) mg/L, pH 7.44±0.02, 氨氮 <0.10 mg/L, 亚硝酸盐氮 <0.005 mg/L, 硫化物 <0.05 mg/L。

1.3 样品采集

养殖实验结束后, 将实验鱼禁食 24 h, 以 3-氨基苯甲酸乙酯 (MS-222, 100 µg/mL) 麻醉, 所有个体进行体长测量及称重, 每缸随机选用 2 尾全鱼于 -20 °C 保存, 用于常规成分分析; 5 尾进行解剖, 称量内脏重, 分离出肠系膜脂肪组织、肝脏、肾脏、肠道, 并逐一称重, 取鱼体侧线上方两侧肌肉, 所需样品均液氮速冻, 并保存于 -80 °C, 用于糖原含量、脂肪酸组成、抗氧化能力等指标测定; 剩余 3 尾鱼, 进行尾静脉采血,

表 1 实验日粮配方及营养成分

Tab. 1 Dietary formula and nutritional composition

项目 items	碳水化合物类型 carbohydrate types				
	葡萄糖 glucose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 corn starch	糊精 dextrin	纤维素 cellulose
原料/(g/kg) feedstuffs					
鱼粉 fish meal	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00
酪蛋白 casein	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
葡萄糖 glucose	250.00	0.00	0.00	0.00	0.00
麦芽糖 maltose	0.00	250.00	0.00	0.00	0.00
玉米淀粉 corn starch	0.00	0.00	250.00	0.00	0.00
糊精 dextrin	0.00	0.00	0.00	250.00	0.00
纤维素 cellulose	0.00	0.00	0.00	0.00	250.00
豆油 soybean oil	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
鱼油 fish oil	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
猪油 lard	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
羧甲基纤维素钠 sodium carboxymethyl cellulose	105.00	105.00	105.00	105.00	105.00
多维预混料 ¹⁾ vitamin premix	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
多矿预混料 ²⁾ mineral premix	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
2,6-二叔丁基对甲酚 butylated hydroxytoluene	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
总计 total	1 000.00	1 000.00	1 000.00	1 000.00	1 000.00
营养水平/% nutrient levels					
粗蛋白 crude protein	37.26±0.48	37.20±0.42	37.00±0.02	37.31±0.04	37.14±0.15
粗脂肪 crude lipid	9.31±0.09	9.58±0.19	9.45±0.09	9.36±0.30	9.47±0.18
水分 moisture	10.13±0.61	9.59±1.33	9.69±0.83	9.69±0.36	8.80±0.01
粗灰分 crude ash	14.64±0.01	14.33±0.08	14.15±0.03	14.30±0.02	13.96±0.16

注: 1) 多维预混料(mg/kg日粮)为维生素C, 200; 硫胺素10; 核黄素20; 维生素A, 3 000 IU; 维生素D3, 1 500 IU; 维生素E, 50 IU; 甲苯酚, 10; 盐酸吡哆醇, 10; 氰钴胺素, 0.02; 生物素, 1.0; 泛酸钙, 40; 叶酸, 5; 烟酸, 20; 肌醇, 400; 氯化胆碱, 2 000; 以纤维素为载体。2) 多矿预混料(g/0.1 kg总矿物质)为KAl(SO₄), 0.159; CaCO₃, 18.101; Ca(H₂PO₄)₂, 44.601; CoCl₂, 0.070; MgSO₄, 5.216; 硫酸锰, 0.070; KCl, 16.553; KI, 0.014; ZnCO₃, 0.192; NaH₂PO₄, 13.605; Na₂SeO₃, 0.006; CuSO₄·5H₂O, 0.075; 柠檬酸铁, 1.338。
Notes: 1) vitamin premix contained (mg/kg diet), vitamin C, 200; thiamine 10; riboflavin 20; vitamin A, 3 000 IU; vitamin D3, 1 500 IU; vitamin E, 50 IU; menadione, 10; pyridoxine hydrochloride, 10; cyanocobalamin, 0.02; biotin, 1.0; calcium pantothenate, 40; folic acid, 5; niacin, 20; inositol, 400; cholinechloride, 2 000; and fiber as a carrier. 2) the mineral premix contained (g/0.1 kg total mineral), KAl(SO₄), 0.159; CaCO₃, 18.101; Ca(H₂PO₄)₂, 44.601; CoCl₂, 0.070; MgSO₄, 5.216; MnSO₄·H₂O, 0.070; KCl, 16.553; KI, 0.014; ZnCO₃, 0.192; NaH₂PO₄, 13.605; Na₂SeO₃, 0.006; CuSO₄·5H₂O, 0.075; ferric citrate, 1.338.

静置于 4 °C 冰箱 12 h, 4 °C 离心 (4 000 r/min, 10 min), 取上清液于 -80 °C 冰箱保存, 用于血清生化指标测定。整个实验期间无实验鱼死亡。

1.4 生长性能指标计算公式

$$\begin{aligned} \text{增重率 (WGR, \%)} &= (W_t - W_0) / W_0 \times 100\% \\ \text{特定生长率 (SGR, \% / d)} &= [\ln W_t - \ln W_0] / t \times 100\% \\ \text{肥满度 (CF, g/cm}^3\text{)} &= W_t / L^3 \times 100 \\ \text{肝体比 (HSI, \%)} &= W_h / W_t \times 100\% \\ \text{肠体比 (ISI, \%)} &= W_i / W_t \times 100\% \\ \text{肾指数 (KI, \%)} &= W_k / W_t \times 100\% \\ \text{腹腔脂肪指数 (IFI, \%)} &= W_f / W_t \times 100\% \\ \text{脏体比 (VSI, \%)} &= W_v / W_t \times 100\% \\ \text{饲料系数 (FCR)} &= F / (W_t - W_0) \end{aligned}$$

$$\text{蛋白质效率 (PER, \%)} = (W_t - W_0) / (F \times P_f) \times 100\%$$

$$\text{存活率 (SR, \%)} = N_t / N_0 \times 100\%$$

式中, W_t 为终末体重 (g), W_0 为初始体重 (g), W_h 为肝胰脏重量 (g), W_i 为肠道重量 (g), W_k 为肾脏重量 (g), W_f 为腹腔脂肪重量 (g), W_v 为内脏重量 (g), t 为饲养天数 (d), L 为体长 (cm), F 为摄食量 (g), P_f 为饲料蛋白含量 (%), N_t 为终末尾数, N_0 为初始尾数。

1.5 常规成分及糖原测定

全鱼及实验日粮的常规成分测定参考美国分析化学家协会 (AOAC)^[34] 的方法, 水分通过烘箱在 105 °C 烘干恒重法测定。粗蛋白通过凯氏定氮法测定。粗脂肪采用索氏抽提法测定。粗灰分在

表 2 实验日粮脂肪酸组成
Tab. 2 Dietary fatty acid composition %

项目 items	碳水化合物类型 carbohydrate types				
	葡萄糖 glucose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 corn starch	糊精 dextrin	纤维素 cellulose
C14:0	2.05	1.67	2.73	2.61	2.01
C16:0	16.11	15.31	22.08	21.94	15.41
C18:0	6.5	6.45	10.11	8.66	6.72
C22:0	0.57	0.60	0.73	0.68	0.85
C24:0	6.63	9.41	7.49	8.59	6.79
∑SFA	31.86	33.44	43.14	42.48	31.78
C16:1n-7	2.85	3.33	4.11	3.52	2.69
C18:1n-9c	23.86	23.73	7.63	9.47	26.08
∑MUFA	26.71	27.06	11.74	12.99	28.77
C18:2n-6c	21.2	22.30	24.14	24.39	21.28
C18:3n-6	2.77	1.89	2.81	2.99	3.21
C20:3n-6	0.59	0.55	0.78	0.58	0.67
C20:4n-6	1.78	0.76	0.94	1.67	1.87
∑n-6 PUFA	26.34	25.5	28.67	29.63	27.03
C18:3n-3	1.74	0.81	1.32	2.01	2.30
C20:3n-3	0.21	0.12	0.14	0.11	0.12
C20:5n-3	0.43	0.3	0.33	0.23	0.25
C22:6n-3	4.33	5.11	6.55	6.70	4.99
∑n-3 PUFA	6.71	6.34	8.34	9.05	7.66
∑PUFA	33.05	31.84	37.01	38.68	34.69
n-3/n-6	0.25	0.25	0.29	0.31	0.28

注: SFA. 饱和脂肪酸, MUFA. 单不饱和脂肪酸, PUFA. 多不饱和脂肪酸, 下同。

Notes: SFA. saturated fatty acid, MUFA. monounsaturated fatty acid, PUFA. polyunsaturated fatty acids, the same below.

马弗炉 550 °C 灼烧至恒重后测定。肝糖原及肌糖原通过南京建成生物工程研究所的肝/肌糖原测定试剂盒, 按照说明书通过比色法进行测定。

1.6 脂肪酸组成测定

在离心管中分别称取 0.3~0.5 g 饲料、肌肉、肝胰脏、腹部脂肪, 加入甲醇: 氯仿 (1:2, 体积比) 5 mL, 通过高速分散器 (XHF-D, SCIENIZ[®], 宁波) 充分磨碎, 静置约 2 h 后, 用定性滤纸分离得到溶液, 添加 4 mL 蒸馏水, 3 000 r/min 离心 5 min, 获取下层液体, 在 40 °C 水浴条件下除去水分及残余的甲醇、氯仿。向离心管中加入 1 mL 色谱纯正己烷, 待底部的油脂溶解后, 加入 1 mL 0.4 mol/L KOH-甲醇溶液, 在摇床上振荡 30 min 进行甲酯化。甲酯化后, 向管中加入 2 mL 去离子水摇匀, 3 000 r/min 离心 5 min, 小心吸取上清液, -20 °C 条件下保存。在气相色谱仪 (安捷伦 7820a, 美国) 上进行测定。得到的脂肪酸峰面积比通过面积归一化法确定对应的百分比含量^[35]。组织与日粮脂肪酸相关系数参照徐歆歆^[36] 的相关研究: 利

用 CORREL 函数计算皮尔森相关系数^[37]; $R = \log_2(PT/PD)$, 其中 R 值代表组织脂肪酸与日粮脂肪酸相关性的高低, PT 为某一脂肪酸在组织中的比例, PD 为同种脂肪酸在日粮中对应的比例。

1.7 血清生化指标测定

血清生化指标涉及到的谷丙转氨酶 (ALT)、谷草转氨酶 (AST)、碱性磷酸酶 (ALP)、总蛋白 (TP)、白蛋白 (ALB)、球蛋白 (GLB)、白球比 (A/G)、葡萄糖 (GLU)、总胆固醇 (TC)、甘油三酯 (TG)、高密度脂蛋白胆固醇 (HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-C), 均在杨凌示范区医院通过全自动生化分析仪 (岛津 I Lab600, 日本) 测定。

