

doi: 10.7541/2022.2021.0150

虹鳟幼鱼对不同淀粉的利用

党江雨 蔡友旺 张春燕 曹凯林 李小勤 冷向军

(上海海洋大学水产科学国家级教学示范中心, 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心,
水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 试验旨在考察不同淀粉种类对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)幼鱼生长性能、血清生化指标、肝脏糖代谢酶、肝脏组织学和摄食后血糖含量的影响。选用木薯淀粉、小麦淀粉、豌豆淀粉和玉米淀粉为淀粉源, 设置相同的淀粉水平(15%), 配制4组等氮等脂饲料, 饲喂初始体重(7.7±0.1) g的虹鳟56d。结果表明, 木薯淀粉组增重率最高(1049.3%), 饲料系数最低(0.83)。各组脏体比、肝体比、全鱼和肝脏常规组成无显著差异($P>0.05$); 豌豆淀粉组肝糖原含量显著低于其他组($P<0.05$)。各组血清甘油三酯、总胆固醇、谷草转氨酶和谷丙转氨酶无显著差异($P>0.05$)。木薯淀粉组和小麦淀粉组肝脏己糖激酶活性显著高于豌豆淀粉组和玉米淀粉组($P<0.05$), 玉米淀粉组肝脏磷酸果糖激酶活性显著低于木薯淀粉组和小麦淀粉组($P<0.05$)。摄食后, 各组的血糖含量均在7h达到最高, 木薯淀粉组在摄食后1—7h内的血糖含量显著高于其余3组($P<0.05$)。各组的肝脏组织形态无显著差异。综上, 木薯淀粉较其他3种淀粉更适宜作为虹鳟饲料的淀粉源。

关键词: 淀粉种类; 生长; 糖代谢酶; 血糖; 肝脏组织学; 虹鳟

中图分类号: S965.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2022)08-1197-08



鱼类对糖的利用能力有限^[1], 但是糖类作为一种廉价能量源, 不仅可以降低饲料成本, 而且对于鱼类的生长也有一定的促进作用^[2-4]。对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[5]、大西洋鲑(*Salmo salar*)^[6]、青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)^[7]、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)^[8]和达氏鳾(*Acipenser dabryanus*)^[9]等的研究表明, 淀粉等大分子糖类相较于葡萄糖等小分子糖类对于鱼类的促生长作用更明显, 而且淀粉具有优良的黏合性和可消化性。淀粉由直链淀粉和支链淀粉组成^[10], 来源不同的淀粉, 在结构组成存在差异, 其直/支链淀粉比例不同, 鱼类对其利用程度也不相同^[11-13]。在虹鳟^[14]、罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)^[15]和草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[16]上的研究表明, 这几种鱼类对支链淀粉的利用程度更高, 而条纹杂交鲈(*Morone chrysops*×*M. saxatilis*)^[17]对直链淀粉的利用能力更高。

虹鳟属鲑形目(*Salmoniformes*), 鲑科(*Salmonidae*), 大麻哈鱼属(*Oncorhynchus*), 是世界范围

内广泛养殖的冷水性鱼类。研究表明, 虹鳟对于饲料中碳水化合物的适宜需要量为≤20%^[1]; 在虹鳟对淀粉的利用方面也有一些报道, 例如不同种类淀粉对其消化率的影响^[18]、淀粉和脂肪的比例对其生长等的影响^[19]和不同水平的淀粉和葡萄糖对其糖代谢等的影响^[5]等, 但尚未见虹鳟对不同种类淀粉源利用比较的报道。

本试验分别以木薯淀粉、小麦淀粉、豌豆淀粉和玉米淀粉为淀粉源, 设置相同的淀粉水平, 考察不同种类淀粉对虹鳟生长、鱼体组成、血液生化指标和肝脏糖代谢酶等的影响, 探讨虹鳟饲料适宜的淀粉来源, 为虹鳟高效饲料的配制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与试验饲料

本试验分别以木薯淀粉、小麦淀粉、豌豆淀粉和玉米淀粉为淀粉源, 配制淀粉添加水平为15%的4组等氮等脂饲料。饲料原料经粉碎、过筛

收稿日期: 2021-07-22; 修订日期: 2022-02-15

基金项目: 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心项目(A1-2041-18-0011)资助 [Supported by the Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding (A1-2041-18-0011)]

作者简介: 党江雨(1996—), 男, 硕士研究生; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: 583605269@qq.com

通信作者: 冷向军, 教授; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: xjleng@shou.edu.cn

(60目)后,按配方比例称取原料进行混合,用单螺杆挤压机制成直径为2 mm的沉性颗粒饲料[制粒温度(85±5)℃],制粒后的饲料用烘干机37℃烘至水分含量低于10%(各组保持一致的烘干时间),室温阴凉干燥保存备用。试验饲料的配方组成及营养成分含量见表1。

