

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16111

大口黑鲈饲料中适宜的淀粉源及添加水平

刘子科, 陈乃松, 王孟乐, 连雪原, 闫春为, 尹佳

上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306

摘要: 以 4 种淀粉, 蜡质玉米淀粉(L)、高直链玉米淀粉(Z)、小麦淀粉(X)和木薯淀粉(M), 分别以 5%和 10%的添加量配制了 8 种等氮和等能(CP 48%, GE 18.5 MJ/kg)的饲料(L5、L10、Z5、Z10、X5、X10、M5 和 M10)。用上述饲料饲养初始体重为(23.46±0.19) g 的大口黑鲈 45 d, 以评定大口黑鲈饲料的适宜淀粉源及添加水平。结果显示, 饲料中淀粉的添加水平和淀粉源对大口黑鲈的生长、饲料利用、体组成和非特异性免疫指标均有显著影响。随着同一种淀粉的添加量从 5%升至 10%, L10、X10 和 M10 组实验鱼的特定生长率和摄食率显著降低, 但饲料效率和蛋白质效率显著升高, 而 Z5 和 Z10 组间的上述指标的差异不显著; L10、X10 和 M10 组的肝体比、脏体比和肝糖原含量均显著升高, 但 Z5 和 Z10 组间的脏体比差异不显著; 全鱼和肝的脂肪含量及肝的蛋白质含量均显著降低; L10 组的红细胞数和红细胞压积、Z10 组的血清甘油三酯及 X10 组的红细胞压积和血清甘油三酯水平显著降低; Z10 组的血清补体活性显著降低; L5、Z5、X5 和 M5 组的餐后 3~12 h 的血糖水平各自低于 L10、Z10、X10 和 M10 组。不同的淀粉源在相同的添加量的情况下, Z5 组的淀粉表观消化率和肝体比显著地低于 L5、X5 和 M5 组, 而脂肪沉积率显著高于 L5、X5 和 M5 组; M5 组的蛋白质表观消化率显著低于 L5、Z5 和 X5 组; Z10 组的淀粉表观消化率、肝体比、脏体比和肝糖原含量显著低于 L10、X10 和 M10 组, 而脂肪沉积率显著高于 L10、X10 和 M10 组; M10 组的蛋白质表观消化率显著低于 L10、Z10 和 X10 组。饲料中淀粉的添加水平和淀粉源对大口黑鲈的摄食率、特定生长率、蛋白质消化率、脂肪沉积率、肝体比、肝糖原含量、红细胞数、血清甘油三酯含量和血清补体活性均有显著的交互作用。本研究表明, 饲料的淀粉源和水平对大口黑鲈的生长、体组成、血液学指标、餐后血糖和非特异性免疫指标均有不同程度的影响, 饲料中添加 5%的蜡质玉米淀粉、高直链玉米淀粉、小麦淀粉和木薯淀粉均无妨碍, 但添加 10%的淀粉水平唯有高直链玉米淀粉较为合适。

关键词: 大口黑鲈; 饲料; 淀粉源; 添加量; 生长; 非特异性免疫

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)02-0317-15

鱼类, 特别是肉食性鱼类均能够有效地利用饲料中的蛋白质和脂肪作为能量, 但将糖类作为能量利用的能力在不同的鱼类之间存在着差异^[1-2]。研究表明, 糖类并不是鱼类必需的营养素, 摄食完全无糖饲料的鱼类仍然能够存活和生长。这可能是由于鱼类能够有效利用非糖物质经糖异生作用而形成葡萄糖^[3]。但在一些肉食性鱼饲料中添加适量的糖类与无糖饲料相比, 会显著提高其生长速度^[2]。然而, 饲料中糖含量过高会抑制鱼类的生长, 引起餐后高血糖和持续性代谢应激、免疫

功能下降等不良后果^[2]。在鱼类配合饲料中淀粉常被用作天然的黏合剂以提高饲料的水中稳定性, 减少饲料中营养物质的溶失^[2]。另外, 淀粉的来源不同, 其分子的复杂性也不尽相同^[4-5], 主要表现为直链淀粉和支链淀粉的比例不同。这可能对淀粉的消化率产生影响。例如, 增加玉米淀粉中直链淀粉的含量能明显降低大鼠对淀粉的消化率^[6]。Hoover^[7]研究发现, 不同来源的淀粉支链长度的差异可能是淀粉源之间消化率不同的原因之一。饲料中的淀粉对鱼类的影响是否与淀粉的来源有

收稿日期: 2016-04-04; 修订日期: 2016-04-11.

基金项目: 上海市科委地方院校能力建设项目(10320503100); 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心项目(ZF1206).

作者简介: 刘子科(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产动物营养与饲料科学. E-mail: 657079084@qq.com

通信作者: 陈乃松, 教授. E-mail: nschen@shou.edu.cn

关, 相关的研究资料尚不多见。Liu 等^[8]研究发现在暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*)饲料中淀粉的直链/支链淀粉为 6/19 时实验鱼的增长率、饲料效率和蛋白效率最高。

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)属于典型的肉食性鱼类, 是中国淡水养殖的重要经济种类之一。关于大口黑鲈饲料中碳水化合物的适宜水平的研究已有报道^[9-11]。谭肖英等^[11]研究认为, 当大口黑鲈饲料中含有 19% 的碳水化合物时, 其增重率、特定生长率和蛋白质效率最高, 饲料系数最低。Amoah 等^[9]研究发现, 饲料中碳水化合物的水平为 13% 时, 大口黑鲈的增重率最高, 肝空泡率最低。但以上两项研究的饲料碳水化合物水平均以无氮浸出物(NFE)表示, 且饲料中 NFE 的消化吸收率这一关键的指标未被测定, 究竟有多少糖类被实验鱼所消化吸收是不得而知的。基于上述两项研究得出的大口黑鲈饲料中适宜的碳水化合物水平的不一致, 以及方法上的缺陷, 本课题组的苟仕潘等^[10]以不同的饲料可消化淀粉水平(5.93%、8.71%、11.96%、15.11%、18.16%和 21.74%)对大口黑鲈进行了研究, 结果表明, 大口黑鲈饲料中适宜的可消化淀粉水平应该在 10% 以内。在此研究结果的基础上, 为了进一步探究饲料中淀粉种类的不同而可能产生的相关影响, 本研究以 4 种淀粉(蜡质玉米淀粉、高直链玉米淀粉、小麦淀粉和木薯淀粉)分别在 5% 和 10% 两个添加水平下, 配制了 8 种实验饲料, 评定了饲料中添加淀粉的种类和水平对大口黑鲈的生长、体组成和生理学指标等的影响, 以期在原有的研究基础上优中选优, 得出大口黑鲈饲料中最适合的淀粉源和添加水平。

1 材料和方法

1.1 实验饲料

实验设计了 8 种等氮和等能的饲料, 但非蛋白质能量组成不同, 其详细配方及概略组分见表 1。实验饲料在等能量的基础上分别以蜡质玉米淀粉(L)、高直链玉米淀粉(Z)、小麦淀粉(X)和木薯淀粉(M)4 种生淀粉作为主要的碳水化合物来源, 每种淀粉的添加量都分别为 5% 和 10%, 用

大豆油调节能量的平衡, 使各组饲料总能量相等。饲料中添加 0.5% 的 Cr_2O_3 作为指示剂用于测定相关组分的消化率。沸石粉作为填充剂。

饲料原料经粉碎, 过 80 目筛, 将各种原料充分混合均匀后, 加入磷脂油和大豆油充分混匀, 再加入 30% 的水混合均匀。用膨化制粒机制成直径 3 mm, 长 0.5~1.0 cm 的颗粒, 于烘箱中 110℃ 熟化 15 min 后再于 60℃ 烘干。干饲料密封保存于 -20℃ 冰箱中待用。

1.2 养殖实验的设计与饲养管理

实验鱼在上海农好饲料有限公司的循环水养殖系统中进行了为期 4 周的室内实验条件下的驯化, 期间投喂上海农好饲料有限公司提供的商品大口黑鲈饲料(粗蛋白质, 48%; 粗脂肪, 11%)。驯化完成后, 经过 24 h 饥饿处理, 挑选体格健壮、大小匀称的鱼进行分组和称重。实验鱼按 8 种饲料处理, 每处理 3 重复, 随机分配于 24 个体积 800 L 的玻璃钢水槽中, 每水槽放养初始体重为 (23.46 ± 0.19) g 的实验鱼 30 尾, 养殖实验共持续 45 d。每天 2 次(8:00 和 16:00)表观饱食投喂。养殖系统的循环水经过海绵和珊瑚砂过滤并经过紫外线消毒。整个养殖系统不间断充气, 水体溶解氧含量 ≥ 6 mg/L, 氨氮为 (0.15 ± 0.05) mg/L, pH 为 (7.2 ± 0.2) , 温度为 (28 ± 1) ℃。养殖实验期间采用自然光照周期。