1.8 抗氧化指标测定

肝胰脏组织的谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px)、过氧化氢酶 (CAT)、总超氧化物歧化酶 (T-SOD) 活性以及丙二醛 (MDA) 含量, 通过南京建成生物工程研究所生产的试剂盒 (货号分别为 A005-1-2、A007-1-1、A001-3-2、A003-1-2) 测定。

1.9 数据分析

实验数据通过使用 SPSS 26.0 软件 (SPSS Inc., 美国) 进行单因素方差 (ANOVA) 分析。各处理间显著差异时, 使用 Duncan 氏多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。数据以平均值 \pm 标准差 (mean \pm SD) 表示。

2 结果

2.1 日粮中碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼生长、生物学性状及日粮利用的影响

经过 56 d 的养殖, 麦芽糖组终末体重显著高于其余 4 组 ($P < 0.05$), 其余 4 组间则无显著差异 ($P > 0.05$); 麦芽糖组增重率最高, 显著高于葡萄糖及纤维素组 ($P < 0.05$); 麦芽糖及糊精组肥满度最

大, 显著高于葡萄糖、玉米淀粉及纤维素组 ($P < 0.05$), 后 3 组之间差异不显著 ($P > 0.05$); 麦芽糖组特定生长率最大, 显著高于纤维素组 ($P < 0.05$)。在生物学性状方面, 肝体比从大到小依次为麦芽糖、糊精、葡萄糖、玉米淀粉、纤维素, 其中仅糊精和葡萄糖组间没有显著差异 ($P > 0.05$); 脏体比在各组间无显著差异 ($P > 0.05$); 肠体比、肾指数均在纤维素组显著最高, 其余组间差异不显著 ($P > 0.05$)。在饲料利用方面, 各组间的摄食量无显著差异 ($P > 0.05$), 而麦芽糖组饵料系数显著低于纤维素组 ($P < 0.05$), 其余各组间无显著差异 ($P > 0.05$)。麦芽糖组蛋白质效率最高, 显著高于葡萄糖和纤维素组 ($P < 0.05$), 且葡萄糖组显著高于纤维素组 ($P < 0.05$) (表 3)。

表 3 日粮碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼生长、生物学性状及日粮利用的影响

Tab. 3 Effects of dietary carbohydrate types on growth, biological characters and feed efficiency of juvenile *O. macrolepis*

项目 items	碳水化合物类型 carbohydrate types				
	葡萄糖 glucose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 corn starch	糊精 dextrin	纤维素 cellulose
初始体重/g IBW	5.44 \pm 0.03	5.46 \pm 0.05	5.44 \pm 0.04	5.42 \pm 0.02	5.48 \pm 0.06
终末体重/g FBW	12.40 \pm 0.56 ^b	13.82 \pm 0.37 ^a	12.52 \pm 1.03 ^b	12.48 \pm 0.15 ^b	11.49 \pm 0.86 ^b
增重率/% WGR	128.02 \pm 10.36 ^b	153.10 \pm 6.81 ^a	130.14 \pm 18.91 ^{ab}	130.31 \pm 2.70 ^{ab}	109.71 \pm 15.62 ^b
特定生长率/(%/d) SGR	1.52 \pm 0.10 ^{ab}	1.67 \pm 0.01 ^a	1.46 \pm 0.14 ^{ab}	1.49 \pm 0.08 ^{ab}	1.30 \pm 0.20 ^b
肥满度/(g/cm ³) CF	1.53 \pm 0.02 ^b	1.59 \pm 0.02 ^a	1.52 \pm 0.02 ^b	1.60 \pm 0.02 ^a	1.50 \pm 0.02 ^b
肝体比/% HSI	1.58 \pm 0.14 ^b	2.00 \pm 0.04 ^a	1.33 \pm 0.08 ^c	1.66 \pm 0.01 ^b	1.05 \pm 0.04 ^d
肠体比/% ISI	4.30 \pm 0.41 ^b	4.00 \pm 0.02 ^b	4.14 \pm 0.53 ^b	4.02 \pm 0.35 ^b	5.07 \pm 0.20 ^a
肾指数/% KI	0.43 \pm 0.02 ^b	0.41 \pm 0.02 ^b	0.41 \pm 0.01 ^b	0.41 \pm 0.04 ^b	0.48 \pm 0.02 ^a
腹腔脂肪指数/% IFI	2.14 \pm 0.13 ^b	2.53 \pm 0.04 ^a	2.37 \pm 0.10 ^a	2.37 \pm 0.19 ^a	1.86 \pm 0.04 ^c
脏体比/% VSI	15.99 \pm 0.76	15.80 \pm 0.24	15.28 \pm 0.71	15.33 \pm 0.27	15.40 \pm 0.52
投喂量/g FI	144.33 \pm 3.78	142.55 \pm 3.02	140.82 \pm 2.52	137.88 \pm 4.95	143.48 \pm 1.69
饲料系数 FCR	2.03 \pm 0.18 ^b	1.70 \pm 0.05 ^b	1.90 \pm 0.17 ^b	1.82 \pm 0.07 ^b	2.42 \pm 0.34 ^a
蛋白质效率/% PER	1.33 \pm 0.11 ^b	1.58 \pm 0.04 ^a	1.43 \pm 0.14 ^{ab}	1.47 \pm 0.06 ^{ab}	1.13 \pm 0.15 ^c
存活率/% SR	100	100	100	100	100

注: 同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Notes: There are significant differences ($P < 0.05$) when the lowercase letters in the same line are different, the same below.

2.2 日粮中碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼常规成分及糖原含量的影响

糊精组全鱼脂肪水平显著高于纤维素组 ($P < 0.05$), 而麦芽糖、葡萄糖及玉米淀粉这 3 组与糊精或纤维素组间差异并不显著 ($P > 0.05$)。麦芽糖组粗灰分含量最低, 纤维素组最高, 各组间仅麦芽糖组和纤维素组间存在显著差异 ($P < 0.05$)。组间全鱼粗蛋白和水分含量无显著差异 ($P > 0.05$) (表 4)。

肝糖原含量高低依次为玉米淀粉>葡萄糖>麦芽糖>纤维素>糊精, 玉米淀粉组肝糖原含量显著高于其余 4 组 ($P < 0.05$), 葡萄糖组肝糖原含量显著高于麦芽糖组和纤维素组 ($P < 0.05$), 而麦芽糖与纤维素组并无显著差异 ($P > 0.05$)。肌糖原含量从高到低依次为玉米淀粉>葡萄糖>糊精>麦芽糖>纤维素, 玉米淀粉组肌糖原含量显著高于其余 4 组 ($P < 0.05$), 葡萄糖、糊精和麦芽糖组间肌糖原含量无统计学差异 ($P > 0.05$)。

表 4 日粮碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼全鱼常规成分及糖原含量的影响
 Tab. 4 Effects of dietary carbohydrate types on chemical composition (whole fish) and glycogen content of juvenile *O. macrolepis*

项目 items	碳水化合物类型 carbohydrate types				
	葡萄糖 glucose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 corn starch	糊精 dextrin	纤维素 cellulose
粗蛋白/% crude protein	16.86±0.60	17.09±0.19	16.66±0.42	16.71±0.67	16.68±0.78
粗脂肪/% crude lipid	9.68±0.68 ^{ab}	10.15±0.60 ^{ab}	9.64±0.93 ^{ab}	10.73±0.61 ^a	8.74±1.10 ^b
水分/% moisture	69.16±1.16	68.10±2.82	68.18±0.58	67.93±0.84	69.26±0.94
粗灰分/% crude ash	5.09±0.54 ^{ab}	4.86±0.45 ^b	5.06±0.36 ^{ab}	5.31±0.29 ^{ab}	5.75±0.32 ^a
肌糖原/(mg/g) muscle glycogen	0.54±0.02 ^b	0.44±0.09 ^{bc}	0.89±0.04 ^a	0.51±0.10 ^b	0.35±0.06 ^c
肝糖原/(mg/g) hepatic glycogen	7.80±0.30 ^b	6.27±0.68 ^c	11.34±0.23 ^a	4.86±0.41 ^d	6.05±0.49 ^c

2.3 日粮中碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼脂肪酸组成的影响

碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼的肝胰脏、肌肉和脂肪组织的脂肪酸组成均有影响(表5~表7)。从图1中评分图可知,不同糖源作用下实验鱼的肝胰脏、肌肉和脂肪组织中脂肪酸比例表现出了

一定的差异性。表8中,采用主成分分析法对肝胰脏、肌肉和脂肪组织分析发现,前3个主因子累计贡献率均超过了90%,表明可以使用上述3个主因子(PC1、PC2和PC3)较好地代表18项脂肪酸种类指标。结合图1中肝胰脏、肌肉和脂肪组织脂肪酸组成载荷图进行分析发现,肝胰脏C16:0、SFA、MUFA和PUFA比例对总体脂肪酸

表 5 日粮碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼肝胰脏脂肪酸组成的影响

Tab. 5 Effects of dietary carbohydrate types on fatty acid composition in hepatopancreas of juvenile *O. macrolepis* %