1.2 试验鱼和饲养管理

试验用虹鳟购自昆明尚浩水产养殖有限公司。试验鱼暂养驯化2周后,饥饿24h,挑选276尾大小均匀,体格健壮的虹鳟(7.7±0.1) g,平均分配到12个自动充气循环水桶内(直径1.0 m,水深0.8 m,水体约为650 L),试验共4个处理组,每组设3个平行,每个平行23尾鱼。养殖期间每天投喂两次(9:00和16:00),日投喂量约为鱼体重的2%—5%,根据水温和虹鳟摄食情况进行适当调整,每次投喂以虹鳟不抢食为宜。每次于投喂2—3h后用虹吸法吸走桶底粪便,每周换水3次,换水量为循环系统的1/3。养殖期间水温12—16℃,溶氧6—7 mg/L, pH 7.24—7.78,氨氮≤0.2 mg/L,亚硝酸盐≤0.1 mg/L。养殖试验于2020年冬季在上海海洋大学滨海养殖基地循环水车间进行,养殖试验共持续56d。

1.3 样品采集

在养殖试验结束后,鱼体饥饿24h,统计每桶中虹鳟数量并称重,计算增重率、饲料系数和成活率。每桶随机取9尾鱼,用MS-222麻醉(100 mg/L),取3尾鱼装袋后于-20℃保存,用于全鱼常规成分的测定;另取3尾鱼,测量体重、体长、内脏重和肝脏重,用经过肝素钠润洗的注射器从尾静脉处采血,3500 r/min离心10min,取血清于-80℃保存;取部分肝脏于波恩固定液中固定,用于组织学观察,剩余肝脏于-20℃保存,用于测定肝糖原含量和肝脏糖代谢酶活性;其余3尾鱼,抽血后(防止解剖时血液污染样品)采集肝脏样本于-20℃保存,用于测定肝脏组成。

在采样结束后,将剩余虹鳟继续投喂3d,使其恢复正常的生理状态。在饥饿24h后,饱食投喂1次,于投喂前(0)及投喂后1h、3h、5h、7h和9h,每桶随机取1尾虹鳟(每处理组每个时间点为3尾鱼),用MS-222麻醉(100 mg/L),使用经肝素钠润洗的注射器从尾静脉处采血,3500 r/min离心10min后取血清,于-80℃保存,进行血糖含量的测定。

1.4 测定指标与方法

生长性能与形体指标 成活率 $SR(\%)=100\times$ 终末尾数(尾)/初始尾数(尾);

增重率 $WGR(\%)=100\times$ [终末体重(g)-初始体重(g)]/初始体重(g);

表1 试验饲料配方组成及营养成分含量(风干基础, g/kg)

Tab. 1 Ingredients and proximate composition of experimental diets (air-dry basis, g/kg)

原料Ingredient ^a (g/kg)	木薯淀粉组Cassava starch	小麦淀粉组Wheat starch	豌豆淀粉组Pea starch	玉米淀粉组Corn starch
鱼粉Fish meal	250.0	250.0	250.0	250.0
豆粕Soybean meal	130.0	130.0	130.0	130.0
大豆浓缩蛋白Soybean protein concentrate	140.0	140.0	140.0	140.0
肉骨粉Meat and bone meal	150.0	150.0	150.0	150.0
啤酒酵母Brewers dried yeast	40.0	40.0	40.0	40.0
木薯淀粉Cassava starch	150.0			
小麦淀粉Wheat starch		150.0		
豌豆淀粉Pea starch			150.0	
玉米淀粉Corn starch				150.0
纤维素Cellulose	49.5	49.5	49.5	49.5
鱼油Fish oil	30.0	30.0	30.0	30.0
豆油Soybean oil	30.0	30.0	30.0	30.0
维生素预混料Vitamin premix ^b	5.0	5.0	5.0	5.0
矿物质预混料Mineral premix ^c	25.0	25.0	25.0	25.0
氧化钇Yttrium oxide	0.5	0.5	0.5	0.5
合计Total	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
常规组成Proximate composition				
粗蛋白质Crude protein	424.1	423.5	422.3	424.6
粗脂肪Crude lipid	97.8	96.4	97.3	97.1
粗灰分Crude ash	133.5	132.1	134.5	133.0
水分Moisture	85.4	84.7	82.9	88.6

注: a. 饲料原料购于浙江粤海饲料有限公司。饲料原料蛋白质含量如下: 鱼粉(678 g/kg); 豆粕(449 g/kg); 大豆浓缩蛋白(631 g/kg); 肉骨粉(560 g/kg); 啤酒酵母(464 g/kg); b. 维生素预混料(mg或IU/kg 饲料): VA 10000 IU; VD₃ 3000 IU; VE 150 IU; VK₃ 12.17 mg; VB₁ 20 mg; VB₂ 20 mg; VB₃ 100 mg; VB₆ 22 mg; VB₁₂ 0.15 mg; VC 1000 mg(35%); 生物素biotin 0.6 mg; 叶酸folic acid 8 mg; 肌醇 inositol 500 mg; c. 矿物质预混料(mg或IU/kg 饲料): I 1.5 mg; Co 0.6 mg; Cu 3 mg; Fe 63 mg; Zn 89 mg; Mn 11.45 mg; Se 0.24 mg; Mg 180 mg; Ca(H₂PO₄)₂·H₂O 20 g