1.3 样本采集与分析

1.3.1 样本采集 养殖实验开始时随机抽取 20 尾鱼于 -80℃ 保存, 用于初始样本的体组成分析。养殖实验开始 2 周后参考 Lee^[12]的方法收集粪便, 直至养殖实验结束。养殖实验结束后, 禁食 24 h, 按水槽统计成活率并称取鱼体的总体重。每水槽随机抽取 10 尾鱼, 测量体长和体重, 用于体型指数的计算。其中 5 尾于 -80℃ 下保存, 用于全鱼体组成分析。剩下的 5 尾鱼抽血并解剖: 用 2 mL 注射器从尾静脉抽取血液 1.0 mL, 4℃ 静置 4 h 后离心(836 g, 10 min, 4℃), 分离出血清于 -80℃ 保存, 用于非特异性免疫指标的测定; 取血之后的鱼解剖分离出内脏和肝分别称重, 用于脏体比和肝体比的计算, 肝于 -80℃ 下保存, 用于肝成分分析, 取侧线上方肌肉于 -80℃ 保存, 用于肌肉成分分析。

表 1 实验饲料配方及概略分析

Tab. 1 Formulation and proximate analysis of trial diets %

成分 content	组别 group							
	L5 5.40%	L10 9.84%	Z5 4.77%	Z10 7.83%	X5 5.22%	X10 9.43%	M5 5.31%	M10 10.80%
基础料 ^a basal ingredient	79.00	79.00	79.00	79.00	79.00	79.00	79.00	79.00
大豆油 soybean oil	7.50	5.32	7.50	5.32	7.50	5.32	7.50	5.32
生淀粉 raw starch	5.00	10.00	5.00	10.00	5.00	10.00	5.00	10.00
沸石粉 zeolite powder	8.50	5.68	8.50	5.68	8.50	5.68	8.50	5.68
合计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
组分分析 proximate analysis								
粗蛋白质 crude protein	47.65	48.32	48.23	47.91	48.24	48.65	48.48	48.83
粗脂肪 crude lipid	12.98	10.19	12.82	9.78	12.87	10.06	12.33	9.81
水分 moisture	9.32	9.14	9.48	9.21	9.35	9.19	9.30	9.23
灰分 ash	18.13	15.13	17.99	15.30	18.02	15.09	18.20	15.26
粗纤维 crude fiber	0.70	0.71	0.56	0.69	0.79	0.83	1.13	1.18
可消化淀粉 digestible starch	5.40	9.84	4.77	7.83	5.22	9.43	5.31	10.28
抗性淀粉 resistant starch	0.12	0.20	2.02	4.23	0.17	0.25	0.19	0.24
总能/(MJ·kg ⁻¹) gross energy	18.48	18.41	18.50	18.27	18.51	18.41	18.38	18.34

注: a. 基础料(%): 白鱼粉, 18.00; 红鱼粉, 30.00; 豆粕, 10.00; 玉米蛋白粉, 5.00; 喷干血球粉, 4.00; 谷朊粉, 4.00; 酵母粉, 0.50; 鲑鱼内脏粉, 2.00; 磷酸二氢钙, 0.80; 多维*, 1.00; 多矿**, 0.70; 大豆磷脂油, 2.50; 三氧化二铬, 0.50.

*多维(IU 或 mg·kg⁻¹ 干饲料): 维生素 A, 16000 IU; 维生素 D₃, 8000 IU; 维生素 K₃, 14.72; 维生素 B₁, 17.80; 维生素 B₂, 48; 维生素 B₆, 29.52; 维生素 B₁₂, 0.24; 维生素 E, 160; 维生素 C, 800; 烟酰胺, 79.20; 泛酸钙, 73.60; 叶酸, 6.40; 生物素, 0.64; 肌醇, 320; 氯化胆碱, 1500; L-肉碱, 100.

**多矿(mg·kg⁻¹ 干饲料): 铜(CuSO₄), 2.00; 锌(ZnSO₄), 34.40; 锰(MnSO₄), 6.20; 铁(FeSO₄), 21.10; 碘[Ca(IO₃)₂], 1.63; 硒(Na₂SeO₃), 0.18; 钴(CoCl₂), 0.24; 镁(MgSO₄·H₂O), 52.70.

Note: Basal ingredient (%): white fish meal, 18.00; red brown fish meal, 30.00; soybean meal, 10.00; corn gluten powder, 5.00; spray-dried blood powder, 4.00; wheat gluten meal, 4.00; brewer's yeast meal, 0.50; squid viscera meal, 2.00; Ca(H₂PO₄)₂, 0.80; vitamin premix*, 1.00; mineral premix**, 0.70; soybean phospholipid oil, 2.50; Cr₂O₃, 0.50.

* Vitamin premix (IU or mg·kg⁻¹ dry diet): vitamin A, 16000 IU; vitamin D₃, 8000 IU; vitamin K₃, 14.72; vitamin B₁, 17.80; vitamin B₂, 48; vitamin B₆, 29.52; vitamin B₁₂, 0.24; vitamin E, 160; vitamin C, 800; niacinamide, 79.20; calcium-pantothenate, 73.60; folic acid, 6.40; biotin, 0.64; inositol, 320; choline chloride, 1500; L-carnitine, 100.

** Mineral premix (mg·kg⁻¹ dry diet): Cu (CuSO₄), 2.00; Zn (ZnSO₄), 34.40; Mn (MnSO₄), 6.20; Fe (FeSO₄), 21.10; I [Ca(IO₃)₂], 1.63; Se (Na₂SeO₃), 0.18; Co (CoCl₂), 0.24; Mg (MgSO₄·H₂O), 52.70.

以上采样结束后, 剩余的实验鱼继续用相应的饲料喂养 1 周, 再进行血糖样本的采集。分别采集最后一次投喂后 3 h、6 h、9 h 和 12 h 的血糖样本, 每个时间点每水槽随机采集 3 尾鱼, 各抽取血液 1 mL 于 4℃ 静置 4 h 后离心(836 g, 10 min, 4℃), 分离出血清用于血糖水平的测定。另外, 每水槽取 3 尾鱼, 鱼尾静脉抽取 1 mL 血液, 置于含肝素钠的抗凝管中摇匀后置于 4℃ 冰箱中, 用于血液学指标的测定。余下的实验鱼用于取头肾, 作头肾白细胞的呼吸爆发活性测定用。

1.3.2 概略成分分析 饲料、全鱼、肌肉、肝和粪便的成分分析方法如下: 水分含量通过失重法测定, 在 105℃ 烘干至恒重; 灰分含量采用马弗

炉(上海实验仪器公司)于 550℃ 下灼烧法测定; 蛋白质含量采用凯氏定氮仪(Kjeltec 2200, FOSS, 丹麦)测定; 全鱼、肌肉和肝的脂肪含量用氯仿-甲醇法测定^[13]; 饲料脂肪含量采用索氏脂肪测定仪(SOX416, Gerhardt, 德国)测定; 饲料纤维素含量采用纤维素测定仪(FT12, Gerhardt, 德国)测定; 饲料和粪便中可消化淀粉和抗性淀粉含量采用 AOAC 法测定^[14]; 饲料和粪便中的 Cr₂O₃ 含量采用 Divakaran 等^[15]的方法测定; 肝糖原含量采用蒽酮法测定^[16]。

1.3.3 血液学指标测定 用氰化高铁分光光度法测定血红蛋白含量^[17]。以 Natt and Herrick 计数液^[18]将血液稀释 200 倍后, 用血球计数板计数红细胞。

红细胞比容采用 Wintrobe 法(2264 g 离心)测定^[19]。血清葡萄糖浓度、甘油三酯和总胆固醇含量采用南京建成生物工程研究所的试剂盒测定。

1.3.4 免疫指标的测定 采用比浊法测定血清溶菌酶活性^[20]。采用考马斯亮蓝法测定血清蛋白质含量^[17]。血清补体活性测定采用经典途径的分析方法^[21]。头肾白细胞的分离参照陈乃松等^[22]的方法进行。头肾白细胞呼吸爆发活性采用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)进行测定^[23]。

1.4 计算公式

摄食率[feeding rate, FR, g/(尾·d)]=干饲料摄入量/[初始尾数+终末尾数)/2]/饲养天数;

存活率(survival rate, SR)=终末尾数/初始尾数×100%;

特定生长率(specific growth rate, SGR, %/d)=(ln 末体重-ln 初体重)/饲养天数×100;

体型指数(condition factor, CF)=体重(g)/体长(cm³)×100;

饲料效率(feed efficiency rate, FER)=(末体重-初体重)/摄入干饲料重×100%;

蛋白质效率(protein efficiency rate, PER)=(末体重-初体重)/摄入的蛋白质总量×100%;

肝体比(hepatosomatic index, HSI)=肝重(g)/鱼体重(g)×100%;

脏体比(viscerosomatic index, VSI)=内脏重(g)/鱼体重(g)×100%;

营养物质表观消化率(apparent digestibility coefficient, ADC)=[1-(粪便中营养物质含量/饲料中营养物质含量)×(饲料中 Cr₂O₃ 含量/粪便中 Cr₂O₃ 含量)]×100%;

蛋白质沉积率(protein deposition rate, PDR) = 体蛋白质沉积量/摄入蛋白质量×100%;

脂肪沉积率(lipid deposition rate, LDR)=体脂肪沉积量/摄入脂肪量×100%。

1.5 数据处理和统计分析

有关数据以平均值±标准误来表示。采用 SPSS 17.0 对数据进行双因素方差分析(two-way ANOVA), 用 Duncan 氏法进行多重差异显著性比较, 显著水平 $P<0.05$, 用线性回归模型进行相关性检验。