项目 items	碳水化合物类型 carbohydrate types				
	葡萄糖 glucose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 corn starch	糊精 dextrin	纤维素 cellulose
C14:0	1.87±0.22 ^{ab}	2.49±0.57 ^a	1.56±0.33 ^b	1.93±0.60 ^{ab}	2.08±0.14 ^{ab}
C16:0	18.37±1.72 ^b	25.03±4.33 ^a	14.99±1.80 ^b	19.53±4.14 ^b	17.51±0.15 ^b
C18:0	0.52±0.06 ^c	0.37±0.06 ^c	0.90±0.10 ^b	0.51±0.10 ^c	1.22±0.09 ^a
C22:0	0.56±0.13 ^{ab}	0.23±0.08 ^c	0.75±0.03 ^{ab}	0.81±0.31 ^a	0.46±0.16 ^{bc}
C24:0	1.95±0.97 ^{bc}	1.21±0.10 ^c	2.42±0.64 ^b	1.71±0.55 ^{bc}	6.64±0.27 ^a
ΣSFA	23.26±0.98 ^{ab}	29.34±4.73 ^a	20.61±2.60 ^b	24.49±4.53 ^{ab}	27.90±0.20 ^a
C16:1n-7	6.79±0.83 ^b	8.44±0.45 ^a	4.45±0.70 ^c	6.22±0.77 ^b	3.42±0.76 ^c
C18:1n-9	49.36±1.60 ^a	48.10±2.10 ^a	44.47±6.74 ^a	50.85±1.24 ^a	25.46±4.04 ^b
ΣMUFA	56.14±2.39 ^{ab}	56.53±1.84 ^a	48.92±6.79 ^b	57.08±0.94 ^a	28.87±4.80 ^c
C18:2n-6	9.04±1.79 ^{abc}	5.81±1.36 ^c	11.08±0.50 ^{ab}	7.86±1.62 ^{bc}	12.45±3.98 ^a
C18:3n-6	1.20±0.22 ^c	0.86±0.19 ^c	1.66±0.20 ^b	1.01±0.20 ^c	2.51±0.34 ^a
C20:3n-6	1.35±0.45 ^b	0.85±0.24 ^b	2.38±0.83 ^b	1.24±0.17 ^b	4.82±1.95 ^a
C20:4n-6	0.34±0.17	0.39±0.15	0.33±0.29	0.38±0.25	0.35±0.14
Σn-6 PUFA	11.93±2.27 ^c	7.92±1.49 ^d	15.46±0.91 ^b	10.49±1.91 ^{cd}	20.13±2.43 ^a
C18:3n-3	3.91±0.21 ^a	2.48±0.97 ^{ab}	3.03±1.24 ^{ab}	1.52±0.46 ^b	1.97±0.84 ^b
C20:3n-3	0.99±0.36 ^b	0.77±0.20 ^b	1.51±0.38 ^b	1.25±0.19 ^b	3.91±2.59 ^a
C20:5n-3	0.21±0.01 ^{ab}	0.16±0.06 ^b	0.21±0.03 ^{ab}	0.18±0.04 ^b	0.27±0.07 ^a
C22:6n-3	3.55±1.05 ^c	2.80±1.23 ^c	10.26±3.13 ^b	5.00±1.60 ^c	16.94±4.80 ^a
Σn-3 PUFA	8.67±1.18 ^{bc}	6.21±2.29 ^c	15.02±3.82 ^b	7.95±1.91 ^{bc}	23.09±6.79 ^a
ΣPUFA	20.59±3.36 ^c	14.13±3.74 ^c	30.47±4.71 ^b	18.44±3.77 ^c	43.22±4.61 ^a
n-3/n-6 ΣPUFA	0.73±0.07	0.76±0.18	0.96±0.19	0.75±0.07	1.19±0.51
合计 total	100	100	100	100	100

表 6 日粮碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼肌肉脂肪酸组成的影响

项目 items	碳水化合物类型 carbohydrate types					%
	葡萄糖 glucose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 corn starch	糊精 dextrin	纤维素 cellulose	
C14:0	1.85±0.28	1.55±0.27	1.58±0.22	1.53±0.25	1.83±0.67	
C16:0	18.03±2.57	17.73±0.54	17.69±1.46	17.65±2.42	16.17±0.96	
C18:0	6.34±0.62	6.47±0.58	8.19±0.13	6.99±1.51	8.43±1.81	
C22:0	0.27±0.12	0.31±0.15	0.26±0.03	0.20±0.03	0.29±0.12	
C24:0	7.07±1.33 ^{ab}	6.41±0.21 ^b	7.97±0.74 ^{ab}	7.35±1.31 ^{ab}	8.76±0.25 ^a	
ΣSFA	33.55±1.48	32.47±0.69	35.68±1.10	33.73±1.30	35.47±2.97	
C16:1n-7	3.70±0.88 ^a	3.37±0.29 ^a	2.64±0.66 ^{ab}	3.36±1.44 ^a	1.68±0.61 ^b	
C18:1n-9	23.47±3.60 ^{ab}	27.06±1.40 ^a	19.31±2.94 ^b	25.62±3.37 ^{ab}	21.13±4.32 ^{ab}	
ΣMUFA	27.17±2.74 ^{abc}	30.44±1.68 ^a	21.95±2.37 ^c	28.98±4.81 ^{ab}	22.81±3.73 ^{bc}	
C18:2n-6	12.36±2.08	11.00±0.78	11.21±2.09	10.01±1.00	10.46±2.35	
C18:3n-6	2.34±0.31 ^a	1.87±0.11 ^{ab}	2.44±0.29 ^a	1.40±0.58 ^b	2.08±0.46 ^{ab}	
C20:3n-6	4.01±0.33 ^{ab}	3.30±0.26 ^{ab}	4.04±1.05 ^{ab}	3.15±0.93 ^b	5.59±2.29 ^a	
C20:4n-6	1.23±0.84 ^a	0.37±0.38 ^{ab}	0.34±0.23 ^b	0.49±0.35 ^{ab}	0.21±0.04 ^b	
Σn-6 PUFA	19.93±2.01 ^a	16.54±1.14 ^{bc}	18.03±1.27 ^{ab}	15.04±1.23 ^c	18.35±0.68 ^{ab}	
C18:3n-3	3.08±0.10	2.82±0.10	2.39±0.79	2.87±1.70	2.65±0.43	
C20:3n-3	2.48±1.11 ^b	3.38±0.59 ^{ab}	4.15±0.62 ^a	3.51±1.08 ^{ab}	3.97±0.52 ^{ab}	
C20:5n-3	0.19±0.07	0.20±0.07	0.25±0.11	0.22±0.10	0.21±0.03	
C22:6n-3	13.60±1.35	14.15±1.68	17.37±0.47	15.39±3.58	16.55±1.90	
Σn-3 PUFA	19.35±0.75	20.55±2.19	24.17±0.6	21.98±5.61	23.38±2.17	
ΣPUFA	39.28±1.28 ^{ab}	37.10±1.15 ^b	42.20±1.01 ^a	37.03±4.76 ^b	41.72±1.52 ^a	
n-3/n-6 ΣPUFA	0.98±0.13 ^b	1.25±0.21 ^{ab}	1.35±0.12 ^{ab}	1.48±0.45 ^a	1.28±0.17 ^{ab}	
合计 total	100	100	100	100	100	

比例产生主要影响(主成分载荷特征值>0.5),其中麦芽糖组显著提高了C16:0和SFA的比例($P<0.05$),糊精组显著提高了MUFA的比例($P<0.05$),纤维素组显著提高了PUFA的比例($P<0.05$)。肌肉中C18:1n-9和MUFA的比例对总体脂肪酸组成产生主要影响,其中麦芽糖组显著提高了C18:1n-9和MUFA的比例($P<0.05$)。脂肪组织中C18:1n-9和MUFA比例对总体脂肪酸组成产生主要影响,其中麦芽糖组显著提高了C18:1n-9和MUFA的比例($P<0.05$)。

图2为3种组织与日粮脂肪酸的关系,若饲料脂肪酸完全沉积在组织中,没有经过任何脂肪酸代谢(从头合成、分解等),折线会与X轴重合。 $R>0$,该脂肪酸在组织中优先沉积; $R<0$,该脂肪酸在组织中被特异性代谢。不同处理组在相同组织中变化趋势相近。在肝胰腺中C22:0、糊精和玉米淀粉组R值高于其他组;纤维素组在C18:1n-9、

ΣMUFA中,R值低于其他组,而在PUFA中,R值高于其他组。肌肉中C16:1n-7和C20:5n-3,纤维素组R值低于其他组。脂肪组织中C22:0,糊精组R值高于其他组;C18:3n-6,麦芽糖组R值低于其他组;C20:5n-3,葡萄糖组R值低于其他组。

脂肪组织与日粮脂肪酸组成间的相关性显著高于肝胰腺和肌肉($P<0.05$) (表9)。肝胰腺和脂肪中,纤维素处理组与日粮脂肪酸组成的相关性高于其他糖源处理组,且均显著高于麦芽糖、糊精处理组($P<0.05$);肌肉中,葡萄糖处理组与日粮脂肪酸组成的相关性高于其他糖源处理组,且显著高于纤维素处理组($P<0.05$)。同时在肝胰腺、肌肉、脂肪3个组织总计中,麦芽糖和糊精处理组与日粮脂肪酸组成的相关性显著低于其他处理组($P<0.05$)。以上表明,肝胰腺、肌肉、脂肪组织和日粮脂肪酸组成具有显著的相关性。

表 7 日粮碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼腹腔脂肪组织中脂肪酸组成的影响

Tab. 7 Effects of dietary carbohydrate types on fatty acid composition in adipose tissue of juvenile *O. macrolepis* %

项目 items	碳水化合物类型 carbohydrate types				
	葡萄糖 glucose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 corn starch	糊精 dextrin	纤维素 cellulose
C14:0	3.14±0.56	3.29±0.46	3.43±0.58	3.35±0.19	2.90±0.60
C16:0	23.50±1.40	23.41±0.61	20.44±1.10	22.84±4.00	22.84±3.80
C18:0	0.67±0.04	0.59±0.05	0.61±0.11	0.73±0.13	0.7±0.21
C22:0	0.15±0.03 ^b	0.15±0.07 ^b	0.26±0.03 ^{ab}	0.39±0.11 ^a	0.29±0.09 ^{ab}
C24:0	4.15±0.31	3.21±0.61	3.44±0.82	4.33±0.39	4.57±1.10
∑SFA	31.61±2.26	30.65±0.95	28.18±0.69	31.63±3.66	31.30±4.57
C16:1n-7	6.29±0.58	6.64±0.11	6.40±0.15	7.35±0.83	7.37±1.34
C18:1n-9	32.42±1.60 ^{ab}	36.30±1.58 ^a	34.94±1.86 ^a	32.07±5.87 ^{ab}	27.13±4.81 ^b
∑MUFA	38.71±1.02 ^{ab}	42.94±1.47 ^a	41.34±1.99 ^a	39.42±5.04 ^{ab}	34.50±3.48 ^b
C18:2n-6	16.85±0.28 ^{ab}	13.27±2.96 ^c	17.76±0.75 ^a	14.48±1.00 ^{bc}	18.20±0.99 ^a
C18:3n-6	2.04±0.04	3.80±3.01	2.32±0.21	3.19±2.13	2.50±0.52
C20:3n-6	0.60±0.21	0.42±0.11	0.52±0.16	0.47±0.10	0.48±0.25
C20:4n-6	0.53±0.11	0.54±0.27	0.74±0.41	0.69±0.10	0.75±0.05
∑n-6 PUFA	20.02±0.48 ^{bc}	18.03±0.34 ^d	21.33±1.29 ^{ab}	18.84±1.17 ^{bc}	21.93±0.73 ^a
C18:3n-3	2.72±0.18 ^b	2.45±0.39 ^b	2.63±0.11 ^b	2.51±0.13 ^b	3.16±0.25 ^a
C20:3n-3	0.67±0.13 ^{ab}	0.49±0.14 ^b	0.71±0.06 ^{ab}	0.94±0.25 ^a	0.59±0.15 ^b
C20:5n-3	0.23±0.04 ^b	0.25±0.09 ^b	0.35±0.01 ^{ab}	0.43±0.13 ^a	0.33±0.08 ^{ab}
C22:6n-3	6.04±0.56 ^b	5.19±0.61 ^b	5.46±0.92 ^b	6.23±0.85 ^b	8.19±1.17 ^a
∑n-3 PUFA	9.67±0.89 ^{bc}	8.37±0.47 ^c	9.15±1.01 ^{bc}	10.11±0.46 ^b	12.28±1.19 ^a
∑PUFA	29.68±1.37 ^b	26.41±0.52 ^c	30.48±2.21 ^b	28.95±1.43 ^{bc}	34.20±1.40 ^a
n-3/n-6 ∑PUFA	0.48±0.03 ^{bc}	0.47±0.03 ^{bc}	0.43±0.03 ^c	0.54±0.03 ^{ab}	0.56±0.06 ^a
合计 total	100	100	100	100	100