Note: a. The feed ingredients were purchased from Zhejiang Yuehai Feed Co., Ltd. The protein contents of ingredients are as follow: Fish meal (67.8%); Soybean meal (44.9%); Soybean protein concentrate (63.1%); Meat and bone meal (56.0%); Brewers dried yeast (46.4%); b. Vitamin premix (mg or IU/kg diet): vitamin A 10000 IU; vitamin D₃ 3000 IU; vitamin E 150 IU; vitamin K₃ 12.17 mg; vitamin B₁ 20 mg; vitamin B₂ 20 mg; vitamin B₃ 100 mg; vitamin B₆ 22 mg; vitamin B₁₂ 0.15 mg; vitamin C 1000 mg (35%); biotin 0.6 mg; folic acid 8 mg; inositol 500 mg; c. Mineral premix (mg/kg diet): I 1.5 mg; Co 0.6 mg; Cu 3 mg; Fe 63 mg; Zn 89 mg; Mn 11.45 mg; Se 0.24 mg; Mg 180 mg; Ca(H₂PO₄)₂·H₂O 20 g

饲料系数 FCR = 采食量(g)/[终末体重(g)-初始体重(g)];

脏体比 $VSI=100\times$ 内脏重(g)/体重(g);

肝体比 $HSI=100\times$ 肝脏重(g)/体重(g);

肥满度 $CF(g/cm^3)=100\times$ 体重(g)/体长(cm)³;

蛋白质沉积率 $PR(\%)=100\times$ 鱼体蛋白质贮积量/摄入的蛋白质总量;

脂肪沉积率 $LR(\%)=100\times$ 鱼体脂肪贮积量/摄入的脂肪总量。

全鱼、肝脏与饲料组成 全鱼与饲料的水分、粗蛋白含量测定分别采用105℃常压干燥法和凯氏定氮法(2300自动凯氏定氮仪, FOSS, 瑞典), 粗脂肪含量测定采用氯仿-甲醇抽提法, 粗灰分测定采用550℃高温灼烧法。

肝糖原含量测定 将肝脏样本于4℃解冻后, 取0.1 g左右肝脏, 将肝脏与碱液以1:3的体积混合, 在沸水浴中加热20min, 得到水解液, 采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定肝糖原含量。

血清生化指标测定 血清葡萄糖、甘油三酯和总胆固醇含量及谷草转氨酶和谷丙转氨酶活性采用南京建成生物工程研究所的试剂盒和酶标仪(BioTeK Ynergy HTX, 美国)测定。

肝脏糖代谢酶活性的测定 取肝脏样本于4℃解冻, 匀浆, 4℃离心(3000 r/min, 10min), 取上清液用于肝脏己糖激酶(HK)、磷酸果糖激酶(PFK)、丙酮酸激酶(PK)、磷酸烯醇式丙酮酸激酶(PEPCK)和葡萄糖-6-磷酸酶(G6Pase)活性测定。采用南京建成生物工程研究所的试剂盒和酶标仪(BioTeK Ynergy HTX, 美国)测定上述酶活性。

肝脏组织切片 石蜡切片HE染色: 将肝脏样品从固定液中取出, 用不同浓度的酒精、酒精和二甲苯混合液、二甲苯逐级脱水, 之后进行浸蜡、包埋、切片、染色等工作, 染色剂为苏木精-伊红。染色后装片, 待干燥后观察肝脏的组织形态,

并拍照。

1.5 数据处理

试验数据以平均数±标准差表示, 采用SPSS25.0软件进行单因素方差分析, 结果用“平均值±标准误”表示, 其中差异显著者进行Duncan多重比较, 差异显著水平为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 生长性能与形体指标

在养殖过程中, 各组虹鳟存活率均为100%(表2)。木薯淀粉组增重率最高(1049.3%), 饲料系数(0.83)最低; 与木薯淀粉组相比, 小麦淀粉组、豌豆淀粉组和玉米淀粉组的增重率显著降低, 饲料系数显著升高($P<0.05$), 该3组在增重率和饲料系数上无显著差异($P>0.05$)。各组在肥满度、脏体比和肝体比之间也无显著差异($P>0.05$)。

2.2 鱼体、肝脏组成

由表3可见, 各组在全鱼水分、粗蛋白质、粗脂肪和粗灰分含量上均无显著差异($P>0.05$)。在营养物质利用方面, 各组蛋白质和脂肪沉积率无显著差异($P>0.05$)。肝脏水分、粗蛋白质和粗脂肪含量也不受淀粉种类影响($P>0.05$)。豌豆淀粉组肝糖原含量显著低于其余各组($P<0.05$); 木薯淀粉组、小麦淀粉组和玉米淀粉组的肝糖原含量无显著差异($P>0.05$)。