2 结果与分析

2.1 饲料中添加的淀粉源及水平对生长和营养素利用的影响

如表 2、表 3 所示, 饲料中淀粉的添加水平对实验鱼的摄食率、末体重、特定生长率、饲料效率、蛋白质效率和蛋白质沉积率的影响显著($P<0.05$), 对脂肪沉积率无显著影响($P>0.05$)。随着同一种淀粉的添加量从 5% 升至 10%, L10、X10 和 M10 组实验鱼的末体重、特定生长率和摄食率均显著降低($P<0.05$), 而饲料效率和蛋白质效率显著升高($P<0.05$), 但 Z5 和 Z10 组间的上述指标差异不显著($P>0.05$); 蛋白质沉积率呈升高的趋势, 其中 Z10 组显著升高($P<0.05$); L10 和 X10 组的脂肪沉积率显著降低($P<0.05$), 而 Z10 组的脂肪沉积率显著升高($P<0.05$)。饲料中的淀粉源对实验鱼的摄食率、饲料效率、蛋白质效率、蛋白质沉积率和脂肪沉积率的影响显著($P<0.05$), 而对末体重和特定生长率无显著影响($P>0.05$)。不同的淀粉源在相同的添加量的情况下, M5 组的饲料效率和蛋白质效率显著低于 L5、Z5 和 X5 组($P<0.05$); Z10 组实验鱼的末体重、特定生长率和摄食率显著高于 L10、X10 和 M10 组($P<0.05$); M5 组的蛋白质沉积率显著低于 X5 组($P<0.05$); Z5 组的脂肪沉积率高于 L5、X5 和 M5 组, 但差异不显著($P>0.05$); M10 组的蛋白质沉积率显著低于 Z10 组($P<0.05$); Z10 组的脂肪沉积率显著高于 L10、X10 和 M10 组($P<0.05$)。饲料中淀粉的添加水平和淀粉源对实验鱼的摄食率、末体重、特定生长率和脂肪沉积率有显著的交互作用($P<0.05$), 而对饲料效率、蛋白质效率和蛋白质沉积率的交互作用不显著($P>0.05$)。

以 8 种饲料中的可消化淀粉水平(x)与实验鱼的特定生长率(y)求得的线性回归关系为: $y = -0.0605x + 3.364$ ($R^2 = 0.8115$)。这进一步表明, 在不考虑淀粉种类的影响的情况下, 饲料中的可消化淀粉水平显著地影响大口黑鲈的生长。

如表 4 所示, 饲料中淀粉的添加水平对淀粉和蛋白质的表观消化率的影响显著($P<0.05$)。随着同一种淀粉的添加量从 5% 升至 10%, M10 组的淀粉表观消化率显著降低($P<0.05$); L10、Z10 和 M10

表 2 饲料中添加的淀粉源及水平对生长的影响
Tab. 2 Effects of dietary supplemental starch source and level on growth performance

n=3; $\bar{x} \pm \text{SE}$

添加水平/% adding level	淀粉源 starch source	指标 index			
		初体重/g initial body weight	末体重/g final body weight	存活率/% SR	特定生长率/(%·d ⁻¹) SGR
5	L	23.50±0.06	92.00±3.15 ^a	100.00±0.00	3.03±0.08 ^a
10	L	23.38±0.06	80.67±0.38 ^b	100.00±0.00	2.75±0.02 ^b
5	Z	23.33±0.10	91.56±2.89 ^a	100.00±0.00	3.04±0.07 ^a
10	Z	23.39±0.06	90.89±2.32 ^a	100.00±0.00	3.01±0.05 ^a
5	X	23.56±0.15	94.44±2.56 ^a	100.00±0.00	3.08±0.07 ^a
10	X	23.61±0.20	78.89±1.98 ^b	100.00±0.00	2.68±0.07 ^b
5	M	23.29±0.06	90.89±0.22 ^a	100.00±0.00	3.02±0.01 ^a
10	M	23.50±0.10	82.44±1.23 ^b	100.00±0.00	2.79±0.04 ^b
双因素方差分析 two-way ANOVA					
添加水平 adding level			0.000		0.000
淀粉源 starch source			0.102		0.066
交互作用 interaction			0.019		0.024

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$).
Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表 3 饲料中添加的淀粉源及水平对营养素利用的影响
Tab. 3 Effects of dietary supplemental starch source and level on nutrient utilization

n=3; $\bar{x} \pm \text{SE}$

添加水平/% adding level	淀粉源 starch source	指标 index				
		摄食率/(g·尾 ⁻¹ ·d ⁻¹)FR	饲料效率/% FER	蛋白质效率/% PER	蛋白质沉积率/% PDR	脂肪沉积率/% LDR
5	L	1.34±0.07 ^a	113.76±1.00 ^{bc}	238.75±1.00 ^c	40.88±0.35 ^{bc}	87.26±1.16 ^{bc}
10	L	1.05±0.01 ^b	121.65±1.00 ^a	251.75±2.00 ^a	41.75±0.42 ^{ab}	75.36±2.09 ^d
5	Z	1.36±0.05 ^a	111.69±1.00 ^{cd}	231.58±2.00 ^d	40.41±0.56 ^{bc}	91.68±1.37 ^b
10	Z	1.32±0.05 ^a	113.64±1.00 ^{bc}	237.21±1.00 ^{cd}	42.24±0.51 ^a	104.77±4.58 ^a
5	X	1.36±0.04 ^a	115.65±1.00 ^b	239.74±2.00 ^{bc}	41.58±0.35 ^{ab}	85.58±1.67 ^{bc}
10	X	1.03±0.03 ^b	119.50±1.00 ^a	245.64±3.00 ^{ab}	41.69±0.30 ^{ab}	76.81±1.14 ^d
5	M	1.39±0.01 ^a	108.80±1.00 ^d	224.42±1.00 ^e	40.11±0.48 ^c	86.92±1.48 ^{bc}
10	M	1.07±0.02 ^b	115.00±2.00 ^{bc}	235.49±3.00 ^{cd}	40.55±0.33 ^{bc}	84.50±1.12 ^c
双因素方差分析 two-way ANOVA						
添加水平 adding level		0.000	0.000	0.000	0.008	0.101
淀粉源 starch source		0.006	0.000	0.000	0.018	0.000
交互作用 interaction		0.008	0.058	0.261	0.209	0.000

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$).
Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

组的蛋白质表观消化率显著升高, 而 X10 组的蛋白质表观消化率显著降低($P<0.05$)。饲料中的淀粉源对淀粉和蛋白质的表观消化率的影响显著($P<0.05$)。不同的淀粉源在相同的添加量的情况下, Z5 和 M5 组的淀粉表观消化率显著低于 L5 和 X5 组($P<0.05$); X5 组的蛋白质消化率显著高于 L5、Z5 和 M5 组($P<0.05$); Z10 和 M10 组的淀粉表观消

化率显著低于 L10 和 X10 组($P<0.05$); M10 组的蛋白质表观消化率显著低于 L10、X10 和 M10 组($P<0.05$)。饲料中淀粉的添加水平和淀粉源对蛋白质表观消化率的交互作用显著($P<0.05$), 而对淀粉表观消化率的交互作用不显著($P>0.05$)。

2.2 饲料中添加的淀粉源及水平对鱼体组成的影响
如表 5 所示, 饲料中淀粉的添加水平对全鱼

表 4 饲料中添加的淀粉源及水平对消化率的影响
Tab. 4 Effects of dietary supplemental starch source and level on digestibility rate

$n=3; \bar{x} \pm SE$

添加水平/% adding level	淀粉源 starch source	指标 index	
		淀粉表观消化率/% starch ADC	蛋白质表观消化率/% protein ADC
5	L	99.39±0.13 ^a	90.51±0.20 ^c
10	L	97.37±0.26 ^{ab}	91.78±0.06 ^b
5	Z	61.29±0.27 ^c	90.74±0.23 ^c
10	Z	61.48±2.19 ^c	92.68±0.02 ^a
5	X	97.06±0.19 ^{ab}	92.74±0.03 ^a
10	X	94.88±0.02 ^b	91.72±0.01 ^b
5	M	83.00±1.00 ^c	88.26±0.06 ^c
10	M	77.77±0.04 ^d	89.32±0.03 ^d
双因素方差分析 Two-way ANOVA			
添加水平 adding level		0.005	0.000
淀粉源 starch source		0.000	0.000
交互作用 interaction		0.078	0.000

注：同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$).
Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

