

饲料糖水平对不同食性鱼类生长及葡萄糖耐受能力的影响

刘泓宇¹, 毛义波¹, 谭北平^{1*}, 董晓慧¹, 杨奇慧¹, 迟淑艳¹, 章 双¹, 陈立侨²

(1. 广东海洋大学水产动物营养与饲料实验室, 广东 湛江 524088;

2. 华东师范大学生命科学院水生动物营养与环境健康实验室, 上海 200241)

摘要: 为研究饲料糖水平对不同食性鱼类生长、血浆生化指标、肝/肌糖原的影响及葡萄糖耐受能力的影响, 本实验以不同食性的吉富罗非鱼、卵形鲳鲹和军曹鱼为研究对象, 以糊精为糖源, 3 种鱼各设置低、中、高 (C_L 、 C_M 、 C_H ; 吉富罗非鱼:20%、30%、40%; 卵形鲳鲹:13%、26%、39%; 军曹鱼:12%、24%、36%) 3 个不同饲料糖添加水平, 依次进行 8 周的饲养实验并进行葡萄糖注射实验。结果显示: 饲料中不同糖水平对吉富罗非鱼成活率没有显著影响 ($P > 0.05$); 饲料系数随饲料糖水平的升高呈现先下降后升高趋势, 以 C_L 组最高 ($P < 0.05$); 增重率与特定生长率最高值均出现在 C_H 组中, 显著高于 C_L 组 ($P < 0.05$)。卵形鲳鲹和军曹鱼 C_H 组存活率均显著低于其他各组 ($P < 0.05$); 而增重率与特定生长率则均为 C_M 组显著最高 ($P < 0.05$); 3 种鱼饲料系数随着饲料糖水平的升高呈现先下降后升高趋势, 均以 C_M 组最低, 分别为 1.47 (吉富罗非)、1.61 (卵形鲳鲹) 和 1.49 (军曹鱼)。饲料中不同糖水平对不同食性鱼类糖代谢相关生化指标有不同程度的影响。随着饲料中糖水平的上升, 罗非鱼 C_H 组糖代谢指标均显著高于其他各组 ($P < 0.05$)。卵形鲳鲹和军曹鱼 C_H 组血糖、胰岛素、肝/肌糖原、甘油三酯均为最高; 军曹鱼 C_H 组肝/肌糖原和甘油三酯均显著高于其他各组 ($P < 0.05$)。葡萄糖耐受实验结果显示注射葡萄糖后: ① 卵形鲳鲹组和罗非鱼组在 1 h 血糖水平达峰值 ($P < 0.05$), 并且均在 12 h 恢复到注射前水平; 而军曹鱼组在 3 h 达血糖峰值后直至 24 h 才回到注射前水平。② 军曹鱼组与罗非鱼组血浆胰岛素水平缓慢上升, 至 3 h 达最高水平 ($P < 0.05$), 而卵形鲳鲹组在 1 h 内显著下降 ($P < 0.05$)。③ 卵形鲳鲹组与罗非鱼组肝糖原水平缓慢上升, 分别在 3、6 h 达峰值 ($P < 0.05$), 而军曹鱼组在 1 h 内呈下降趋势。④ 罗非鱼组与卵形鲳鲹组甘油三酯水平分别在 3、6 h 达峰值 ($P < 0.05$), 而军曹鱼组在 1 h 内显著下降 ($P < 0.05$)。本研究表明, 饲料糖水平对 3 种食性鱼类生长、糖代谢生化指标、葡萄糖利用和耐受能力具有不同程度的影响, 杂食性罗非鱼可比肉食性鱼类更好地利用膳食糖物质。葡萄糖耐受能力则以杂食性吉富罗非鱼为最强, 卵形鲳鲹次之, 军曹鱼葡萄糖耐受能力最低。

关键词: 饲料糖; 食性; 鱼类; 生长; 葡萄糖耐量

中图分类号: S 963

文献标志码: A

随着海水养殖的迅速发展, 鱼粉、鱼油资源短缺的问题日益严重, 推动了高鱼粉、高蛋白饲料成本不断上涨, 同时高蛋白饲料又往往会产生大量的氨氮、亚硝酸盐, 导致环境恶化, 养殖风险升高。糖类作为一类广泛分布的营养元素资源, 在人体