2.4 日粮中碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼血清生化指标的影响

麦芽糖及纤维素组谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性都较高。葡萄糖组总蛋白含量及白蛋白含量显著高于其他各组 ($P<0.05$)。葡萄糖及纤维素组碱性磷酸酶活性最高。葡萄糖、玉米淀粉及纤维素组球蛋白含量最高。玉米淀粉、糊精和麦芽糖组血糖含量显著高于其他各组 ($P<0.05$), 但麦芽糖组与各组间差异不显著 ($P>0.05$)。葡萄糖、麦芽糖和糊精组总胆固醇及高密度胆固醇含量显著高于其余 2 组, 玉米淀粉组显著高于纤维素组 ($P<0.05$)。葡萄糖组低密度胆固醇显著高于各组, 纤维素组最低 ($P<0.05$)。糊精组甘油三酯显著高于各组, 玉米淀粉及纤维素组最低 ($P<0.05$)。各

组间仅白球比无显著差异 ($P>0.05$) (表 10)。

2.5 日粮中碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼抗氧化指标的影响

肝胰脏抗氧化酶活性方面, 麦芽糖组 GSH-Px 活性最高, 显著高于纤维素组 ($P<0.05$), 而糊精、葡萄糖及玉米淀粉组与麦芽糖和纤维素组间不存在显著差异 ($P>0.05$)。CAT 在麦芽糖组最高, 显著高于葡萄糖及纤维素组 ($P<0.05$), 玉米淀粉组与各组间均不存在显著差异 ($P>0.05$)。T-SOD 在麦芽糖组最高, 显著高于各组 ($P<0.05$), 而葡萄糖、玉米淀粉、糊精组间差异不显著 ($P>0.05$), 但均显著高于纤维素组 ($P<0.05$)。纤维素组 MDA 含量显著高于各组 ($P<0.05$), 其余各组间并无显著差异 ($P>0.05$) (图 3)。

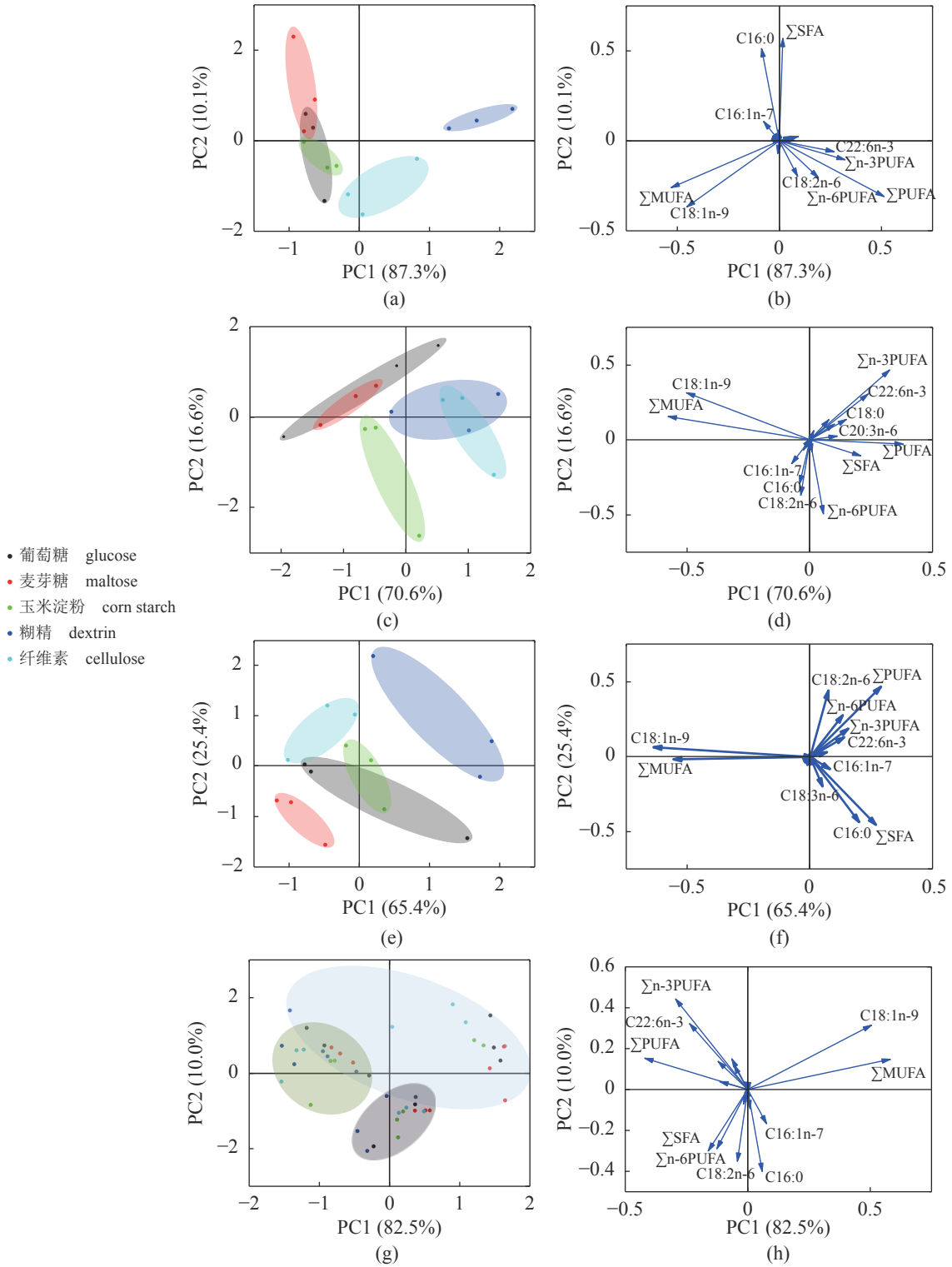


图 1 日粮中碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼各组织脂肪酸主成分的评分图(左)及载荷图(右)

(a) (b) 肝胰脏, (c) (d) 肌肉, (e) (f) 脂肪组织, (g) (h) 肝胰脏、肌肉和脂肪组; 左侧图中, 椭圆对应 95% 的置信区间, 分别对应不同组织; 右侧图中, 向量表示导致方差的变量, 箭头指示脂肪酸如何促进 PC1 和 PC2 的形成, 从而形成左图。

Fig. 1 Score (left) and load diagram (right) for effect of dietary carbohydrate types on tissues of juvenile *O. macrolepis*

(a) (b) hepatopancreas, (c) (d) muscle, (e) (f) adipose tissues, (g) (h) hepatopancreas, muscle and adipose tissues; in the left pictures, ellipses correspond to a confidence interval of 95%, they correspond to different tissues; in the right pictures, vectors represent variables that contributed to the variance, the arrows indicate how the fatty acids contributed to the formation of PC1 and PC2 and thus the formation of the left pictures.

表 8 协方差矩阵法下的显著主成分载荷特征值分析

Tab. 8 Eigen analysis of the covariance matrix loadings for significant principal components

项目 items	肝胰脏 hepatopancreas			肌肉 muscle			脂肪组织 adipose tissue		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2	Factor 3
C14:0	-0.003	0.060	-0.028	-0.001	-0.059	0.008	-0.011	-0.054	0.063
C16:0	-0.087	0.512	0.003	-0.043	-0.293	0.462	0.200	-0.435	0.275
C18:0	0.014	-0.005	-0.015	0.148	0.136	0.112	0.009	-0.002	-0.010
C22:0	0.000	-0.022	0.028	0.003	0.005	-0.010	0.002	0.006	-0.004
C24:0	0.093	0.024	-0.100	0.099	0.104	-0.143	0.069	0.032	-0.107
Σ SFA	0.017	0.569	-0.112	0.207	-0.107	0.429	0.269	-0.453	0.219
C16:1n-7	-0.077	0.107	-0.023	-0.075	-0.159	0.199	0.082	-0.081	-0.021
C18:1n-9	-0.453	-0.367	0.131	-0.504	0.314	-0.223	-0.640	0.065	0.008
Σ MUFA	-0.529	-0.260	0.107	-0.579	0.155	-0.025	-0.558	-0.016	-0.013
C18:2n-6	0.089	-0.197	-0.558	-0.038	-0.369	-0.285	0.075	0.445	0.622
C18:3n-6	0.028	-0.008	-0.051	0.008	-0.081	-0.113	0.051	-0.197	-0.563
C20:3n-6	0.073	0.003	0.126	0.111	0.025	0.053	-0.006	0.017	0.017
C20:4n-6	0.001	-0.002	0.005	-0.027	-0.068	-0.011	0.014	0.015	-0.060
Σ n-6PUFA	0.191	-0.204	-0.478	0.055	-0.493	-0.356	0.134	0.280	0.016
C18:3n-3	-0.008	-0.070	-0.053	0.008	0.020	-0.198	0.024	0.041	0.054
C20:3n-3	0.060	0.026	0.201	0.077	0.133	0.019	-0.007	0.013	-0.015
C20:5n-3	0.002	-0.001	0.003	0.003	0.007	0.006	0.000	0.004	-0.023
C22:6n-3	0.268	-0.060	0.332	0.237	0.305	0.082	0.139	0.132	-0.238
Σ n-3PUFA	0.322	-0.105	0.482	0.325	0.465	-0.091	0.156	0.190	-0.222
Σ PUFA	0.512	-0.309	0.004	0.380	-0.028	-0.447	0.290	0.469	-0.205
n-3/n-6 Σ PUFA	0.010	0.000	0.053	0.015	0.061	0.021	0.004	0.003	-0.011
特征值 eigenvalues	467.54	54.27	10.66	57.47	13.49	4.73	48.49	65.44	65.44
贡献率/% contribution rate	87.27	10.13	1.99	70.62	16.58	5.82	18.80	25.37	90.80
累计贡献率/% cumulative contribution rate	87.27	97.40	99.39	70.62	87.20	93.01	3.99	5.38	96.19

注: 共选择18个脂肪酸变量进行分析; Factor 1、Factor 2和Factor 3分别指主成分1、2和3; 表中的值表示负荷, 指示主成分中变量关系的程度和方向; 有效载荷值(> 0.5)用粗体数字表示。数值的正负分别表示正相关和负相关。

Notes: a total of 18 fatty acid variables were selected for the analyses; Factor 1, Factor 2, and Factor 3 refer to principal components 1, 2 and 3, respectively; the values in the table stand for loadings, indicating degree and direction of the relationship of the variables within a principal component; significant loading values (>0.5) are indicated in bold numbers; the positive and negative values represent positive and negative correlations, respectively.