的脂肪和水分含量,肌肉的蛋白质、脂肪和水分含量,肝的蛋白质、脂肪、水分和灰分含量均影响显著($P<0.05$)。随着同一种淀粉的添加量从 5% 升至 10%,实验鱼的肝蛋白质含量显著降低($P<0.05$);肌肉蛋白质含量有降低的趋势,其中 X5 和 X10 组之间差异显著($P<0.05$);全鱼和肝的脂肪含量显著降低($P<0.05$),L10 和 X10 组肌肉的脂肪含量显著降低($P<0.05$);L10、Z10 和 X10 组全鱼的水分含量显著升高($P<0.05$),L10 和 X10 组肌肉和肝的水分含量均显著升高($P<0.05$);L10、X10 和 M10 组肝的灰分含量显著降低($P<0.05$)。饲料中的淀粉源对全鱼的蛋白质、脂肪和水分含量,肌肉的蛋白质、脂肪、水分和灰分含量,肝的蛋白质、水分和灰分含量的影响显著($P<0.05$)。不同的淀粉源在相同的添加量的情况下,M5 组全鱼的蛋白质含量显著高于 L5 组($P<0.05$);Z5 组全鱼的脂肪含量显著高于 L5、X5 和 M5 组;M5 组全鱼的水分含量显著高于 L5、Z5 和 X5 组($P<0.05$);M5 组肌肉的灰分含量显著高于 L5 和 Z5 组($P<0.05$);M5 组肝的脂肪含量显著高于 L5 和 X5 组($P<0.05$);X5 组肝的水分含量显著低于 L5、Z5 和 M5 组($P<0.05$);Z10 组全鱼的脂肪含量显著高于 L10、X10 和 M10 组($P<0.05$);L10 和 X10 组全

鱼和肝的水分含量显著高于 Z10 和 M10 组($P<0.05$);Z10 和 M10 组肌肉的脂肪含量显著高于 L10 和 X10 组($P<0.05$);Z10 组肝的灰分和蛋白质含量显著高于 L10、X10 和 M10 组($P<0.05$)。饲料中淀粉的添加水平和淀粉源对全鱼的蛋白质、脂肪和水分含量,肌肉的脂肪和水分含量,肝的蛋白质、脂肪、水分和灰分含量有显著的交互作用($P<0.05$),而对全鱼的灰分含量,肌肉的蛋白质和灰分含量交互作用不显著($P>0.05$)。

如表 6 所示,饲料中淀粉的添加水平对实验鱼的肝体比、脏体比和肝糖原含量的影响显著($P<0.05$)。随着同一种淀粉的添加量从 5%升至 10%,实验鱼的肝体比、脏体比和肝糖原含量均升高,其中 Z5 和 Z10 组间的脏体比差异不显著($P>0.05$)。饲料中的淀粉源对实验鱼的肝体比、脏体比和肝糖原含量的影响显著($P<0.05$)。不同的淀粉源在相同的添加量的情况下,Z5 组的肝体比显著低于 L5 和 X5 组($P<0.05$),且 Z5 组的脏体比最低,但与 L5、X5 和 M5 组没有显著性差异($P>0.05$);Z5、X5 和 M5 组的肝糖原含量显著低于 L5 组($P<0.05$);Z10 组的肝体比和脏体比均显著低于 L10、X10 和 M10 组($P<0.05$),而肝糖原含量显著低于 L10 和 M10 组($P<0.05$)。饲料中淀粉的添加

表 5 饲料中添加的淀粉源及水平对鱼体组成的影响
Tab. 5 Effects of dietary supplemental starch source and level on fish body composition

		指标 index			
添加水平/% adding level	淀粉源 starch source	粗蛋白质/% crude protein	粗脂肪/% crude lipid	水分/% moisture	灰分/% ash
全鱼 whole fish body					
5	L	17.44±0.10 ^{cd}	9.17±0.12 ^b	69.26±0.14 ^{cd}	3.91±0.09 ^{ab}
10	L	17.10±0.12 ^d	6.48±0.13 ^c	71.81±0.19 ^a	3.83±0.08 ^b
5	Z	17.69±0.18 ^{abc}	9.59±0.12 ^a	69.01±0.10 ^d	3.96±0.07 ^{ab}
10	Z	17.95±0.16 ^{ab}	8.63±0.17 ^c	69.71±0.18 ^c	4.18±0.10 ^a
5	X	17.60±0.09 ^{abc}	8.87±0.15 ^{bc}	69.57±0.17 ^c	4.00±0.13 ^{ab}
10	X	17.39±0.09 ^{cd}	6.59±0.08 ^e	71.70±0.19 ^a	3.96±0.13 ^{ab}
5	M	18.00±0.16 ^a	9.08±0.11 ^b	70.71±0.12 ^b	4.04±0.10 ^{ab}
10	M	17.55±0.11 ^{bc}	7.11±0.07 ^d	70.45±0.13 ^b	4.14±0.11 ^{ab}
双因素方差分析 two-way ANOVA					
添加水平 adding level		0.053	0.000	0.000	0.491
淀粉源 starch source		0.000	0.000	0.000	0.141
交互作用 interaction		0.044	0.000	0.000	0.449
肌肉 muscle					
5	L	19.76±0.07 ^{bc}	2.25±0.09 ^a	77.58±0.07 ^{de}	1.19±0.01 ^{cd}
10	L	19.45±0.07 ^c	1.78±0.09 ^b	78.44±0.10 ^a	1.23±0.03 ^{abc}
5	Z	19.93±0.05 ^{ab}	2.22±0.06 ^a	77.62±0.05 ^{de}	1.16±0.01 ^d
10	Z	19.88±0.09 ^{ab}	2.28±0.10 ^a	77.59±0.15 ^{de}	1.20±0.01 ^{bcd}
5	X	20.21±0.20 ^a	2.24±0.06 ^a	77.51±0.09 ^e	1.23±0.01 ^{abc}
10	X	19.52±0.13 ^c	1.74±0.07 ^b	78.35±0.16 ^{ab}	1.24±0.01 ^{ab}
5	M	20.04±0.16 ^{ab}	2.24±0.06 ^a	77.87±0.09 ^{cd}	1.25±0.02 ^a
10	M	19.75±0.07 ^{bc}	2.10±0.06 ^a	78.08±0.07 ^{bc}	1.23±0.01 ^{ab}
双因素方差分析 two-way ANOVA					
添加水平 adding level		0.000	0.000	0.000	0.138
淀粉源 starch source		0.032	0.002	0.001	0.000
交互作用 interaction		0.057	0.001	0.000	0.224
肝 liver					
5	L	8.30±0.14 ^b	3.51±0.04 ^{bc}	68.22±0.13 ^{bc}	1.27±0.04 ^a
10	L	6.14±0.07 ^d	3.07±0.13 ^{de}	70.06±0.14 ^a	0.89±0.01 ^b
5	Z	9.05±0.14 ^a	3.72±0.18 ^{ab}	68.15±0.06 ^c	1.22±0.03 ^a
10	Z	8.21±0.15 ^b	3.18±0.13 ^{cd}	67.74±0.07 ^d	1.17±0.06 ^a
5	X	8.31±0.04 ^b	3.49±0.20 ^{bc}	67.78±0.12 ^d	1.18±0.04 ^a
10	X	6.09±0.03 ^d	2.95±0.18 ^{de}	69.98±0.15 ^a	0.87±0.01 ^b
5	M	8.89±0.03 ^a	3.96±0.10 ^a	68.20±0.04 ^{bc}	1.16±0.05 ^a
10	M	6.46±0.07 ^c	2.93±0.03 ^e	68.50±0.06 ^b	0.94±0.02 ^b
双因素方差分析 two-way ANOVA					
添加水平 adding level		0.000	0.000	0.000	0.000
淀粉源 starch source		0.000	0.403	0.000	0.000
交互作用 interaction		0.000	0.021	0.000	0.000

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$).
Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表 6 饲料中添加的淀粉源及水平对肝体比、脏体比、肝糖原含量和体型指数的影响
Tab. 6 Effects of dietary supplemental starch source and level on HSI, VSI, liver glycogen and CF

$n=3; \bar{x} \pm SE$

添加水平/% adding level	淀粉源 starch source	指标 index			
		肝体比/% HSI	脏体比/% VSI	肝糖原/% liver glycogen	体型指数 condition factor (CF)
5	L	2.42±0.07 ^c	7.54±0.22 ^{bc}	7.81±0.17 ^b	2.35±0.05
10	L	4.78±0.21 ^a	8.54±0.54 ^a	8.45±0.12 ^a	2.32±0.06
5	Z	1.84±0.04 ^c	6.80±0.26 ^c	6.63±0.23 ^d	2.26±0.04
10	Z	2.48±0.07 ^c	7.22±0.18 ^c	7.27±0.16 ^c	2.36±0.05
5	X	2.35±0.06 ^{cd}	7.27±0.12 ^c	6.42±0.16 ^d	2.40±0.04
10	X	4.68±0.21 ^a	9.10±0.39 ^a	7.53±0.15 ^{bc}	2.40±0.05
5	M	2.04±0.04 ^{de}	7.18±0.17 ^c	6.12±0.32 ^d	2.33±0.04
10	M	3.85±0.13 ^b	8.23±0.27 ^{ab}	8.37±0.19 ^a	2.39±0.03
双因素方差分析 two-way ANOVA					
添加水平	adding level	0.000	0.000	0.000	0.375
淀粉源	starch source	0.000	0.001	0.000	0.262
交互作用	interaction	0.000	0.135	0.000	0.502

注：同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)。
Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