内或在动物体内都起着相当重要的作用。在水产养殖中, 糖类可以作为一种廉价的能源物质添加到鱼类的配合饲料中, 发挥碳水化合物的蛋白质节约效应^[1], 不但可降低饲料的成本, 还可活化氨基酸促进鱼类生长等。而海洋养殖经济鱼类对

收稿日期:2015-02-27 修回日期:2015-07-30

资助项目:国家自然科学基金(31272673); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2014CB138603); 国家公益性行业(农业)专项(201003020); 广东省珠江学者基金(GDUPS 2011); 广东省自然科学基金(S2013010016511); 广东海洋大学创新强校工程项目(GDOU201505206)

通信作者:谭北平, E-mail: bptan@126.com

糖类的利用率相对低下,从而限制了糖类在海水养殖中的进一步广泛应用。而鱼类对糖类的利用能力及对葡萄糖的耐受能力一直是鱼类营养学的重要研究内容与方向。

与哺乳动物和鸟类相比,鱼类尤其是肉食性海洋鱼类对糖类利用能力较低。Hemre^[2]对鲑(*Salmo salar*)的研究表明,低糖水平饲料容易被动物利用。Furuichi^[3]等用部分可消化糖类来代替部分蛋白质时,发现其对鱼的生长有一定的影响。而 Brauge^[4]等报道投喂高糖等氮等能饲料对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的生长没有显著影响。同时,大量研究也表明不同食性海洋鱼类的葡萄糖耐受能力存在较大差异。如美洲鳗鲡(*Anguilla rostrata*)和黑鲟(*Ameiurus melas*)按 250 mg/kg体质量的剂量注射葡萄糖溶液 1 h 后血糖就恢复到注射前水平,但虹鳟在 6 h 后才恢复到注射前水平^[5]。对金头鲷(*Sparus aurata*)和舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)静脉注射相同剂量的葡萄糖后发现,舌齿鲈的血糖水平升幅明显低于金头鲷^[6]。Furuichi 等^[3]对鲤(*Cyprinus carpio*)、真鲷(*Pagrus major*)和五条鲷(*Seriola quinqueradiata*)的研究显示,3种鱼的血糖水平升幅以五条鲷最大,而真鲷、鲤的血糖水平升幅较为和缓。Legate 等^[7]也报道,杂食性的黑鲟较之肉食性的虹鳟和美洲鳗,其对糖的耐受能力要强得多,而美洲鳗和虹鳟相比较,虹鳟又高于美洲鳗,这说明鱼类对葡萄糖的利用存在着种类差异性。但迄今为止,对于我国不同食性的主要养殖鱼类糖利用能力的比较研究还未见系统报道。

吉富罗非鱼(GIFT, *Oreochromis niloticus*)同样具有生长快、肉质好、营养丰富等特点,目前在广东、广西、海南等地咸海水养殖已取得普遍成功,具有广阔的市场前景^[8]。卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)俗名金鲳,营养丰富而且生长快速,具有较高的市场价值,逐渐成为我国热带地区深水网箱的主养品种^[9]。军曹鱼(*Rachycentron canadum*)是我国乃至世界著名海产鱼类,为凶猛肉食性鱼类,其肉质佳,生长快以及对环境适应能力较强,具有较高的营养价值、药用价值和巨大的离岸海水养殖潜力^[10]。本实验以杂食性吉富罗非鱼、温和肉食性卵形鲳鲹和凶猛肉食性军曹鱼为研究对象,研究不同糖水平饲料对不同食性鱼类生长及葡萄糖耐受能力的影

响,旨在探索比较不同食性鱼类对葡萄糖的耐受生理反应,从而为研制不同食性海水经济鱼类的配合饲料、开发饲料资源、维持水产养殖业健康可持续发展提供科学的基础依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料及饲养管理