2.3 血清生化指标

由表4可见, 各组血清甘油三酯、总胆固醇含量不受淀粉种类影响, 谷草转氨酶和谷丙转氨酶活性也无显著差异($P>0.05$)。

2.4 肝脏糖代谢酶活性

由表5可见, 各组丙酮酸激酶、葡萄糖-6-磷酸酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶活性均不受淀粉种

表2 饲料淀粉种类对虹鳟生长性能和形体指标的影响

Tab. 2 Effects of dietary starches on growth and morphological indices of rainbow trout

项目Item	木薯淀粉组Cassava starch	小麦淀粉组Wheat starch	豌豆淀粉组Pea starch	玉米淀粉组Corn starch
初始均重IBW (g)	7.7±0.1	7.7±0.1	7.7±0.1	7.7±0.1
终末均重FBW (g)	88.49±1.26 ^a	84.57±1.26 ^b	83.62±2.76 ^b	83.52±2.57 ^b
增重率WGR (%)	1049.3±16.3 ^a	998.2±7.3 ^b	986.0±35.9 ^b	984.7±33.3 ^b
摄食量Feed Intake (g/尾)	67.0±0.8	66.7±0.6	66.2±0.9	65.9±0.4
饲料系数FCR	0.83±0.01 ^b	0.87±0.01 ^a	0.87±0.03 ^a	0.87±0.02 ^a
成活率SR (%)	100	100	100	100
肥满度CF (g/cm ³)	1.47±0.06	1.50±0.10	1.49±0.10	1.46±0.09
脏体比VSI	9.49±1.31	9.37±0.96	9.56±1.49	8.85±0.86
肝体比HSI	1.40±0.31	1.47±0.36	1.36±0.17	1.25±0.20

注: 同行数据肩标不同小写字母表示不同组间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: In the same row, values with different lowercase superscripts indicate significant difference ($P<0.05$). The same applies below

类影响($P>0.05$)。木薯淀粉组和小麦淀粉组己糖激酶活性显著高于豌豆淀粉组和玉米淀粉组($P<0.05$)，磷酸果糖激酶活性显著高于玉米淀粉组($P<0.05$)。

2.5 餐后血糖含量变化

由表 6 和图 1 可见，各组虹鳟在摄食后，血糖含量均呈现先上升后下降的趋势，在摄食后 7h 血糖含量达到最高。木薯淀粉组在摄食后 1—7h 的血糖含量均显著高于其余 3 组($P<0.05$)。摄食 9h 时，各组血糖含量无显著差异($P>0.05$)。从双因素分析来看，餐后时间和淀粉种类均对血糖含量存在显著影响($P<0.05$)，但二者交互作用无显著影响($P>0.05$)。

2.6 肝脏组织学

由图 2 可见，各组肝脏组织形态正常，未出现肝细胞肿胀、空泡化和细胞核位移等现象。

3 讨论

3.1 不同种类淀粉对虹鳟生长性能的影响

淀粉的来源广泛，不同种类的淀粉其直链淀粉和支链淀粉的含量、颗粒大小、分子结构等方面均有不同，直/支链淀粉的比例会影响鱼类对淀粉的利用^[20]。在本试验选用的 4 种淀粉中，木薯淀粉的支链淀粉含量最高。从生长性能来看，木薯淀粉组的鱼体增重率显著高于小麦淀粉组、豌豆淀粉组和玉米淀粉组，饲料系数也最低，这表明虹鳟对支链淀粉含量高的淀粉源有较好的利用效果。在 Preffer 等^[14]的研究中，虹鳟对蜡质玉米淀粉(1%直链淀粉和 99%支链淀粉)的利用能力高于普通玉米淀粉(28%—30%直链淀粉和 70%—72%支链淀粉)，

表 3 饲料淀粉种类对虹鳟全鱼和肝脏组成的影响(鲜重, %)

Tab. 3 Effects of dietary starches on body and liver composition of rainbow trout (fresh weight, %)

项目Item	木薯淀粉组 Cassava starch	小麦淀粉组 Wheat starch	豌豆淀粉 Pea starch	玉米淀粉组 Corn starch
鱼体Body (%)				
水分Moisture	72.50±2.63	73.78±2.89	71.56±2.28	72.48±1.11
粗蛋白Crude protein	16.01±0.94	16.16±1.68	16.43±0.67	16.54±0.52
粗脂肪Crude lipid	6.50±1.02	5.74±1.37	6.93±0.50	6.18±0.24
粗灰分Crude ash	2.29±0.25	2.16±0.21	2.35±0.02	2.42±0.10
蛋白沉积率Protein retention	50.27±3.55	48.48±5.30	49.20±3.54	49.69±2.53
脂肪沉积率Lipid retention	92.82±15.42	78.12±19.10	94.67±9.01	84.37±5.50
肝脏Liver (%)				
水分Moisture	74.23±1.49	74.76±1.19	73.92±0.48	74.30±0.87
粗蛋白Crude protein	16.81±0.92	17.03±0.57	17.26±0.55	17.07±0.73
粗脂肪Crude lipid	3.47±0.22	3.69±0.29	3.52±0.25	3.65±0.33
肝糖原Liver glycogen (mg/g)	10.02±0.64 ^a	9.96±0.02 ^a	9.36±0.26 ^b	10.02±0.55 ^a