水平和淀粉源对实验鱼的肝体比和肝糖原含量的交互作用显著($P<0.05$)，而对脏体比的交互作用不显著($P>0.05$)。

相关性分析表明，实验鱼的肝体比(y_1)、脏体比(y_2)和肝糖原含量(y_3)与饲料中可消化淀粉的含量(x)存在线性正相关关系。回归方程分别为： $y_1=0.4598x-0.2835$ ($R^2=0.8139$)， $y_2=0.2852x+5.6644$ ($R^2=0.7013$)， $y_3=0.2991x+5.1534$ ($R^2=0.6377$)。

2.3 饲料中添加的淀粉源及水平对血液学指标的影响

如表 7 所示，饲料中淀粉的添加水平对实验鱼的红细胞压积、血清甘油三酯和总胆固醇含量的影响显著($P<0.05$)，对血液红细胞数和血红蛋白含量无显著影响($P>0.05$)。随着同一种淀粉的添加量从 5%升至 10%，实验鱼的血液红细胞数和红细胞压积均降低，其中 L5 和 L10 组之间的红细胞数和红细胞压积差异显著($P<0.05$)，X5 和 X10 组之间的红细胞压积差异显著($P<0.05$)；L10、X10 和 M10 的血红蛋白含量降低，而 Z10 组的血红蛋白含量升高，但变化都不显著($P>0.05$)；Z10 和 X10 组血清的甘油三酯含量显著降低($P<0.05$)；L10 和 M10 组血清的总胆固醇含量显著升高($P<0.05$)。饲料中的淀粉源对实验鱼的血红蛋白含量、

血清甘油三酯和总胆固醇含量的影响显著($P<0.05$)，对血液红细胞数和红细胞压积无显著影响($P>0.05$)。不同的淀粉源在相同的添加量的情况下，X5 组的血红蛋白含量显著高于 Z5 组($P<0.05$)；Z5 和 X5 组血清的甘油三酯含量显著高于 L5 和 M5 组($P<0.05$)；L5、Z5 和 X5 组血清的总胆固醇含量显著高于 M5 组($P<0.05$)；Z10 和 M10 组血清的甘油三酯含量显著高于 L10 和 X10 组($P<0.05$)；L10 组血清的总胆固醇含量显著高于 M10 组($P<0.05$)。饲料中淀粉的添加水平和淀粉源对实验鱼的血液红细胞数、血清甘油三酯和总胆固醇含量的交互作用显著($P<0.05$)，而对红细胞压积和血红蛋白含量的交互作用不显著($P>0.05$)。

2.4 饲料中添加的淀粉源及水平对血糖水平的影响

如表 8 所示，饲料中淀粉的添加水平对实验鱼餐后不同时间段的血糖的影响显著($P<0.05$)。在考虑淀粉水平影响的情况下，L5、Z5 和 X5 组餐后(3~12 h)的血糖水平各自低于 L10、Z10 和 X10 组。饲料中的淀粉源对餐后不同时间段的血糖的影响显著($P<0.05$)。在考虑淀粉源影响的情况下，Z10 和 M10 组餐后(3~9 h)的血糖显著低于 L10 和 X10 组。饲料中淀粉的添加水平和淀粉源对实验

表 7 饲料中添加的淀粉源及水平对血液学指标的影响
Tab. 7 Effects of dietary supplemental starch source and level on hematological indices

n=3; $\bar{x} \pm \text{SE}$

添加水平/% adding level	淀粉源 starch source	指标 index				
		红细胞数/($10^{12}\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$) erythrocyte count	红细胞压积/% hematokrit	血红蛋白/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) hemoglobin	甘油三酯/($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) triglyceride content	总胆固醇/($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) total cholesterol content
5	L	2.44±0.08 ^a	49.71±8.63 ^{ab}	59.20±1.10 ^{abcd}	9.74±1.08 ^{bc}	4.29±0.22 ^b
10	L	2.16±0.08 ^{bc}	41.59±1.93 ^c	54.73±2.58 ^d	8.68±0.25 ^c	4.85±0.16 ^a
5	Z	2.25±0.09 ^{abc}	45.57±2.11 ^{abc}	55.58±1.25 ^{cd}	15.22±1.27 ^a	4.15±0.11 ^b
10	Z	2.08±0.08 ^c	40.18±3.49 ^c	57.55±1.24 ^{bcd}	11.62±0.42 ^b	4.42±0.13 ^{ab}
5	X	2.27±0.08 ^{abc}	53.08±3.06 ^a	63.61±2.87 ^a	14.37±0.85 ^a	4.58±0.23 ^{ab}
10	X	2.21±0.06 ^{abc}	42.61±2.41 ^{bc}	60.98±1.92 ^{abc}	8.53±0.25 ^c	4.69±0.22 ^{ab}
5	M	2.39±0.07 ^{ab}	47.28±2.54 ^{abc}	62.94±1.46 ^{ab}	11.15±0.76 ^b	3.20±0.16 ^c
10	M	2.24±0.07 ^{abc}	43.55±1.89 ^{bc}	60.22±1.20 ^{abcd}	11.76±0.32 ^b	4.28±0.14 ^b

双因素方差分析 two-way ANOVA

添加水平 adding level	0.093	0.000	0.140	0.000	0.000
淀粉源 starch source	0.184	0.288	0.002	0.000	0.000
交互作用 interaction	0.041	0.545	0.342	0.000	0.041

表 8 饲料中添加的淀粉源及水平对餐后血糖浓度的影响
Tab. 8 Effects of dietary supplemental starch source and level on postprandial serum glucose levels

mmol/L; n=3; $\bar{x} \pm \text{SE}$

添加水平/% adding level	淀粉源 starch source	餐后时间/h postprandial time			
		3	6	9	12
5	L	9.94±0.30 ^{A,bcd}	8.15±0.41 ^{B,c}	6.84±0.23 ^{B^c,c}	6.57±0.27 ^{C,c}
10	L	15.57±1.66 ^{B,a}	20.87±2.87 ^{A,b}	22.52±1.45 ^{A,a}	22.10±1.53 ^{A,a}
5	Z	8.68±0.50 ^{A,cd}	8.01±0.19 ^{AB,c}	7.71±0.24 ^{BC,c}	6.90±0.29 ^{C,c}
10	Z	8.49±0.27 ^{A,d}	7.38±0.20 ^{B,c}	8.46±0.34 ^{A,c}	7.30±0.21 ^{B,c}
5	X	10.27±0.27 ^{A,bcd}	8.29±0.23 ^{BC,c}	7.73±0.37 ^{CD,c}	6.48±0.28 ^{D,c}
10	X	11.11±0.64 ^{BC,b}	28.83±4.13 ^{A,a}	14.08±2.28 ^{BC,b}	7.91±0.78 ^{C,bc}
5	M	10.75±0.17 ^{A,bc}	9.10±0.45 ^{B,c}	6.67±0.24 ^{C,c}	6.10±0.21 ^{C,c}
10	M	9.06±0.29 ^{AB,bcd}	9.20±0.24 ^{A,c}	8.65±0.86 ^{B,c}	9.58±0.25 ^{A,b}

双因素方差分析 two-way ANOVA

添加水平 adding level	0.020	0.000	0.000	0.000
淀粉源 starch source	0.000	0.000	0.000	0.000
交互作用 interaction	0.000	0.000	0.000	0.000

注: 同行不同上标大写字母表示差异显著($P<0.05$), 同列不同上标小写字母表示差异显著($P<0.05$).
Note: Different uppercase superscripts in each row indicate significant differences ($P<0.05$); different lowercase superscripts in each column indicate significant differences among dietary treatments ($P<0.05$).

鱼餐后各个时间段的血糖有显著的交互作用($P<0.05$)。

L5、Z5、X5 和 M5 组餐后(3~12 h)的血糖水平显著降低($P<0.05$); L10 组餐后 6 h、9 h 和 12 h 之间的血糖水平没有显著性差异($P>0.05$), 但显著高于 3 h ($P<0.05$); Z10 组餐后 3 h 和 9 h 的血糖水平显著高于 6 h 和 12 h ($P<0.05$); X10 组餐后 6 h

的血糖水平显著高于 3 h、9 h 和 12 h ($P<0.05$); M10 组餐后(3~12 h)的血糖水平没有显著性变化。

2.5 饲料中添加的淀粉源及水平对非特异性免疫指标的影响

如表 9 所示, 饲料中淀粉的添加水平对实验鱼的血清溶菌酶活性的影响显著($P<0.05$), 而对血清蛋白含量、血清补体活性和呼吸爆发活性无

表 9 饲料中淀粉源及水平对非特异性免疫指标的影响
Tab. 9 Effects of dietary supplemental starch source and level on non-specific immunological indices

$n=3; \bar{x} \pm SE$

添加水平/% adding level	淀粉源 starch source	指标 index			
		溶菌酶活性/(U·μL ⁻¹) lysozyme activity	血清蛋白/(mg·mL ⁻¹) serum protein content	血清补体活性/(U·mL ⁻¹) serum CH ₅₀ activity	呼吸爆发活性 OD respiratory burst activity
5	L	3.83±0.27 ^{cd}	39.43±0.92 ^{abc}	238.71±3.82 ^b	1.86±0.24
10	L	4.84±0.19 ^{ab}	40.55±0.62 ^{ab}	248.65±7.28 ^b	1.77±0.19
5	Z	4.34±0.21 ^{bc}	40.10±1.34 ^{ab}	392.81±46.78 ^a	1.76±0.25
10	Z	3.94±0.23 ^{cd}	35.89±1.87 ^c	220.97±12.99 ^d	1.34±0.17
5	X	3.37±0.24 ^d	37.38±0.66 ^{bc}	252.65±9.27 ^b	1.34±0.10
10	X	5.21±0.24 ^a	38.74±1.79 ^{abc}	371.47±25.56 ^a	1.29±0.12
5	M	4.78±0.10 ^{ab}	41.61±1.24 ^a	342.87±6.90 ^a	1.45±0.19
10	M	5.14±0.22 ^a	40.60±0.76 ^{ab}	357.18±15.42 ^a	1.81±0.26

双因素方差分析 two-way ANOVA

添加水平 adding level	0.000	0.446	0.631	0.710
淀粉源 starch source	0.004	0.060	0.001	0.033
交互作用 interaction	0.000	0.132	0.000	0.338

注：同行不同上标大写字母表示差异显著($P<0.05$)，同列不同上标小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different uppercase superscripts in each row indicate significant differences ($P<0.05$); different lowercase superscripts in each column indicate significant differences among dietary treatments ($P<0.05$).