实验用军曹鱼、卵形鲳鲹和吉富罗非鱼从广东湛江南三岛深水抗风浪网箱养殖基地购买。暂养期结束后挑选健康的、规格均一的个体作为实验用鱼并进行分组。实验饲料以白鱼粉为蛋白源,鱼油和大豆磷脂油为脂肪源,糊精为糖源,3种鱼各设置3个处理,分低、中、高(C_L 、 C_M 、 C_H)不同添加水平(中水平糖处理组以各种鱼的糖最适添加量:吉富罗非30%、卵形鲳鲹26%、军曹鱼24%为宜,高低水平依次设置)等氮等能(吉富罗非鱼:粗蛋白35%、总能13.8 KJ;卵形鲳鲹:粗蛋白42%、总能16.0 KJ;军曹鱼:粗蛋白45%、总能16.9 KJ,见表1)。饲料原料经粉碎过60目筛,用F-26双螺杆挤压机(华南理工大学,广州)制粒,分别制成3~4 mm粒径。饲料晾干后用封口袋分装好于-20℃冰柜中贮存待用。每个处理组设置3个重复,每个重复放养鱼20尾。实验在室外浅海网箱进行,天然海水流水养殖。每天分别在09:00和16:00按饱食量投喂。养殖网箱大小为1.2 m×1.4 m×2.5 m,每两周清洗一次,养殖实验持续8周。实验期间水温在26~33℃,盐度在21~23,pH值为7.6~8.2,溶解氧高于6.0 mg/L。

1.2 葡萄糖耐量实验

饲养实验结束后,分别取3种鱼 C_M 组进行葡萄糖耐量实验。实验动物在广东海洋大学东海岛海洋生物研究基地室内500 L玻璃纤维钢桶中流水养殖,暂养1 W,每天继续用 C_M 组饲料饱食投喂2次。水温控制在28~31℃,盐度26~28,pH 7.8~8.2,溶解氧含量 ≥ 6.5 mg/L。正式实验前饥饿24 h,然后分别进行葡萄糖耐量实验。每处理组设置3个重复,每桶共取14尾鱼,每2尾鱼作为一个时间点实验样本,从玻璃钢桶中逐条捞取实验鱼,然后用丁香油酚轻度麻醉,迅速称重,并按活体质量腹腔注射葡萄糖(30 mg/100 g体质量,生理盐水配制),接着放入准备好的空桶中。注射时,注射器吸满葡萄糖溶液,小心将注射

针沿着实验鱼腹部呈 45 度斜角斜插入鱼体内(避免接触内脏器官),然后缓慢注入相应体积的葡萄糖溶液。实验鱼在 120 min 内注射完毕。注射前从实验鱼中随机捞取 2 尾鱼依次注射相应体积的生理盐水作为 0 时刻处理^[11]。

1.3 样品采集

采样时从每个玻璃钢桶逐尾捞取实验鱼,麻醉后用经过 7% 肝素钠溶液润湿的 2 mL 注射器从尾部静脉抽血,于注射前(0 h)以及注射后 1、3、6、12、24 和 48 h 分别在每时刻点每桶中随机取 2 尾鱼的血液、肝脏和肌肉样品分别进行混合后合并为一个样本。血样采集完 15 min 内置 4 000 r/min 离心 10 min,然后收集血浆。采血结束后将实验鱼放在洁净的托盘内解剖,迅速将肝脏和肌肉装进冻存管并储存于液氮,或 -80 °C 超低温保存待测。

1.4 指标测定

血糖、血浆甘油三酯采用全自动生化分析仪(7020 型,Hitachi,日本)进行测定。血浆胰岛素委托广东医学院直接采用放射免疫法测定(放射免疫技术仪:SN-684,上海核所日环光电仪器有限公司),试剂盒由天津九鼎医学生物工程有限公司生产。肝糖原、肌糖原采用碱消化法测定,试剂盒由南京建成生物工程研究所生产(货号:A043),所有实验试剂的配制、样品前处理以及注意事项严格按照试剂盒操作说明书进行。

1.5 相关指标计算

成活率(SR)、增重率(WGR)、特定生长率(SGR)及饲料系数(FCR)计算公式如下:

成活率(survival rate SR) = 实验终尾数/实验初尾数) × 100% ;

增重率(weight gain rate WGR) = [(平均终体质量 - 平均初体质量)/平均初重] × 100% ;

特定生长率(specific growth rate SGR) = [(ln 平均终体质量 - ln 平均初体质量)/饲养时间] × 100% ;