3 讨论

由于结构存在差异, 不同类型碳水化合物被鱼类消化吸收的过程有所不同, 葡萄糖可被机体直接吸收, 麦芽糖需要被分解成单糖才能被吸收, 淀粉多糖含有直链淀粉及支链淀粉, 更需要被分解为小分子才能吸收^[38], 一般认为, 直链淀粉较难被利用^[39]。糊化加工后的淀粉利用率通常会提高^[11]。纤维素是通过 β (1-4)糖苷键将D-葡萄糖连接在一起形成的, 由于大多数鱼类消化道中缺乏纤维素酶, 故不能对其进行消化, 而肠道内微生物对纤维素的消化作用有限, 所以纤维素很难作为鱼类能量供应的来源^[40]。此外, 制粒条件、肠

道微生物平衡等都会影响碳水化合物的利用^[41]。本研究中, 各实验组摄食量无差异, 麦芽糖组饲料系数最低, 蛋白质效率最高, 说明麦芽糖可较好地被实验鱼利用; 而纤维素组生长情况最差, 可能与其利用效率不高有关, 这与对团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)^[42]、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)^[43]的研究结果一致。本研究中, 麦芽糖组生长表现最佳, 这与白鲟(*A. transmontanus*)及中华鲟(*A. sinensis*)在麦芽糖的日粮喂养下生长最佳的结果一致^[44-45], 但与白鲟和中华鲟不同, 摄食麦芽糖组日粮的多鳞白甲鱼并未表现出高血糖的症状。就生长性能而言, 麦芽糖>(葡萄糖、玉米淀粉、糊精)>纤维素, 且葡萄糖、玉米淀粉、糊

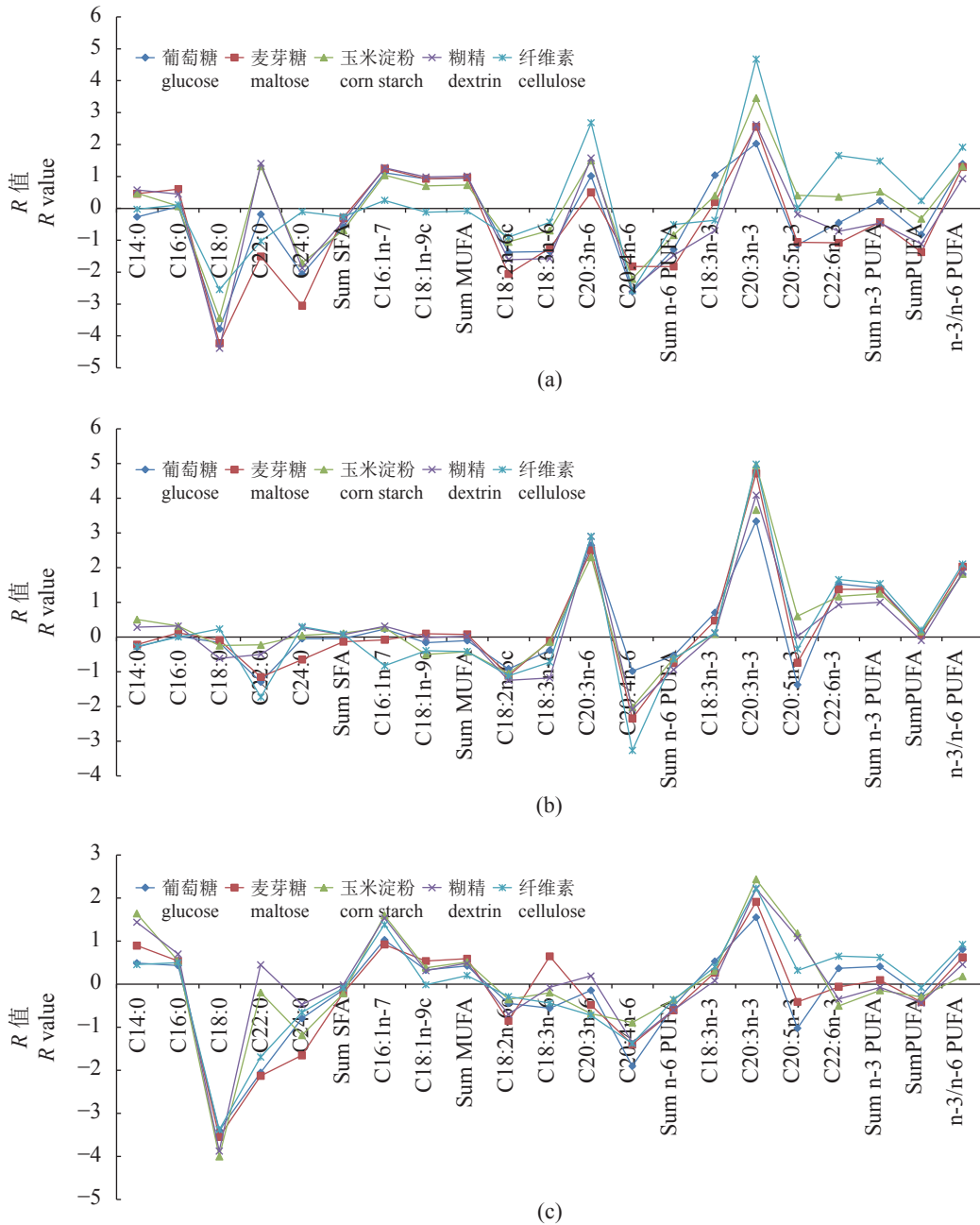


图 2 多鳞白甲鱼幼鱼组织脂肪酸组成的 R 值分析

(a) 肝胰脏, (b) 肌肉, (c) 脂肪组织; Sum 表示"Σ" (求和)。

Fig. 2 R values analysis of the fatty acid profile in tissues of juvenile *O. macrolepis*

(a) hepatopancreas, (b) muscle, (c) adipose tissues; Sum means "Σ" (summation).

精三者差异不显著 ($P>0.05$)。

全鱼粗脂肪含量糊精组最高, 纤维素组最低, 这与腹腔脂肪指数的情况相一致。全鱼粗灰分会受碳水化合物种类影响, 主要反映在麦芽糖组(粗灰分含量最低)及纤维素组(粗灰分含量最高), 全鱼粗灰分麦芽糖组显著低于纤维素组 ($P>0.05$), 而这与二者在生长性能上的表现恰好相反, 相同变化趋势在青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)^[46]、鲫

(*Carassius auratus*)^[46]、达氏鲮^[18] 等研究中有相关报道。不同鱼类日粮的适宜碳水化合物种类不同, 达氏鲮^[18]、鞍带石斑鱼^[19] 的适宜碳水化合物为玉米淀粉; 团头鲂^[42] 的适宜碳水化合物为糊精; 大口黑鲈适宜的碳水化合物为豌豆淀粉, 且豌豆淀粉组的肝糖原显著低于 α -木薯淀粉组^[17], 本研究中肝糖原在玉米淀粉组积累最多, 这可能与实验鱼的种类不同有关。如前所述, 纤维素很难作为

表 9 肝胰脏、肌肉、脂肪组织与日粮脂肪酸组成的 Pearson 相关系数

Tab. 9 Pearson correlation coefficient of the fatty acid in hepatopancreas, muscle, adipose tissue and diet

处理 treatment	碳水化合物类型 carbohydrate types					总计 total
	葡萄糖 glucose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 corn starch	糊精 dextrin	纤维素 cellulose	
肝胰脏 hepatopancreas	0.75±0.03 ^{bcB}	0.7±0.02 ^{cB}	0.82±0.05 ^{abB}	0.69±0.02 ^{cB}	0.88±0.09 ^a	0.77±0.09 ^c
肌肉 muscle	0.92±0.01 ^{aA}	0.9±0.02 ^{abA}	0.88±0.01 ^{abA}	0.89±0.03 ^{abA}	0.87±0.05 ^b	0.89±0.03 ^B
脂肪组织 adipose tissues	0.94±0.01 ^{abA}	0.88±0.01 ^{cA}	0.92±0.02 ^{ba}	0.89±0.01 ^{cA}	0.96±0.01 ^a	0.92±0.03 ^A
总计 total	0.87±0.09 ^a	0.83±0.11 ^b	0.88±0.05 ^a	0.82±0.11 ^b	0.90±0.07 ^a	
组织 tissues	<i>P</i> <0.001					
日粮 dietary	<i>P</i> <0.001					
组织×日粮 tissues×dietary	<i>P</i> <0.001					

注: 同列中不同大写字母表示差异显著, *P*<0.05。

Notes: different capital letters in the same column indicate significant differences, *P*<0.05.