显著影响($P>0.05$)。随着同一种淀粉的添加量从 5% 升至 10%，L10 和 X10 组的血清溶菌酶活性显著升高($P<0.05$)，而 Z10 和 M10 组变化不显著($P>0.05$)；L10 和 X10 组的血清蛋白含量升高，而 Z10 和 M10 组降低，其中 Z5 和 Z10 组之间有显著性差异($P<0.05$)；Z10 组的血清补体活性显著降低($P<0.05$)，X10 组的血清补体活性显著升高($P<0.05$)，而 L10 和 M10 组没有显著变化($P>0.05$)。饲料中的淀粉源对实验鱼的血清溶菌酶活性、血清补体活性和呼吸爆发活性的影响显著($P<0.05$)，对血清蛋白含量无显著影响($P>0.05$)。不同的淀粉源在相同的添加量的情况下，M5 组的血清溶菌酶活性显著高于 L5 和 X5 组($P<0.05$)；M5 组的血清蛋白含量高于 L5、Z5 和 X5 组，且与 X5 组差异显著($P<0.05$)；Z5 和 M5 组的血清补体活性显著高于 L5 和 X5 组($P<0.05$)；L10、X10 和 M10 组的血清溶菌酶的活性显著高于 Z10 组($P<0.05$)；L10 和 M10 组的血清蛋白含量显著高于 Z10 组($P<0.05$)；X10 和 M10 组的血清补体活性显著高于 L10 和 Z10 组($P<0.05$)。饲料中淀粉的添加水平和淀粉源对实验鱼的血清溶菌酶活性和血

清补体活性的交互作用显著($P<0.05$)，而对血清蛋白含量和呼吸爆发活性的交互作用不显著($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 饲料添加淀粉的种类和水平对大口黑鲈的生长和营养素利用的影响

已有的研究表明，饲料中碳水化合物的种类与水平对鱼类的生长和营养素的利用均可产生显著的影响^[24]。本研究发现，除了高直链玉米淀粉外，其他淀粉随着添加量从 5% 升至 10%，大口黑鲈的摄食率和特定生长率均下降，但饲料效率和蛋白质效率却上升。摄食率的下降是生长率受到负面影响的主要原因。这一现象在对五条鲈(*Seriola quinqueradiata*)的研究中也被发现^[25]。五条鲈在等氮和等能饲料的投饲实验中，其摄食率随着饲料中的糖脂比的升高而降低。Peres 等^[26]对欧洲海鲈(*Dicentrarchus labrax*)的研究也显示，糊化淀粉部分或完全代替饲料中的生淀粉可显著提高饲料效率，然而糊化淀粉完全代替饲料中的生淀粉导致了生长率显著降低。有研究认为，鱼类摄取了

淀粉含量高、且淀粉的升糖指数也高的饲料所引起的餐后高血糖和高胰岛素血症是导致其食欲下降的生理性原因^[27-28]。另外,本研究推测,高含量的淀粉经糊化后增加了饲料的黏合性,这可能降低了鱼胃肠道的排空速度,从而使摄食量减少,有些营养素的消化吸收与利用率得以提高。本研究若仅依据饲料效率和蛋白质效率作判定(表3),大口黑鲈饲料中添加10%淀粉似乎比5%淀粉更合适,但对生长率的影响是负面的(表2)。

高直链玉米淀粉组的淀粉表观消化率显著低于其他3种淀粉(表4),究其原因,饲料的膨化制粒和制粒后的110℃熟化过程中,部分高直链玉米淀粉分子的双螺旋结构在氢键作用下形成了RS₃抗性淀粉^[29]。RS₃抗性淀粉对淀粉酶有一定的抗性,从而影响了高直链玉米淀粉的消化率^[30]。蜡质玉米淀粉、小麦淀粉和木薯淀粉因支链淀粉含量高,难以形成RS₃抗性淀粉,因此它们的消化率较高。本研究对饲料中抗性淀粉的分析(表1)也显示,高直链玉米淀粉饲料的抗性淀粉含量显著高于其他3种淀粉。因此,RS₃抗性淀粉的形成是造成大口黑鲈对高直链玉米淀粉的表观消化率显著低于其他3种淀粉的根源。

值得一提的是,在饲料中淀粉的添加量均为10%的情况下,高直链玉米淀粉组的大口黑鲈的特定生长率和摄食率显著高于蜡质玉米淀粉、小麦淀粉和木薯淀粉组。可见,饲料中淀粉的种类或其分子的复杂性也对大口黑鲈的生长与代谢产生了显著的影响。饲料中直链与支链淀粉之比对阳光鲈(*Morone chrysops* ♀×*M. saxatilis* ♂)也有类似的影响,饲料中直链与支链淀粉之比为7/3组的阳光鲈的增重率>全支链淀粉组>直链与支链淀粉比为3/7组^[31]。直链淀粉之所以比支链淀粉更适合在大口黑鲈饲料中作为糖源使用,不是因为它有更高的消化吸收率(表4),而是它形成了较多的难以被消化的RS₃抗性淀粉,从而使实验鱼的餐后血糖水平较低(表8)。有研究表明,这类淀粉更适用于人类的非胰岛素缺乏型糖尿病患者^[32]。但到目前为止,关于高直链玉米淀粉对鱼类的营养与代谢影响的研究尚比较少见,还有待今后作更深入的研究。

3.2 饲料添加淀粉的种类和水平对大口黑鲈的体组成的影响

本研究的实验饲料为等氮和等能的设计,以脂肪调节能量饲料的能量平衡。随着饲料中淀粉水平的添加量从5%升至10%,饲料中的脂肪含量相应地减少。伴随着这一变化,全鱼和肌肉的蛋白质含量有降低的趋势(高直链玉米淀粉组例外);水分的含量却有升高的趋势;肝蛋白质含量显著降低;全鱼和肝的脂肪含量显著降低(表5)。这说明,大口黑鲈如同其他肉食性鱼类一样^[2, 33-34],饲料中的糖类对蛋白质的节约作用不如脂肪,同时糖类转化为脂肪的能力也有限。因此,为了获得较佳的大口黑鲈养殖产品的品质,饲料中淀粉与脂肪的比例、淀粉的水平以及淀粉的种类都是重要的影响因素。

3.3 饲料添加淀粉的种类和水平对大口黑鲈的健康的影响

实验鱼的肝体比和肝糖原的含量随着饲料中淀粉的添加量从5%升至10%而显著升高(表6),但是,肝中脂肪的含量并没有因淀粉水平的上升而增加(表5)。徐祥泰等^[35]对实验鱼的肝组织学切片观察进一步得出,肝糖原的积累是导致肝体比升高和肝组织受损的主要原因。Goodwin等^[36]也认为,肝糖原的大量积累导致大口黑鲈的肝产生病变,饲料中碳水化合物水平从27%降至20%有效地降低了大口黑鲈肝中肝糖原的含量,从而降低了肝细胞的空泡率,促进了肝的健康。因此,肝组织学的影响和肝糖原含量应该作为确定饲料中的碳水化合物水平的重要指标^[37]。但Amoah等^[9]研究认为高水平的碳水化合物虽然对大口黑鲈肝的组织学造成了负面影响,但肝糖原含量并未增加。其他学者在实验饲料中含有更高碳水化合物水平(15%~23%)的情况下,也发现大口黑鲈的肝体比因饲料中糖类水平的升高而上升的情形^[11]。对花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[38]和尖吻鲈(*Lates calcarifer*)^[39]的研究也得出肝体比因饲料中糖类水平的增长而增高。因此,大口黑鲈饲料中过高的可消化淀粉诱发了“糖原肝”而不是所谓的“脂肪肝”。