饲料系数(feed conversion rate FCR) = 摄入饲料量/(终末体质量 - 初始体质量 + 死亡体质量);

1.6 数据统计分析

实验数据采用 SPSS 17.0 统计软件对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),如有显著性差异($P < 0.05$),则进行 Duncan 氏多重比

较。实验数据用平均数 ± 标准差(mean ± SD)表示。

2 结果与分析

2.1 饲料糖水平对三种不同食性鱼类生长及饲料利用的影响

经过 8 周的生长实验,饲料中不同糖水平对吉富罗非鱼成活率没有显著影响($P > 0.05$)(表 2);饲料系数随饲料糖水平的升高呈现先下降后升高趋势,以 C_L 组最高($P < 0.05$);增重率与特定生长率最高值均出现在 C_H 组中,显著高于 C_L 组($P < 0.05$)。卵形鲳鲹和军曹鱼 C_H 组存活率均显著低于其他各组($P < 0.05$);而增重率与特定生长率则均为 C_M 组显著最高($P < 0.05$);饲料系数随着饲料糖水平的升高呈现不同程度的先下降后升高趋势,均以 C_M 组最低。

2.2 饲料糖水平对三种不同食性鱼类糖代谢相关生化指标的影响

8 周的养殖实验显示,饲料中不同糖水平对不同食性鱼类糖代谢相关生化指标有不同程度的影响。随着饲料中糖水平的上升,罗非鱼 C_H 组血糖、胰岛素、肝/肌糖原、甘油三酯均显著高于其他各组($P < 0.05$),但 C_L 和 C_M 组肌糖原和甘油三酯没有显著差异($P > 0.05$)(表 3)。卵形鲳鲹和军曹鱼 C_H 组血糖、胰岛素、肝/肌糖原、甘油三酯均为最高,但卵形鲳鲹 C_L 和 C_M 组血糖和胰岛素没有显著差异($P > 0.05$), C_M 和 C_H 组肌糖原和甘油三酯没有显著差异($P > 0.05$);军曹鱼 C_M 和 C_H 组血糖及胰岛素含量没有显著差异($P > 0.05$),但 C_H 组肝/肌糖原和甘油三酯均显著高于其他各组($P < 0.05$)。

2.3 注射葡萄糖对不同食性鱼类血糖含量的影响

在注射葡萄糖后,3 种鱼血糖在短时间内都有大幅度提升(图 1)。罗非鱼组和卵形鲳鲹组在注射葡萄糖 1 h 后血糖水平即达峰值($P < 0.05$),并且均在 12 h 恢复到注射前水平;而军曹鱼组则在 3 h 达血糖峰值后直至 24 h 才恢复到注射前水平;罗非鱼血糖峰值浓度显著高于其他 2 组($P < 0.05$)。

2.4 注射葡萄糖对不同食性鱼类血浆胰岛素含量的影响

军曹鱼组与罗非鱼组在注射葡萄糖后血浆胰

表 1 吉富罗非鱼、卵形鲳鲹和军曹鱼实验饲料配方表(干重)

Tab. 1 Formulation and proximate composition of *Tilapia*, *Derbio* and *Cobia*'s experimental diets (dry matter) %

原料 ingredients	罗非鱼 <i>O. niloticus</i>			卵形鲳鲹 <i>T. ovatus</i>			军曹鱼 <i>R. canadum</i>		
	C _L	C _M	C _H	C _L	C _M	C _H	C _L	C _M	C _H
白鱼粉 fish meal (CP:65%)	21	21	21	32	32	32	22	22	22
酪蛋白 casein	17	17	17	20	20	20	20	20	20
小麦谷朊粉 vital wheat gluten	4	4	4	3	3	3	15	15	15
糊精 dextrin	20	30	40	13	26	39	12	24	36
鱼油 fish oil	8.76	4.41	0.06	11.9	6.34	0.69	13.80	8.19	2.48
大豆磷脂油 soybean lecithin	2	2	2	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
维生素预混料 vitamin ¹	0.1	0.1	0.1	0.30	0.30	0.30	0.60	0.60	0.60
矿物质预混料 minerals ²	0.5	0.5	0.5	0.70	0.70	0.70	0.60	0.60	0.60
维生素 C 磷酸酯 vitamin C	4	4	4	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10
氯化胆碱 choline chloride	1.5	1.5	1.5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
乙氧基喹啉 ethoxyquin	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
诱食剂 attractant	0.1	0.1	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
磷酸二氢钙 CaH ₂ PO ₄	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:1)每千克维生素预混料含有:维生素 A 10 g,维生素 D₃ 50 g,维生素 E 99 g,维生素 K 5.0 g,维生素 B₁ 25.50 g,维生素 B₂ 25 g,维生素 B₆ 50 g,维生素 B₁₂ 0.1 g,泛酸钙 61 g,烟酸 101 g,生物素 25 g,肌醇 153.06 g,叶酸 6.25 g,纤维素 389.09 g.2)每千克矿物质预混料含有:碘酸钾 0.03 g,氯化钴 4.07 g,硫酸铜 19.84 g,柠檬酸铁 13.71 g,硫酸锌 28.28 g,硫酸镁 0.12 g,磷酸二氢钙 80 g,硫酸镁 12.43 g,氯化钾 15.33 g,亚硒酸钠 2 g,沸石粉 824.19 g