表 4 饲料淀粉种类对虹鳟血液生化指标的影响

Tab. 4 Effects of dietary starches on serum biochemical indices of rainbow trout

项目 Item	木薯淀粉组 Cassava starch	小麦淀粉组 Wheat starch	豌豆淀粉组 Pea starch	玉米淀粉组 Corn starch
甘油三酯TG (mmol/L)	1.46±0.20	1.37±0.20	1.42±0.33	1.46±0.17
总胆固醇TCHO (mmol/L)	1.82±0.32	1.85±0.38	1.96±0.26	1.75±0.16
谷草转氨酶GOT (U/mL)	5.10±0.46	5.27±0.50	5.30±0.38	5.23±0.32
谷丙转氨酶GPT (U/mL)	3.34±0.31	3.37±0.24	3.53±0.17	3.41±0.30

表 5 饲料淀粉种类对虹鳟肝脏糖代谢酶活性的影响

Tab. 5 Effects of dietary starches on activities of carbohydrate metabolic enzymes in the liver of rainbow trout (U/mg prot)

项目Item	木薯淀粉组 Cassava starch	小麦淀粉组 Wheat starch	豌豆淀粉组 Pea starch	玉米淀粉组 Corn starch
丙酮酸激酶PK	59.40±2.97	57.71±2.05	55.07±4.89	56.04±3.39
己糖激酶HK	48.10±2.30 ^a	49.13±1.28 ^a	41.39±1.64 ^b	42.32±0.65 ^b
磷酸果糖激酶PFK	28.12±2.07 ^a	28.35±0.30 ^a	26.56±0.44 ^{ab}	25.17±1.18 ^b
葡萄糖-6-磷酸酶G6Pase	39.69±1.24	40.51±2.30	41.40±3.57	37.79±3.91
磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶PEPCK	233.90±15.87	229.81±5.15	226.84±7.08	245.58±10.75

表 6 饲料淀粉种类对虹鳟摄食后血糖含量的影响

Tab. 6 Effects of dietary starches on postprandial serum glucose content of rainbow trout (mmol/L)

时间Time (h)	木薯淀粉组 Cassava starch	小麦淀粉组 Wheat starch	豌豆淀粉组 Pea starch	玉米淀粉组 Corn starch
0	3.43±0.16 ^A	3.08±0.19 ^A	3.30±0.17 ^A	3.31±0.32 ^A
1	6.00±0.62 ^{a, B}	3.90±0.38 ^{b, A}	3.75±0.38 ^{b, A}	4.00±0.37 ^{b, AB}
3	8.15±0.66 ^{a, C}	6.19±1.41 ^{b, B}	5.85±0.96 ^{b, B}	5.83±0.52 ^{b, BC}
5	9.64±0.52 ^{a, D}	7.89±0.42 ^{b, C}	7.34±1.23 ^{b, B}	7.09±1.74 ^{b, CD}
7	10.71±0.83 ^{a, D}	8.45±0.69 ^{b, C}	7.65±1.07 ^{b, B}	8.19±1.21 ^{b, D}
9	7.44±1.03 ^C	6.18±0.63 ^B	6.14±1.36 ^B	6.23±1.55 ^{CD}

双因素分析Two-way ANOVA

餐后时间Time	0.000
淀粉种类Starches	0.000
交互Interaction	0.505

注: 同列数据肩标不同大写字母表示不同时间差异显著($P<0.05$)
Note: values with different capital letter superscripts indicate significant difference among different times ($P<0.05$)

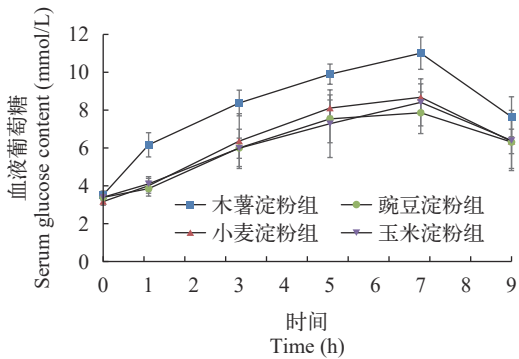


图 1 虹鳟餐后血糖含量变化

Fig. 1 The serum glucose content of rainbow trout after feeding

此外, 在草鱼^[16]和罗非鱼^[21]中也有类似的报道。但在大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)^[22]的研究中, 高直链/支链比的淀粉对鱼类的生长反而有促进作用, 其原因可能是过多的支链淀粉水解造成了摄食后血糖水平过高, 不利于大口黑鲈的正常生长。苟仕潘等^[23]的研究表明, 大口黑鲈[初始体重(28.36±0.10) g]饲料中适宜的可消化淀粉水平为9.22%—10.05%, 而虹鳟[初始体重(28.4±3.2) g]饲料中的适宜淀粉水平分别为18%(15%粗脂肪)和27%(18%粗脂肪)^[19], 可见, 虹鳟较大口黑鲈更能耐受高糖。