实验鱼的血糖观测显示,随着饲料中淀粉的

添加量从 5%升至 10%, 蜡质玉米淀粉和小麦淀粉组大口黑鲈餐后产生了较高的血糖水平, 且高血糖的持续时间较长(表 8)。对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[40]的研究中也发现, 餐后血糖随着饲料中淀粉水平的提高而升高的情况。对南方鲇(*Silurus meridionalis*)^[41]和大西洋鲑(*Salmo salar* L.)^[42]的研究显示, 实验鱼摄食较低水平淀粉的饲料后更有利于餐后血糖的稳定。由此可见, 大口黑鲈如同其他的肉食性鱼类, 对血糖的调控能力较差。而长期的高血糖又有损于鱼体的健康^[10]。

血液学指标能够在一定程度上反映鱼类的生理和健康状况, 可为动物的病理学研究提供依据^[43]。鱼类的血液红细胞在其呼吸生理方面发挥重要作用, 鱼类的营养和健康状况以及环境因子等因素均不同程度地影响血液的红细胞数和红细胞压积^[44]。本研究中, 随着淀粉的添加量从 5%升至 10%, 实验鱼血液中的红细胞数和红细胞压积均有下降的趋势。苟仕潘等^[10]对大口黑鲈的研究也发现, 随着饲料中可消化淀粉水平的提高, 红细胞数呈降低的趋势。同时, 随着饲料中蜡质玉米淀粉、小麦淀粉和木薯淀粉水平从 5%升至 10%, 实验鱼的血红蛋白含量均降低, 而高直链玉米淀粉组实验鱼的血红蛋白含量却随着淀粉水平的提高而升高。大西洋鲑血液的血红蛋白含量也随着饲料中碳水化合物的增加而降低^[45]。红细胞数、红细胞压积以及血红蛋白的降低, 指示鱼类血液对氧的运送能力降低, 从而影响其正常的生理功能。

与添加 5%的淀粉水平相比, 添加 10%水平的蜡质玉米淀粉、小麦淀粉和木薯淀粉使实验鱼的血清溶菌酶活性和血清补体活性升高, 而高直链玉米淀粉组则降低。Wang 等^[46]对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)的研究表明, 摄食饲料的糖脂比为 5.58 的实验鱼的白细胞数、血浆溶菌酶活性和血浆补体旁路活性显著高于摄食饲料的糖脂比为 1.1 和 1.67 的处理组。然而, 摄食高淀粉饲料的卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)^[47]的血浆溶菌酶活性、血浆补体活性、血浆总蛋白含量和血液白细胞呼吸爆发活性显著降低。本研究中, 随着淀粉的添加量从 5%升至 10%, 实验鱼的头肾白细胞呼吸爆发活性没有显著性变化, 但木薯淀粉组

有升高趋势, 其他三种淀粉组则有降低趋势。仇小洁^[48]研究发现, 饲料中的糖脂比对大口黑鲈的头肾白细胞呼吸爆发活性没有显著性影响。苟仕潘等^[10]对大口黑鲈的研究显示, 饲料中可消化淀粉水平在 5.93%~11.96%范围内未对头肾白细胞呼吸爆发活性产生显著性影响, 超过 11.96%的水平则显著地降低。团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)饲料中的碳水化合物水平在 0~31%范围内也未对血液白细胞呼吸爆发活性产生显著影响, 超过 31%的水平则显著升高^[49]。由此可见, 饲料中的碳水化合物水平对鱼类非特异性免疫指标的影响尚无规律性可循。这有待今后的进一步研究。

4 结论

综上所述, 根据饲料中添加不同的淀粉及其水平对大口黑鲈的摄食、生长、体组成、血液学指标、血糖和非特异性免疫的影响, 本研究得出的结论为, 大口黑鲈饲料中添加 5%的蜡质玉米淀粉、高直链玉米淀粉、小麦淀粉和木薯淀粉均无妨碍, 但添加 10%的淀粉水平唯有高直链玉米淀粉较为合适。

参考文献:

- [1] Wilson R P. Utilization of dietary carbohydrate by fish[J]. Aquaculture, 1994, 124(1-4): 67-80.
- [2] Hemre G I, Mommsen T P, Kroghdahl A. Carbohydrates in fish nutrition: effects on growth, glucose metabolism and hepatic enzymes[J]. Aquac Nutr, 2002, 8(3): 175-194.
- [3] NRC. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp[M]. Washington D C: National Academy Press, 2011.
- [4] Gallant D, Bouchet B, Buleon A, et al. Physical characteristics of starch granules and susceptibility to enzymatic degradation[J]. Eur J Clin Nutr, 1992, 46(suppl. 2): S3-S16.
- [5] Annison G, Topping D L. Nutritional role of resistant starch: chemical structure vs physiological function[J]. Annu Rev Nutr, 1994, 14(1): 297-320.
- [6] Liu X, Zhang H R, Kan J Q, et al. Effect of amylose level in corn starch on intestinal fermentation in rats[J]. Food Science, 2008, 29(2): 398-402. [刘雄, 张焕容, 阚健全, 等. 直链淀粉含量对大鼠肠道发酵产物的影响 [J]. 食品科学, 2008, 29(2): 398-402.]
- [7] Hoover R. Starch retrogradation[J]. Food Rev Int, 1995, 11(2): 331-346.

- [8] Liu X H, Ye C X, Ye J D, et al. Effects of dietary amylose/amylopectin ratio on growth performance, feed utilization, digestive enzymes, and postprandial metabolic responses in juvenile obscure puffer *Takifugu obscurus*[J]. Fish Physiol Biochem, 2014, 40(5): 1423–1436.
- [9] Amoah A, Coyle S D, Webster C D, et al. Effects of graded levels of carbohydrate on growth and survival of largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. J World Aquacult Soc, 2008, 39(3): 397–405.
- [10] Gou S P, Chen N S, Xu X T, et al. Effects of dietary digestible starch levels on growth performance, body composition, and non-specific immunological index of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(10): 1499–1510. [苟仕潘, 陈乃松, 徐祥泰, 等. 饲料中可消化淀粉对大口黑鲈生长体组成和非特异性免疫指标的影响 [J]. 水产学报, 2015, 39(10): 1499–1510.]
- [11] Tan X Y, Liu Y J, Tian L X, et al. The Effects of dietary carbohydrate levels on the growth, nutrient composition of juvenile largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2005, 44(B06): 258–263. [谭肖英, 刘永坚, 田丽霞, 等. 饲料中碳水化合物水平对大口黑鲈 *Micropterus salmoides* 生长, 鱼体营养成分组成的影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(B06): 258–263.]
- [12] Lee S M. Apparent digestibility coefficients of various feed ingredients for juvenile and grower rockfish (*Sebastes schlegeli*)[J]. Aquaculture, 2002, 207(1–2): 79–95.
- [13] Lee C M, Trevino B, Chaiyawat M, et al. A simple and rapid solvent extraction method for determining total lipids in fish tissue[J]. J AOAC int, 1996, 79(2): 487–492.
- [14] Mcclary B V, McNally M, Rossiter P. Measurement of resistant starch by enzymatic digestion in starch and selected plant materials: collaborative study[J]. J AOAC Int, 2002, 85(5): 1103–1111.
- [15] Divakaran S, Obaldo L G, Forster I P. Note on the methods for determination of chromic oxide in shrimp feeds[J]. J Agric Food Chem, 2002, 50(3): 464–467.
- [16] Srivastava S, Pathak P H. Garlic (*Allium sativum*) extract supplementation alters the glycogen deposition in liver and protein metabolism in gonads of female albino rats[J]. Int J Pharm Sci Drug Res, 2012, 4(2): 126–129.
- [17] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Anal Biochem, 1976, 72(1–2): 248–254.
- [18] Arnold J E. Hematology of the sandbar shark, *Carcharhinus plumbeus*: standardization of complete blood count techniques for elasmobranchs[J]. Vet Clin Pathol, 2005, 34(2): 115–123.
- [19] An B Q, Wang F X. Standard Operation Procedure of Laboratory Hematology[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 2007: 16–54. [安邦权, 王凤学. 血液学检验标准操作程序[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2007: 16–54.]
- [20] Sitj-bobadilla A, Mingarro M, Pujalte M J, et al. Immunological and pathological status of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) under different long-term feeding regimes[J]. Aquaculture, 2003, 220(1–4): 707–724.
- [21] Inglis J E, Radziwon K A, Maniero G D. The serum complement system: a simplified laboratory exercise to measure the activity of an important component of the immune system[J]. Adv Physiol Educ, 2008, 32(4): 317–321.
- [22] Chen N S, Ma J Z, Zhou H Y, et al. Assessment of dietary methionine requirement in largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(8): 1244–1253. [陈乃松, 马建忠, 周恒永, 等. 大口黑鲈对饲料中蛋氨酸需求量的评定[J]. 水产学报, 2010, 34(8): 1244–1253.]
- [23] Ai Q H, Mai K S, Zhang L, et al. Effects of dietary β -1,3 glucan on innate immune response of large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea*[J]. Fish Shellfish Immun, 2007, 22(4): 394–402.
- [24] Stone D A J. Dietary carbohydrate utilization by fish[J]. Rev Fish Sci, 2003, 11(4): 337–369.
- [25] Shimeno S, Hosokawa H, Takeda M. Metabolic response of juvenile yellowtail to dietary carbohydrate to lipid ratios[J]. Fish Sci, 1996, 62(6): 945–949.
- [26] Peres H, Oliva-Teles A. Utilization of raw and gelatinized starch by European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles[J]. Aquaculture, 2002, 205(3–4): 287–299.
- [27] Kousoulaki K, Saether B S, Albrektsen S, et al. Review on European sea bass (*Dicentrarchus labrax*, Linnaeus, 1758) nutrition and feed management: a practical guide for optimizing feed formulation and farming protocols[J]. Aquac Nutr, 2015, 21(2): 129–151.
- [28] Le Bail P Y, Rteif G. What hormones may regulate food intake in fish?[J]. Aquat Living Resour, 1997, 10(6): 371–379.
- [29] Hsein-Chih H W, Sarko A. The double-helical molecular structure of crystalline B-amylose[J]. Carbohydr Res, 1978, 61(1): 7–25.
- [30] Jane J L, Robyt J F. Structure studies of amylose-V complexes and retrograded amylose by action of alpha amylases, and a new method for preparing amyloextrins[J]. Carbohydr