表 10 日粮碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼血清生化指标的影响

Tab. 10 Effects of dietary carbohydrate types on serum biochemical indexes of juvenile *O. macrolepis*

项目 items	碳水化合物类型 carbohydrate types				
	葡萄糖 glucose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 corn starch	糊精 dextrin	纤维素 cellulose
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	99.00±6.00 ^b	118.00±4.00 ^a	90.00±4.58 ^c	104.33±5.51 ^b	118.33±3.06 ^a
谷草转氨酶/(U/L) AST	233±10.15 ^b	249.67±7.09 ^a	234.67±5.51 ^b	231.33±8.02 ^b	240±4.58 ^{ab}
碱性磷酸酶/(U/L) ALP	156.67±11.55 ^a	130±0.00 ^b	123.33±5.77 ^b	126.67±5.77 ^b	140±26.46 ^{ab}
总蛋白/(g/L) TP	55.33±3.06 ^a	47.67±2.31 ^b	50.67±1.53 ^b	49.33±1.15 ^b	49.67±0.58 ^b
白蛋白/(g/L) ALB	21.67±1.53 ^a	18.67±0.58 ^b	19.33±0.58 ^b	18.67±0.58 ^b	18.67±0.58 ^b
球蛋白/(g/L) GLB	33.67±2.08 ^a	29.00±1.73 ^b	31.33±1.15 ^{ab}	30.67±0.58 ^b	31.00±1.00 ^{ab}
白球比 A/G	0.65±0.05	0.64±0.02	0.62±0.02	0.61±0.01	0.6±0.04
葡萄糖/(mmol/L) GLU	6.43±0.35 ^b	6.03±0.25 ^{ab}	7.47±0.21 ^a	7.17±0.15 ^a	5.80±0.10 ^b
总胆固醇/(mmol/L) TC	8.37±0.42 ^a	8.10±0.26 ^a	6.90±0.20 ^b	7.97±0.25 ^a	5.77±0.15 ^c
甘油三酯/(mmol/L) TG	6.77±0.25 ^b	6.77±0.25 ^b	5.33±0.21 ^c	7.37±0.15 ^a	5.07±0.15 ^c
高密度胆固醇/(mmol/L) HDL-C	3.97±0.25 ^a	3.9±0.10 ^a	3.2±0.17 ^b	3.77±0.15 ^a	2.67±0.06 ^c
低密度胆固醇/(mmol/L) LDL-C	2.93±0.15 ^a	2.6±0.10 ^b	2.37±0.06 ^c	2.7±0.10 ^b	1.87±0.12 ^d

鱼类能量的供应来源,这也解释了纤维素组糖原含量不高的原因。

人工养殖鱼类的组织脂肪酸组成通常会反映其摄食情况^[47-48],本研究中,肝胰脏、肌肉和腹腔脂肪这3种组织和日粮脂肪酸的组成具有明显的相关性,表明鱼类对不同类型碳水化合物的日粮吸收利用的差异会对组织脂肪酸组成造成影响。相较于肌肉以及肝胰脏,脂肪组织的脂肪酸组成更易受碳水化合物影响。就种类而言,葡萄糖主要影响肌肉的脂肪酸组成,而纤维素对肝胰脏及腹腔脂肪酸的影响较为明显。麦芽糖有利于提升组织中的 MUFA 含量,而纤维素则会促进组织中 PUFA 的比例提升。本研究的情况或许与不同碳水化合物日粮合成脂肪有较大关系,由于纤维素

组提供的碳水化合物不能为机体较好地利用,脂肪合成较少;全鱼粗脂肪含量在麦芽糖组仅次于糊精组,腹腔脂肪指数在麦芽糖组最大,说明麦芽糖组提供的碳水化合物相较于纤维素更利于鱼体利用,造成机体合成的 MUFA 增加,进而促进了脂肪的合成。这与高碳水化合物摄入促进 MUFA 的生物合成,而非 PUFA 或长期摄入高碳水化合物饮食可以增强鱼体内 PUFA 的 β-氧化^[49],进而导致团头鲂的肝胰脏和肌肉中 MUFA 水平显著升高,PUFA 水平降低现象是一致的^[50]。有研究发现,匙吻鲟 (*Polyodon spathula*) 在饥饿时,更容易消耗 SFA 及 MUFA 而非 EPA 和 DHA^[51]。此外也有研究表明,鱼类饮食中碳水化合物的缺乏会增加蛋白质和脂类的分解代谢^[1,52],由于纤维素

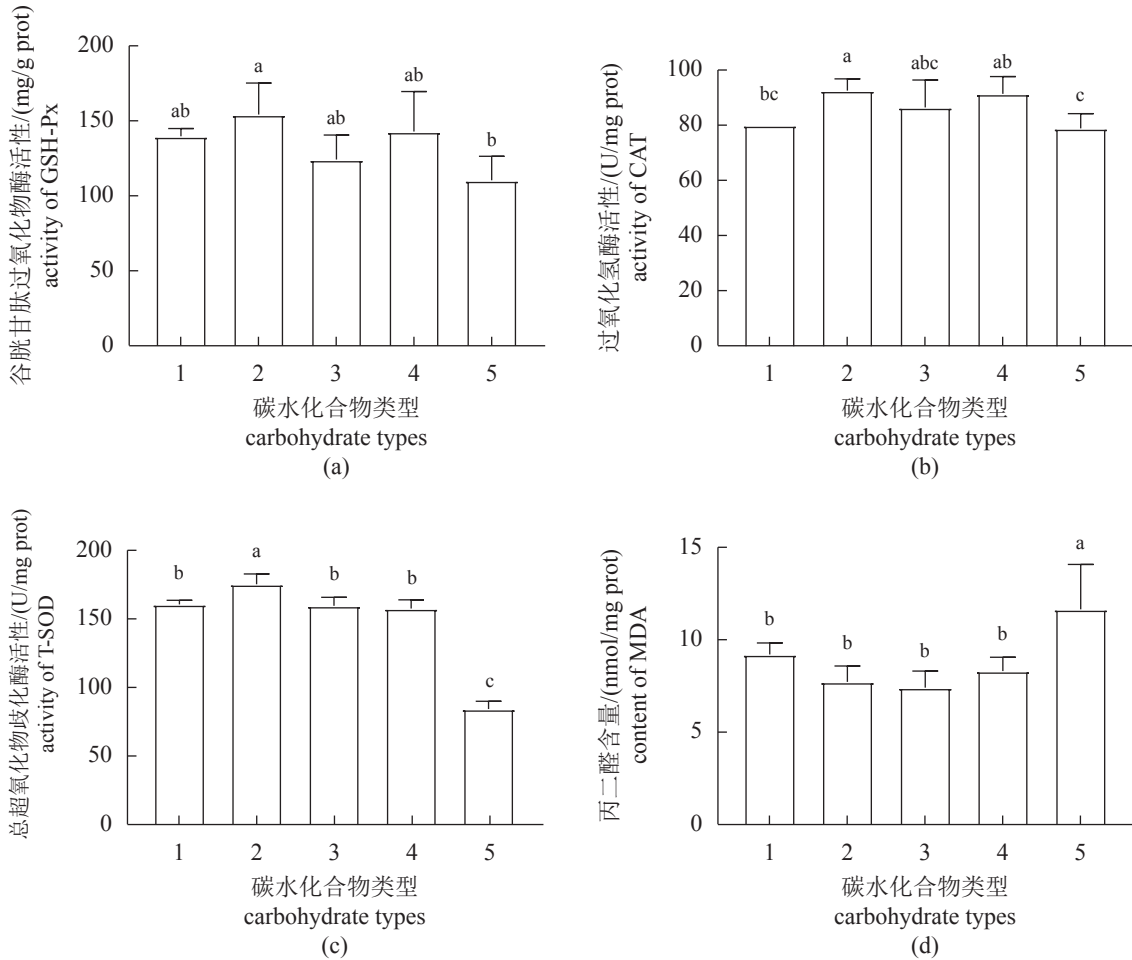


图3 日粮碳水化合物类型对多鳞白甲鱼幼鱼肝胰脏抗氧化指标的影响

1. 葡萄糖, 2. 麦芽糖, 3. 玉米淀粉, 4. 糊精, 5. 纤维素; 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 3 Effects of dietary carbohydrate types on hepatopancreas antioxidant indices of juvenile *O. macrolepis*

1. glucose, 2. maltose, 3. corn starch, 4. dextrin, 5. cellulose; values with different letters are significantly different ($P < 0.05$).

组碳水化合物不易被利用, 所以在该组可能存在 SFA 和 MUFA 消耗较多, 而 PUFA 相对比例升高的情况。Henderson 等^[53] 研究指出, 淡水鱼类 n-3/n-6 PUFA 比值范围应为 0.5~3.8。Sánchez-Machado 等^[54] 报道了世界卫生组织建议食品中 n-3/n-6 PUFA > 0.1, 本研究中肌肉脂肪酸组成在葡萄糖组的 n-3/n-6 PUFA 比值最低, 显著低于糊精组 ($P < 0.05$), 但糊精组与其余三组间差异不显著 ($P > 0.05$), 表明葡萄糖不利于肌肉营养价值的提高。

血清生化指标与鱼体生理代谢相关, 能够反映鱼体的健康状况^[55]。当肝胰脏出现损伤时, 谷丙转氨酶、谷草转氨酶等主要存在于肝胰脏中的成分会进入血液^[56], 本研究中, 谷丙转氨酶活性、谷草转氨酶活性在麦芽糖组显著高于葡萄糖、玉米淀粉及糊精组, 表明麦芽糖可能会一定程度引起该鱼的肝胰脏损伤, 但还有待结合肝胰脏组织

学等结果进一步研究判断。玉米淀粉及糊精组血糖含量较高, 可能与其被消化较慢有关, 葡萄糖和麦芽糖组的血糖含量低于玉米淀粉和糊精组, 而纤维素组血糖含量较低, 可能与纤维素未被分解吸收有关。有研究发现, 塞内加尔鲷 (*Solea senegalensis*)^[57] 能够快速清除血糖, 认为它具有较强的碳水化合物利用能力, 而本研究结果表明, 多鳞白甲鱼能够较好地利用麦芽糖。脂肪的合成速率增加会导致血液中总胆固醇和甘油三酯含量升高^[58], 本研究中甘油三酯含量与全鱼粗脂肪的变化趋势基本一致。碱性磷酸酶作为鱼类溶酶体酶的重要组成部分, 在免疫机制中发挥作用^[59], 球蛋白与脂类或脂溶性物质的运输以及机体免疫反应有关^[60], 碱性磷酸酶在葡萄糖和纤维素组中均最高, 球蛋白在葡萄糖组中最高, 提示葡萄糖和纤维素可能会引起免疫反应, 不利于多鳞白甲

鱼健康。

抗氧化系统在机体避免氧化损伤发生, 维持机体内环境稳态调节中发挥重要作用。主要的抗氧化酶包括不消耗辅因子的超氧化物歧化酶和过氧化氢酶, 以及动物体内的硒依赖型谷胱甘肽过氧化物酶或植物体内的抗坏血酸过氧化物酶 (APx) 等^[61]。谷胱甘肽过氧化物酶可有效抑制脂质过氧化, 总超氧化物歧化酶及过氧化氢酶是机体抑制活性氧类 (ROS) 的抗氧化酶, 而丙二醛含量是反映细胞膜受到破坏的重要标志^[62]。本研究中原肝胰脏谷胱甘肽过氧化物酶、总超氧化物歧化酶、过氧化氢酶在麦芽糖、玉米淀粉及糊精组内的活性相对较高, 反映了三者都能够较好地维持机体的抗氧化状态, 且麦芽糖组最佳。丙二醛含量的增加是脂质过度氧化的重要标志^[63], 其在纤维素组最高, 推测该组可能存在脂质的过度氧化, 同时细胞膜受到破坏, 以至于在生长上也表现较差。