在本试验中, 各组肝脏组织学无显著差异, 表明在15%的淀粉水平下, 肝脏均处于正常生理状态, 但豌豆淀粉组肝糖原含量显著低于其余3个试验组, 原因可能是豌豆淀粉的直链淀粉含量高, 直链淀粉不易被消化分解, 从而降低了糖原在肝脏中的积累, 这与Song等^[24]和徐祥泰等^[25]在大口黑鲈上的研究结果类似。

3.2 不同种类淀粉对虹鳟鱼体组成和血液生化指标的影响

在本试验中, 各试验组在全鱼和肝脏常规营养

组成方面没有显著差异, 并且血液的总胆固醇和甘油三酯含量也不受淀粉种类影响, 而这两个指标代表着鱼类脂肪代谢情况, 表明不同种类的淀粉对蛋白质和脂肪的转化利用没有产生显著影响。任鸣春^[5]采用小麦淀粉、木薯淀粉和玉米淀粉3种糊化淀粉源饲喂军曹鱼(*Rachycentron canadum*), 对全鱼组成也未产生显著影响; Song等^[24]采用小麦淀粉、豌豆淀粉、木薯淀粉和高直链玉米淀粉为淀粉源饲喂大口黑鲈, 各组全鱼组成之间也无显著差异。

谷草转氨酶和谷丙转氨酶是反映肝功能的重要指标, 当肝脏受损时, 肝脏中的这两种酶会释放到血液中, 从而使血液中两种酶活性升高。在本试验中, 各试验组血液中的谷草转氨酶和谷丙转氨酶活性没有显著差异, 在解剖过程中, 各处理组的肝脏从外观上也没有发现明显差异。

3.3 不同种类淀粉对虹鳟糖代谢酶和餐后血糖水平的影响

本试验测定了己糖激酶(HK)、磷酸果糖激酶(PFK)、丙酮酸激酶(PK)、磷酸烯醇式丙酮酸激酶(PEPCK)和葡萄糖-6-磷酸酶(G6Pase)的酶活性, 前3种酶属于糖酵解途径, 后两种酶存在于糖异生途径。HK是糖酵解途径的第一个限速酶。在本试验中, 木薯淀粉组HK活性显著高于豌豆淀粉组和玉米淀粉组, PFK活性显著高于玉米淀粉组, 并且餐后1—7h的血糖含量也显著高于其余3组, 表明较高的血糖水平对HK和PFK产生了诱导, 使其活性增加。小麦淀粉组的血糖水平并不高, 但HK和PFK活性较高, 其原因尚不清楚, 有待进一步研究。PK是糖酵解最后一步的限速酶, 在本试验中, 各组PK活性不受淀粉种类影响, 说明其无法响应较高的血糖水平, Panserat等^[26]曾报道, 虹鳟在摄食

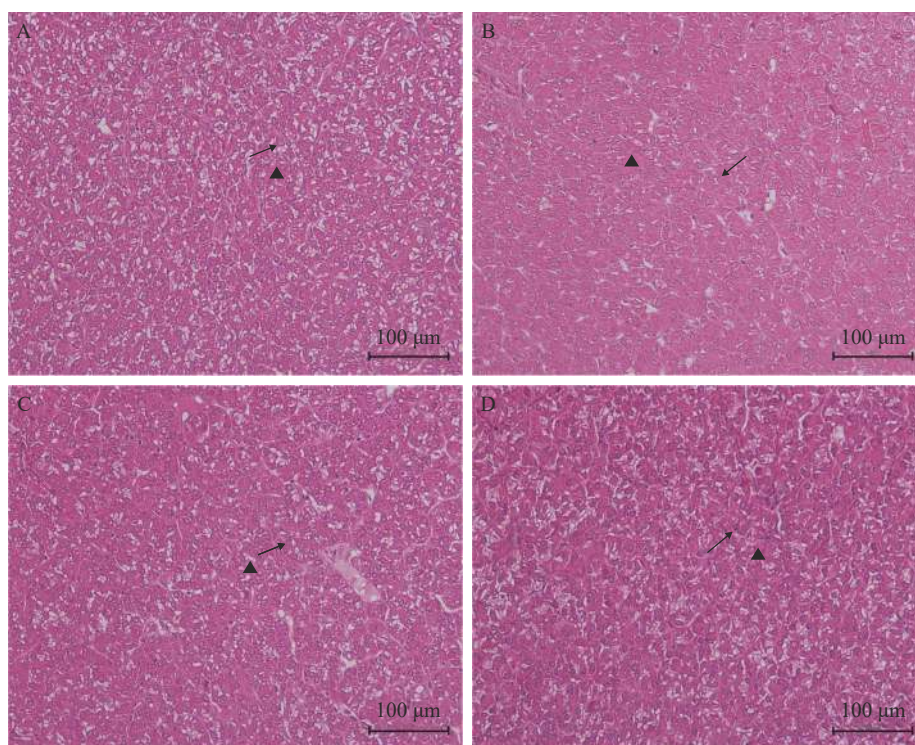


图2 虹鳟肝脏组织切片

Fig. 2 Tissue slices of rainbow trout liver (200×)