- Res, 1984, 132(1): 105–118.
- [31] Rawles S. Effects of amylopectin/amylose starch ratio on growth, body composition and glycemic response of sunshine bass *Morone chrysops* ♀ × *M. saxatilis* ♂[J]. J World Aquacult Soc, 2007, 34(3): 278–288.
- [32] Haralampu S G. Resistant starch—a review of the physical properties and biological impact of RS3[J]. Carbohydr Polym, 2000, 41(3): 285–292.
- [33] Lee S M, Kim K D. Effects of dietary carbohydrate to lipid ratios on growth and body composition of juvenile and grower rockfish, *Sebastes schlegeli*[J]. Aquac Res, 2009, 40(16): 1830–1837.
- [34] Hu Y H, Liu Y J, Tian L X, et al. Optimal dietary carbohydrate to lipid ratio for juvenile yellowfin seabream (*Sparus latus*)[J]. Aquac Nutr, 2007, 13(4): 291–297.
- [35] Xu X T, Chen N S, Liu Z K, et al. Effects of dietary starch sources and levels on liver histology in largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(1): 61–70. [徐祥泰, 陈乃松, 刘子科, 等. 饲料中不同淀粉源及水平对大口黑鲈肝脏组织学的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(1): 61–70.]
- [36] Goodwin A E, Lochmann R T, Tieman D M, et al. Massive hepatic necrosis and nodular regeneration in largemouth bass fed diets high in available carbohydrate[J]. J World Aquacult Soc, 2003, 33(4): 466–477.
- [37] Sink T D, Lochmann R T. Insulin response of largemouth bass to glucose, amino acid, and diet stimulation[J]. N Am J Aquacult, 2007, 69(4): 429–434.
- [38] Dou B S, Liang M Q, Zheng K K, et al. Effects of dietary carbohydrate level on growth, physiology and body composition of Japanese sea bass *Lateolabrax japonicus*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(1): 46–54. [窦兵帅, 梁萌青, 郑珂珂, 等. 饲料中碳水化合物水平对鲈鱼生长、生理状态参数及体组成的影响[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(1): 46–54.]
- [39] Catacutan M R, Coloso R M. Growth of juvenile Asian seabass, *Lates calcarifer*, fed varying carbohydrate and lipid levels[J]. Aquaculture, 1997, 149(1–2): 137–144.
- [40] Brauge C, Medale F, Corraze G. Effect of dietary carbohydrate levels on growth, body composition and glycaemia in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, reared in seawater[J]. Aquaculture, 1994, 123(1–2): 109–120.
- [41] Lin X Z, Luo Y P, Xie X J. Effects of dietary carbohydrate level on glycolytic enzymes and serum glucose concentrations in juvenile southern catfish after feeding[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, 30(3): 304–310. [林小植, 罗毅平, 谢小军. 饲料碳水化合物水平对南方鲈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): 304–310.]
- [42] Hemre G I, Sandnes K, Waagbø R. Blood chemistry and organ nutrient composition in Atlantic salmon, *Salmo salar* L., fed graded amounts of wheat starch[J]. Aquac Nutr, 1995, 1(1): 37–42.
- [43] Wu L F, Qin G X, Liu C L, et al. Effects of dietary soybean protein on the activity of digestive enzyme and blood biochemical parameters of carp[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2009, 37(8): 63–69. [吴莉芳, 秦贵信, 刘春力, 等. 饲料大豆蛋白对鲤鱼消化酶活力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, 2009, 37(8): 63–69.]
- [44] Lin H R. Physiology of Fishes[M]. Guangzhou: Higher Education Press of Guangdong, 1998: 82–107. [林浩然. 鱼类生理学[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1998: 82–107.]
- [45] Waagbø R, Glette J, Sandnes K, et al. Influence of dietary carbohydrate on blood chemistry, immunity and disease resistance in Atlantic salmon, *Salmo salar* L.[J]. J Fish Dis, 1994, 17(3): 245–258.
- [46] Wang L N, Liu W B, Lu K L, et al. Effects of dietary carbohydrate/lipid ratios on non-specific immune responses, oxidative status and liver histology of juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Aquaculture, 2014, 426–427: 41–48.
- [47] Zhou C, Ge X, Lin H, et al. Effect of dietary carbohydrate on non-specific immune response, hepatic antioxidative abilities and disease resistance of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. Fish Shellfish Immun, 2014, 41(2): 183–190.
- [48] Qiu X J. Effects of dietary carbohydrate-to-lipid ratio on growth, body composition, non-specific immunity and hematological parameters of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011. [仇小洁. 饲料中糖脂比对大口黑鲈生长、体组成、非特异性免疫和血液学的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.]
- [49] Zhou C P. Effect of different dietary carbohydrate levels on growth performance, immunity and carbohydrate metabolic enzymes in Wuchang bream (*Megalobrama amblycephala*)[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. [周传朋. 不同水平碳水化合物日粮对团头鲂的生长、免疫及相关糖代谢酶的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.]

Suitable dietary starch source and supplementation level for largemouth bass (*Micropterus salmoides*)

LIU Zike, CHEN Naisong, WANG Mengle, LIAN Xueyuan, YAN Chunwei, YIN Jia

College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Eight iso-nitrogenous and iso-energetic (crude protein, 48% and gross energy, 18.5 MJ/kg) diets (L5, L10, Z5, Z10, X5, X10, M5, and M10) were formulated with 5% and 10% waxy corn starch (L), high-amylose corn starch (Z), wheat starch (X), and cassava starch (M) to determine a suitable starch source and supplementation level for a largemouth bass, *Micropterus salmoides*, diet. Fish (initial body weight, 23.46 g ± 0.19 g) were fed to apparent satiation twice daily for 45 d. The results showed that the supplemented dietary starch level and starch source had significant effects on growth, feed utilization, body composition, and non-specific immunological indices of largemouth bass. Significant decreases in specific growth rate and feed intake were observed with increasing content of the same starch from 5% to 10%. However, feed and protein efficiency increased significantly in the L10, X10, and M10 groups, compared with those in the L5, X5 and M5 groups, whereas no differences were detected in these parameters between the Z5 and Z10 groups. Hepatosomatic index, viscerosomatic index, and liver glycogen concentration increased significantly in the L10, X10, and M10 groups, compared with those in the L5, X5, and M5 groups, but no difference was found in the viscerosomatic index between the Z5 and Z10 groups. Whole-body and liver lipid contents, as well as liver protein content decreased significantly when any of the supplemented starches were increased from 5% to 10% in the diets. Blood erythrocyte count and hematocrit in the L10 group, serum triglyceride content in the Z10 group, and hematocrit and serum triglyceride content in the X10 group decreased significantly, compared with those in the L5, Z5, and X5 groups. Serum 50% hemolytic complement (CH₅₀) activity was significantly lower in the Z10 group than that in the Z5 group. Serum glucose concentrations from 3 to 12 h after a meal in the L5, Z5, X5, and M5 groups were lower than those in the L10, Z10, X10, and M10 groups. Apparent digestibility of the dietary starch and hepatosomatic index were significantly lower in the Z5 group compared with those in the L5, X5, and M5 groups, whereas whole-body lipid deposition rate increased significantly. Apparent digestibility of dietary protein was significantly lower in the M5 group than that in the L5, Z5, and X5 groups. Apparent digestibility of dietary starch, hepatosomatic index, viscerosomatic index, and liver glycogen concentration decreased significantly in the Z10 group compared with those in the L10, X10, and M10 groups, whereas whole-body lipid deposition rate increased significantly. Apparent digestibility of dietary protein was significantly lower in the M10 group than that in the L10, Z10, and X10 groups. Significant interactions were detected between feeding rate, specific growth rate, protein digestion rate, lipid deposition rate, hepatosomatic index, glycogen content, erythrocyte count, serum triglyceride level, and serum CH₅₀ activity between the dietary starch supplementation level and starch source. In conclusion, the starch source and supplementation level in the largemouth bass diet exerted different effects on growth performance, body composition, hematological parameters, non-specific immunological indices, and serum glucose. Adding 10% high-amylose corn starch was the most appropriate supplement in the diet for largemouth bass.

Key words: *Micropterus salmoides*; diet; starch source; adding level; growth performance; non-specific immunity

Corresponding author: CHEN Naisong. E-mail: nschen@shou.edu.cn