综合日粮中不同碳水化合物类型对多鳞白甲鱼生长、体成分、健康状况、抗氧化能力等方面的影响, 认为在本实验条件下, 麦芽糖作为多鳞白甲鱼幼鱼的日粮碳水化合物源的整体效果较好, 玉米淀粉及糊精次之, 纤维素和葡萄糖不是多鳞白甲鱼日粮适宜的碳水化合物源。基于获取饲料原料难易程度考虑, 实际生产过程中推荐使用玉米淀粉作为多鳞白甲鱼日粮的碳水化合物源。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Wilson R P. Utilization of dietary carbohydrate by fish[J]. *Aquaculture*, 1994, 124(1-4): 67-80.
- [2] 赵柳兰, 唐小鸿, 廖磊, 等. 不同碳水化合物水平对大口黑鲈鳃组织结构、抗氧化能力和免疫能力的影响[J]. *水产学报*, 2022, 46(11): 2158-2167.
- Zhao L L, Tang X H, Liao L, *et al.* Effects of different carbohydrate levels on gill tissue structure, antioxidant capacity and immunity of *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(11): 2158-2167 (in Chinese).
- [3] Ma H J, Mou M M, Pu D C, *et al.* Effect of dietary starch level on growth, metabolism enzyme and oxidative status of juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. *Aquaculture*, 2019, 498: 482-487.
- [4] 党江雨, 高攀为, 徐祺, 等. 亚东鲑幼鱼饲料中适宜淀粉种类与水平的研究[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(1): 69-78.
- Dang J Y, Gao B W, Xu Z, *et al.* The suitable starch types and levels in the diet of brown trout (*Salmo trutta*) juveniles[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(1): 69-78 (in Chinese).
- [5] 吴凡, 文华, 蒋明, 等. 饲料碳水化合物水平对吉富罗非鱼幼鱼生长性能和血液主要生化指标的影响[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40(12): 8-14.
- Wu F, Wen H, Jiang M, *et al.* Effects of different dietary carbohydrate levels on growth performance and blood biochemical parameters of juvenile GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(12): 8-14 (in Chinese).
- [6] Vielma J, Koskela J, Ruohonen K, *et al.* Optimal diet composition for European whitefish (*Coregonus lavaretus*): carbohydrate stress and immune parameter responses[J]. *Aquaculture*, 2003, 225(1-4): 3-16.
- [7] 刘浩, 杨俊江, 董晓慧, 等. 饲料碳水化合物水平对斜带石斑鱼生长性能、体成分、血浆生化指标及肠道和肝脏酶活性的影响[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(1): 357-371.
- Liu H, Yang J J, Dong X H, *et al.* Effects of dietary carbohydrate level on growth performance, body composition, plasma biochemical parameters and intestinal and liver enzyme activities of orange-spotted grouper (*Epinephelus coioides*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(1): 357-371 (in Chinese).
- [8] 魏晗, 缪云龙. 鱼类糖类营养研究进展[J]. *农村经济与科技*, 2018, 29(9): 82-84.
- Wei H, Miao Y L. Research progress of fish carbohydrate nutrition[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2018, 29(9): 82-84 (in Chinese).
- [9] 袁野, 王猛强, 马红娜, 等. 饲料中三种不同碳水化合物对大黄鱼生长性能和肝脏糖代谢关键酶活性的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(2): 267-281.
- Yuan Y, Wang M Q, Ma H N, *et al.* Effects of three different carbohydrate sources on growth performance and hepatic glucose metabolism key enzyme activities in large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(2): 267-281 (in Chinese).
- [10] Jiang M, Liu W, Wen H, *et al.* Effect of dietary carbohydrate sources on the growth performance, feed utilization

- tion, muscle composition, postprandial glycemic and glycogen response of Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii* Brandt, 1869[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, 30(6): 1613-1619.
- [11] Kamalam B S, Medale F, Panserat S. Utilisation of dietary carbohydrates in farmed fishes: new insights on influencing factors, biological limitations and future strategies[J]. *Aquaculture*, 2017, 467: 3-27.
- [12] Hofer R, Sturmbauer C. Inhibition of trout and carp α -amylase by wheat[J]. *Aquaculture*, 1985, 48(3-4): 277-283.
- [13] Cui X J, Zhou Q C, Liang H O, *et al.* Effects of dietary carbohydrate sources on the growth performance and hepatic carbohydrate metabolic enzyme activities of juvenile Cobia (*Rachycentron canadum* Linnaeus.) [J]. *Aquaculture Research*, 2010, 42(1): 99-107.
- [14] Kong Y Q, Ding Z L, Zhang Y X, *et al.* Types of carbohydrate in feed affect the growth performance, antioxidant capacity, immunity, and activity of digestive and carbohydrate metabolism enzymes in juvenile *Macrobrachium nipponense* [J]. *Aquaculture*, 2019, 512: 734282.
- [15] 荆冰妍, 杨超, 郭冉, 等. 四种糖作为碳源对凡纳滨对虾生长、肠道消化酶及肠道菌群的影响[J]. *水产学报*, 2021, 45(6): 920-928.
- Jing B Y, Yang C, Guo R, *et al.* Effects of four sugars as carbon sources on intestinal digestive enzymes and intestinal flora of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(6): 920-928 (in Chinese).
- [16] 刘子科, 陈乃松, 王孟乐, 等. 大口黑鲈饲料中适宜的淀粉源及添加水平[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(2): 317-331.
- Liu Z K, Chen N S, Wang M L, *et al.* Suitable dietary starch source and supplementation level for largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(2): 317-331 (in Chinese).
- [17] Li S L, Sang C Y, Wang A, *et al.* Effects of dietary carbohydrate sources on growth performance, glycogen accumulation, insulin signaling pathway and hepatic glucose metabolism in largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. *Aquaculture*, 2019, 513: 734391.
- [18] 褚志鹏, 危起伟, 杜浩, 等. 不同糖源对达氏鲟幼鱼生长、体成分及生理生化指标的影响[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(2): 284-294.
- Chu Z P, Wei Q W, Du H, *et al.* Effects of different carbohydrate sources on growth performance, body composition, and physiological and biochemical parameters of juvenile Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(2): 284-294 (in Chinese).
- [19] Lu S D, Wu X Y, Gao Y J, *et al.* Effects of dietary carbohydrate sources on growth, digestive enzyme activity, gene expression of hepatic GLUTs and key enzymes involved in glycolysis-gluconeogenesis of giant grouper *Epinephelus lanceolatus* larvae [J]. *Aquaculture*, 2018, 484: 343-350.
- [20] 乐佩琦. 中国动物志-下卷-硬骨鱼纲, 鲤形目 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- Le P Q. Fauna Sinica-Osteichthyes, Cypriniformes (II) [M]. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese).
- [21] 张春光. 多鳞铲颌鱼的生态适应性及地理分布成因的探讨[J]. *动物学报*, 1986, 32(3): 266-272.
- Zhang C G. On the ecological adaptation and geographical distribution of the barbine fish *Varicorhinus (Scaphesthes) macrolepis* (Bleeker) [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 1986, 32(3): 266-272 (in Chinese).
- [22] 张金平, 冯德品, 杨军, 等. 神农架多鳞铲颌鱼繁殖生物学研究[J]. *水产科学*, 2015(8): 523-526.
- Zhang J P, Feng D P, Yang J, *et al.* Reproductive biology of *Varicorhinus macrolepis* in Shennongjia [J]. *Fisheries Science*, 2015(8): 523-526 (in Chinese).
- [23] 陈红菊, 姜运良, 宋憬愚, 等. 泰山赤鳞鱼胚胎发育的研究[J]. *水生生物学报*, 2008, 32(6): 926-933.
- Chen H J, Jiang Y L, Song J Y, *et al.* Study on the embryonic development of *Scaphesthes macrolepis* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32(6): 926-933 (in Chinese).
- [24] 董武子, 王涛, 马力, 等. 秦巴山区多鳞白甲鱼人工繁殖试验[J]. *畜牧兽医杂志*, 2016, 35(3): 27-30, 35.
- Dong W Z, Wang T, Ma L, *et al.* Artificial reproduction of *Varicorhinus macrolepis* in Qin-Ba Mountains [J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2016, 35(3): 27-30, 35 (in Chinese).
- [25] 林贞贤, 杨广成. 不同开口饵料对泰山螭霖鱼仔鱼摄食力、存活和生长的影响[J]. *泰山学院学报*, 2015, 37(3): 84-88.
- Lin Z X, Yang G C. Effects of initial feeds on food intake, survival rates and growth of *Scaphesthes macrolepis* larvae [J]. *Journal of Taishan University*, 2015, 37(3): 84-88 (in Chinese).