A. 木薯淀粉组; B. 小麦淀粉组; C. 豌豆淀粉组; D. 玉米淀粉组。“→”示细胞核,“▲”示细胞质
A. Cassava starch; B. Wheat starch; C. Pea starch; D. Corn starch.“→”nucleus “▲”cytoplasm

不含糖与含糖饲料后6h和24h,其PK基因表达均无显著差异。但在欧洲海鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[27]的研究表明,饲料糖水平能够调控PK的活性,这可能是鱼的种类和糖的种类不同造成的。PEPCK和G6Pase是糖异生途径的代谢酶,有研究发现^[26],虹鳟在摄食含糖和不含糖的饲料后,其肝脏中PEPCK基因表达量均无变化,说明饲料中的糖对其没有显著影响;饲料中糖种类对欧洲海鲈^[28]G6Pase活力也无显著影响。在本试验中,各组PEPCK和G6Pase活性差异不显著,说明这两种酶活性不受淀粉种类的影响。

有研究表明,当海鲷(*Sparus aurata*)^[29]和暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*)^[30]长期处于高血糖状态时,会导致肝糖原异常积累,对鱼类的生长不利,在本试验中,木薯淀粉组虹鳟的餐后1—7h血糖高于其余3个淀粉组,但在9h后,各组并无显著差异,木薯淀粉组在摄食表现和肝脏健康上都与其他各组无显著差异,且生长性能最好,这可能是虹鳟对糖的利用性和耐受性较高的缘故。Bergot^[31]的研究表明,摄食含30%葡萄糖组饲料虹鳟增重率、饲料效率和蛋白质效率高于15%葡萄糖组,也表明了在其耐受范围内,较高水平的糖类可能有利于提高虹鳟的生长和饲料利用。

4 结论

在15%的淀粉水平下,综合考虑增重率、血液生化指标、糖代谢酶和肝脏组织学等指标,木薯淀粉较小麦淀粉、豌豆淀粉和玉米淀粉更适宜作为虹鳟饲料的淀粉来源。

参考文献:

- [1] Wilson R P. Utilization of dietary carbohydrate by fish [J]. *Aquaculture*, 1994, **124**(1-4): 67-80.
- [2] Stone D A J. Dietary carbohydrate utilization by fish [J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2003, **11**(4): 337-369.
- [3] Fan Z, Li J H, Wang A Q, *et al.* Effects of dietary cassava starch supplemental level on growth performance, digestive ability and glycometabolism of common carp [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, **28**(12): 4044-4053. [范泽, 李静辉, 王安琪, 等. 饲料中木薯淀粉添加水平对鲤生长性能、消化能力及糖代谢的影响 [J]. *动物营养学报*, 2016, **28**(12): 4044-4053.]
- [4] 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. [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.]