- [26] 李正伟, 郑曙明. 多鳞铲颌鱼肌肉氨基酸含量测定及营养分析[J]. 饲料工业, 2014, 35(20): 65-68.
Li Z W, Zheng S M. Determination and nutrient analysis of amino acids in the muscle of *Onychostoma macrolepis*[J]. *Feed Industry*, 2014, 35(20): 65-68 (in Chinese).
- [27] 陈苏维, 陈胤元, 屈国胜. 秦巴山区野生多鳞白甲鱼的营养成分分析与评价[J]. 生物资源, 2019, 41(2): 112-118.
Chen S W, Chen Y Y, Qu G S. Analysis and evaluation of nutritional composition of *Onychostoma macrolepis* in Qinling-Bashan Mountain area[J]. *Biotic Resources*, 2019, 41(2): 112-118 (in Chinese).
- [28] Yu H B, Deng W, Zhang D D, *et al.* Antioxidant defenses of *Onychostoma Macrolepis* in response to thermal stress: insight from mRNA expression and activity of superoxide dismutase and catalase[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 66: 50-61.
- [29] 刘勇. 多鳞白甲鱼后备亲鱼和一龄鱼种蛋白质需求研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Liu Y. Requirements of feed protein *Onychostoma macrolepis* yearling and reserve broodstock[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017 (in Chinese).
- [30] Gou N N, Chang Z G, Deng W, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth, fatty acid composition, antioxidant status and lipid metabolism in juvenile *Onychostoma macrolepis*[J]. *Aquaculture Research*, 2019, 50(11): 3369-3381.
- [31] Gou N N, Ji H, Chang Z G, *et al.* Effects of dietary essential fatty acid requirements on growth performance, fatty acid composition, biochemical parameters, antioxidant response and lipid related genes expression in juvenile *Onychostoma macrolepis*[J]. *Aquaculture*, 2020, 528: 735590.
- [32] Gou N N, Ji H, Zhong M Z, *et al.* Effects of dietary fish oil replacements with three vegetable oils on growth, fatty acid composition, antioxidant capacity, serum parameters and expression of lipid metabolism related genes in juvenile *Onychostoma macrolepis*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, 27(1): 163-175.
- [33] 钟明智. 多鳞白甲鱼幼鱼对日粮碳水化合物水平及类型需求的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Zhong M Z. Study on dietary carbohydrate level and type requirement of juvenile *Onychostoma macrolepis* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021 (in Chinese).
- [34] AOAC. Official methods of analysis of AOAC international[M]. 16th ed. Arlington: AOAC International, 1995.
- [35] Tian J J, Lei C X, Ji H. Influence of dietary linoleic acid (18: 2n-6) and α -linolenic acid (18: 3n-3) ratio on fatty acid composition of different tissues in freshwater fish songpu mirror carp, *Cyprinus carpio*[J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47(12): 3811-3825.
- [36] 徐歆歆. 黑水虻油的制备及其在框鲤幼鱼日粮中的应用研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Xu X X. Study on the application of black soldier fly (*Hermetia illucens*) oli in the diet of juvenile mirror carp (*Cyprinus carpio* Var. *Specularis*) [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017 (in Chinese).
- [37] Tian J J, Lu R H, Ji H, *et al.* Comparative analysis of the hepatopancreas transcriptome of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fed with lard oil and fish oil diets[J]. *Gene*, 2015, 565(2): 192-200.
- [38] do Carmo Gominho-Rosa M, Rodrigues A P O, Mattioni B, *et al.* Comparison between the omnivorous jundiá catfish (*Rhamdia quelen*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) on the utilization of dietary starch sources: digestibility, enzyme activity and starch microstructure[J]. *Aquaculture*, 2015, 435: 92-99.
- [39] Tester R F, Karkalas J, Qi X. Starch—composition, fine structure and architecture[J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 39(2): 151-165.
- [40] Jobling M. National Research Council (NRC): nutrient requirements of fish and shrimp[M]. Washington, D. C.: the National Academies Press, 2012: 601-602.
- [41] Haidar M N, Petie M, Heinsbroek L T N, *et al.* The effect of type of carbohydrate (starch vs. nonstarch polysaccharides) on nutrients digestibility, energy retention and maintenance requirements in Nile tilapia[J]. *Aquaculture*, 2016, 463: 241-247.
- [42] Ren M C, Habte-Tsion H M, Xie J, *et al.* Effects of dietary carbohydrate source on growth performance, diet digestibility and liver glucose enzyme activity in blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*[J]. *Aquaculture*, 2015, 438: 75-81.
- [43] Lee S M, Kim K D, Lall S P. Utilization of glucose, maltose, dextrin and cellulose by juvenile flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. *Aquaculture*, 2003, 221(1-4): 427-438.

- [44] Hung S S O, Fynn-Aikins F K, Lutes P B, *et al.* Ability of juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) to utilize different carbohydrate sources[J]. *The Journal of Nutrition*, 1989, 119(5): 727-733.
- [45] 周俊. 糖种类和水平对中华鲟幼鱼生长影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
Zhou J. Effect of carbohydrate on the growth performance of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006 (in Chinese).
- [46] 蔡春芳, 王永玲, 陈立桥, 等. 饲料糖种类和水平对青鱼、鲫生长和体成分的影响[J]. *中国水产科学*, 2006, 13(3): 452-459.
Cai C F, Wang Y L, Chen L Q, *et al.* Effects of level and source of dietary carbohydrate on growth and body composition of *Mylopharyngodon piceus* and *Carassius auratus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2006, 13(3): 452-459 (in Chinese).
- [47] Sun S, Ye J, Chen J, *et al.* Effect of dietary fish oil replacement by rapeseed oil on the growth, fatty acid composition and serum non-specific immunity response of fingerling black carp, *Mylopharyngodon piceus*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, 17(4): 441-450.
- [48] Twibell R G, Gannam A L, Barron J M, *et al.* Effects of dietary lipid and light source on steatitis in steelhead, *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Aquaculture*, 2017, 479: 370-377.
- [49] Castro C, Corraze G, Basto A, *et al.* Dietary lipid and carbohydrate interactions: implications on lipid and glucose absorption, transport in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) juveniles[J]. *Lipids*, 2016, 51(6): 743-755.
- [50] Wang B K, Liu W B, Xu C, *et al.* Dietary carbohydrate levels and lipid sources modulate the growth performance, fatty acid profiles and intermediary metabolism of blunt snout bream *Megalobrama amblycephala* in an interactive pattern[J]. *Aquaculture*, 2017, 481: 140-153.
- [51] 聂文强. 匙吻鲟生长规律及饥饿对其体脂肪酸组成、体型影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Nie W Q. The growth rule of *Polydon spathula* and study on effects of starvation on fatty acid changes and its size[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016 (in Chinese).
- [52] Kim J D, Kaushik S J. Contribution of digestible energy from carbohydrates and estimation of protein/energy requirements for growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquaculture*, 1992, 106(2): 161-169.
- [53] Henderson R J, Tocher D R. The lipid composition and biochemistry of freshwater fish[J]. *Progress in Lipid Research*, 1987, 26(4): 281-347.
- [54] Sánchez-Machado D I, López-Cervantes J, López-Hernández J, *et al.* Fatty acids, total lipid, protein and ash contents of processed edible seaweeds[J]. *Food Chemistry*, 2004, 85(3): 439-444.
- [55] Wu C L, Chen L, Lu Z B, *et al.* The effects of dietary leucine on the growth performances, body composition, metabolic abilities and innate immune responses in black carp *Mylopharyngodon piceus*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 67: 419-428.
- [56] Racicot J G, Gaudet M, Leray C. Blood and liver enzymes in rainbow trout (*Salmo gairdneri* Rich.) with emphasis on their diagnostic use: study of CCl₄ toxicity and a case of *Aeromonas* infection[J]. *Journal of Fish Biology*, 1975, 7(6): 825-835.
- [57] Conde-Sieira M, Soengas J L, Valente L M P. Potential capacity of senegalese sole (*Solea senegalensis*) to use carbohydrates: metabolic responses to hypo- and hyperglycaemia[J]. *Aquaculture*, 2015, 438: 59-67.
- [58] 刘襄河, 叶超霞, 郑丽勉, 等. 饲料糊精水平对暗纹东方鲀幼鱼生长、消化酶活性和血液生化指标的影响[J]. *水产学报*, 2013, 37(9): 1359-1368.
Liu X H, Ye C X, Zheng L M, *et al.* Effect of dietary dextrin levels on growth, activities of digestive enzyme and blood biochemical indices of juvenile obscure puffer (*Takifugu obscurus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(9): 1359-1368 (in Chinese).
- [59] 孙虎山, 李光友. 栉孔扇贝血淋巴中ACP和AKP活性及其电镜细胞化学研究[J]. *中国水产科学*, 1999, 6(4): 6-9.
Sun H S, Li G Y. The activities and their electron microscopic cytochemistry study of AKP and ACP in haemolymph of *Chlamys farreri*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1999, 6(4): 6-9 (in Chinese).
- [60] 尾崎九雄. 鱼类血液与循环生理[M]. 许学龙, 熊国强, 缪圣赐, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
Wei Q J X. Blood and Circulation Physiology of Fish[M]. Xu X L, Xiong G Q, Miu S C, *et al.*, trans. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1982 (in Chinese).
- [61] Chaudière J, Ferrari-Iliou R. Intracellular antioxidants: from chemical to biochemical mechanisms[J]. *Food and*

- Chemical Toxicology*, 1999, 37(9-10): 949-962.
- [62] Pês T S, Saccol E M H, Ourique G M, *et al.* Quercetin in the diet of silver catfish: effects on antioxidant status, blood parameters and pituitary hormone expression[J]. *Aquaculture*, 2016, 458: 100-106.
- [63] Koruk M, Taysi S, Savas M C, *et al.* Oxidative stress and enzymatic antioxidant status in patients with nonalcoholic steatohepatitis[J]. *Annals of Clinical & Laboratory Science*, 2004, 34(1): 57-62.

Effects of dietary carbohydrate types on growth performance, body composition and health status of juvenile *Onychostoma macrolepis*

ZHONG Mingzhi¹, ZHU Lingwei¹, JI Hong^{1*}, WU Wenyi^{1,2}, GOU Nina^{1,3}

(1. Laboratory of Aquaculture Animal Nutrition and Feed, College of Animal Science and Technology,

Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. College of Animal Science and Technology, Henan University of Animal Husbandry and Economics, Zhengzhou 450046, China;

3. Shaanxi Animal Research Institute, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to explore the optimal carbohydrate addition types in the dietary of juvenile *Onychostoma macrolepis*, five diets were prepared with glucose, maltose, dextrin, corn starch and cellulose as carbohydrate sources and the fish was cultured for 56 days. The results showed that, ① The terminal weight, specific growth rate, feed coefficient rate and protein efficiency rate were the best in the maltose group ($P<0.05$), while those in the cellulose group were the worst ($P<0.05$). ② The crude fat of whole fish in the cellulose group was the lowest ($P<0.05$), the crude ash content was significantly higher than that in the maltose group ($P<0.05$), the muscle glycogen content in the maltose and cellulose groups was the lowest ($P<0.05$), and liver glycogen in the dextrin group was the lowest ($P<0.05$). ③ Principal component analysis showed that the ratios of C16:0, SFA, MUFA and PUFA had a major effect on the overall fatty acid ratio of the liver. Among them, the ratios of C16:0 and SFA were significantly increased in the maltose group ($P<0.05$), while the ratio of MUFA in the dextrin group ($P<0.05$), and the ratio of PUFA in the cellulose group were also significantly increased ($P<0.05$). The proportions of C18:1n-9 and MUFA had the main effect on the overall fatty acid composition of muscle and adipose tissues, and the proportions of the two were significantly increased in the maltose group ($P<0.05$). ④ Glutamic pyruvic transaminase in serum of maltose and cellulose groups is the highest ($P<0.05$), while that of aspartate aminotransferase was the highest in maltose group ($P<0.05$). Alkaline phosphatase activity and globulin content of glucose and cellulose group were the highest, while that of blood glucose was the reverse ($P<0.05$). ⑤ The contents of catalase, total superoxide dismutase, glutathione peroxidase in the liver of the maltose group were the highest ($P<0.05$), while the malondialdehyde content in the cellulose group was the highest ($P<0.05$). In conclusion, maltose was the most suitable carbohydrate source for juvenile *O. macrolepis*, followed by dextrin and corn starch, and cellulose and glucose were not the suitable carbohydrate source for the fish; corn starch is recommended as a carbohydrate source in practical production, which will provide an important reference for research and development of its specific compound feed.

Key words: *Onychostoma macrolepis*; growth; body composition; health; maltose

Corresponding author: JI Hong. E-mail: jihong@nwsuaf.edu.cn

Funding projects: Research on the Key Techniques of Artificial Breeding of *Onychostoma macrolepis* in Qinba Mountains Area (K3380216011)