- [5] Ren M C. Studies on nutritional physiology of carbohydrate for cobia and rainbow trout [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 22. [任鸣春. 军曹鱼和虹鳟糖类营养生理研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 22.]
- [6] Arnesen P, Krogdahl A, Sundby A. Nutrient digestibilities, weight gain and plasma and liver levels of carbohydrate in Atlantic salmon (*Salmo salar*, L.) fed diets containing oats and maize [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1995, 1(3): 151-158.
- [7] 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. [蔡春芳, 王永玲, 陈立侨, 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.]
- [8] 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. [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.]
- [9] 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. [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.]
- [10] Tester R F, Karkalas J, Qi X. Starch-composition, fine structure and architecture [J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 39(2): 151-165.
- [11] Gominho-Rosa M D C, 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.
- [12] Liu X H. Studies on nutritional physiology of carbohydrate for *Takifugu obscurus* [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2014: 20. [刘襄河. 暗纹东方鲀幼鱼糖类营养生理研究 [D]. 广州: 华南师范大学, 2014: 20.]
- [13] Kumar S, Sahu N P, Pal A K, et al. Metabolic fitness and growth performance in tropical freshwater fish *Labeo rohita* are modulated in response to dietary starch type (gelatinized versus non-gelatinized) and water temperature [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2016, 22(5): 966-975.
- [14] Pfeffer E, Beckmann-Toussaint J, Henrichfreise B, et al. Effect of extrusion on efficiency of utilization of maize starch by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 1991, 96(3-4): 293-303.
- [15] Li H Z. Effects of dietary starch structure on growth, feed utilization and blood metabolism of tilapia [J]. *China Feed*, 2020(20): 72-75. [李贺珍. 日粮淀粉结构对罗非鱼生长、饲料利用及血液代谢的影响 [J]. 中国饲料, 2020(20): 72-75.]
- [16] Pan H X. The effects of different starchin expanded feeds on growth and biochemical indexes of large scale grass carp [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016: 18-24. [潘化祥. 不同淀粉源膨化饲料对大规模草鱼生长和生化指标的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016: 18-24.]
- [17] Rawles S, Lochmann R. Effects of amylopectin/amylose starch ratio on growth, body composition and glycemic response of sunshine bass *Morone chrysops* × *M. saxatilis* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2003, 34(3): 278-288.
- [18] Bergot F. Digestibility of native starches of various botanical origins by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Fish Nutrition in Practice*, 1993: 857-865.
- [19] Yamamoto T, Konishi K, Shima T, et al. Influence of dietary fat and carbohydrate levels on growth and body composition of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* under self-feeding conditions [J]. *Fisheries Science*, 2001, 67(2): 221-227.
- [20] Gaylord T G, Barrows F T, Rawles S D, et al. Apparent digestibility of nutrients and energy in extruded diets from cultivars of barley and wheat selected for nutritional quality in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2009, 15(3): 306-312.
- [21] Chen M Y, Ye J D, Yang W, et al. Growth, feed utilization and blood metabolic responses to different amylose-amylopectin ratio fed diets in tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2013, 26(8): 1160-1171.
- [22] Li S, Sang C, Turchini G M, et al. Starch in aquafeeds: the benefits of a high amylose to amylopectin ratio and resistant starch content in diets for the carnivorous fish, largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *British Journal of Nutrition*, 2020, 124(11): 1145-1155.
- [23] 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.]
- [24] Song M Q, Shi C M, Lin S M, et al. Effect of starch sources on growth, hepatic glucose metabolism and antioxidant capacity in juvenile largemouth bass, *Micropte-*

- rus salmoides* [J]. *Aquaculture*, 2018(490): 355-361.
- [25] 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.]
- [26] Panserat S, Plagnes-Juan E, Br  que J, *et al.* Hepatic phosphoenolpyruvate carboxykinase gene expression is not repressed by dietary carbohydrates in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(Pt 2): 359-365.
- [27] Enes P, Panserat S, Kaushik S, *et al.* Effect of normal and waxy maize starch on growth, food utilization and hepatic glucose metabolism in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2006, **143**(1): 89-96.
- [28] Enes P, Panserat S, Kaushik S, *et al.* Rapid metabolic adaptation in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles fed different carbohydrate sources after heat shock stress [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A Molecular & Integrative Physiology*, 2006, **145**(1): 73-81.
- [29] Couto A, Peres H, Oliva-Teles A, *et al.* Screening of nutrient digestibility, glycaemic response and gut morphology alterations in gilthead seabream (*Sparus aurata*) fed whole cereal meals [J]. *Aquaculture*, 2016(450): 31-37.
- [30] 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 Physiology and Biochemistry*, 2014, **40**(5): 1423-1436.
- [31] Bergot F. Effects of dietary carbohydrates and of their mode of distribution on glycaemia in rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A Physiology*, 1979, **64**(4): 543-547.

DIFFERENT EFFECTS OF VARIOUS DIETARY STARCHES ON THE GROWTH AND METABOLISM OF RAINBOW TROUT JUVENILES

DANG Jiang-Yu, CAI You-Wang, ZHANG Chun-Yan, CAO Kai-Lin, LI Xiao-Qin and LENG Xiang-Jun

(Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition (CREEFN) of the Ministry of Agriculture, National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To investigate the effects of various starches on the growth, serum biochemical indices, and metabolism of rainbow trout juveniles, cassava starch, wheat starch, pea starch and corn starch were included in diets at the same level of 15% to form four isonitrogenous and isolipidic diets to feed rainbow trout with an initial body weight of (7.7±0.1) g for 56 days. The results showed that the cassava starch group had the highest weight gain (1049.3%) and the lowest feed coefficient ratio (0.83). There were no significant difference in viscera-body ratio, liver-body ratio, and proximate composition of whole body and liver among all the groups ($P>0.05$). The liver glycogen content of pea starch group was significantly lower than that of other groups ($P<0.05$). There were no significant differences in serum triglycerides, total cholesterol, aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase activity among all the groups ($P>0.05$). The liver hexokinase activity of cassava starch and wheat starch groups was significantly higher than that of pea starch and corn starch groups ($P<0.05$), and the liver phosphofructokinase activity in corn starch group was significantly lower than that in cassava starch and wheat starch groups ($P<0.05$). Serum glucose content reached to the highest value at the 7th hour in all groups, and cassava starch group showed significantly higher serum glucose content than the other three groups from the 1h to 7h ($P<0.05$). No significant difference in liver tissue morphology was observed among all the groups. In conclusion, cassava starch is a suitable starch source for rainbow trout juveniles.

Key words: Starch types; Growth; Carbohydrate metabolic enzymes; Serum glucose; Hepatic histology; *Oncorhynchus mykiss*