Notes:1) Vitamin premix (g/kg): Vitamin A 10 g, Vitamin D₃ 50 g, Vitamin E 99 g, Vitamin K 5.0 g, Vitamin B₁ 25.50 g, Vitamin B₂ 25 g, Vitamin B₆ 50 g, Vitamin B₁₂ 0.1 g, Ca-Pantothenate 61 g, Nicotinic acids 101 g, biotin 25 g, inositol 153.06 g, folic acid 6.25 g, cellulose 389.09 g.2) Vitamin premix (g/kg): KIO₄ 0.03 g, CoCl₂·6H₂O 4.07 g, CuSO₄·5H₂O 19.84 g, ferric citrate 13.71 g, ZnSO₄·7H₂O 28.28 g, MgSO₄·7H₂O 0.12 g, Ca(H₂PO₄)₂ 80 g, MgSO₄·H₂O 12.43 g, KCl 15.33 g, Na₂SeO₃ 2 g, zeolite powder 824.19 g

表 2 饲料糖水平对三种不同食性鱼类生长及饲料利用的影响

Tab. 2 Effects of different dietary carbohydrate levels on growth performance in fishes of different feeding habits

组别 group	糖水平 carbohydrate	初重/g IBW	末重/g FBW	增重率/% WGR	成活率/% SR	特定生长率/(%/d) SGR	饲料系数 FCR
罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	C _L (20%)	31.52 ± 0.29	90.71 ± 4.01 ^a	195.16 ± 7.71 ^a	95.00 ± 4.08	1.79 ± 0.04 ^a	1.54 ± 0.02 ^b
	C _M (30%)	31.31 ± 0.17	100.98 ± 6.82 ^{ab}	235.32 ± 2.12 ^b	98.33 ± 2.36	2.02 ± 0.01 ^b	1.47 ± 0.04 ^a
	C _H (40%)	31.55 ± 0.29	102.23 ± 5.23 ^b	236.63 ± 6.14 ^b	96.67 ± 2.36	2.03 ± 0.06 ^b	1.51 ± 0.02 ^{ab}
卵形鲳鲹 <i>T. ovatus</i>	C _L (13%)	86.17 ± 1.89	179.15 ± 7.07 ^a	106.43 ± 2.25 ^a	93.33 ± 2.36 ^a	1.22 ± 0.14 ^a	1.68 ± 0.03 ^b
	C _M (26%)	87.33 ± 1.04	214.25 ± 2.47 ^b	144.91 ± 6.79 ^b	95.00 ± 4.08 ^a	1.49 ± 0.05 ^b	1.61 ± 0.02 ^a
	C _H (39%)	86.83 ± 2.08	194.52 ± 1.41 ^c	127.59 ± 5.88 ^c	91.67 ± 4.71 ^b	1.37 ± 0.04 ^c	1.65 ± 0.02 ^{ab}
军曹鱼 <i>R. canadum</i>	C _L (12%)	24.05 ± 0.51	203.51 ± 5.66 ^a	806.5 ± 3.54 ^a	90.00 ± 4.08 ^a	3.68 ± 0.01 ^a	1.53 ± 0.02 ^{ab}
	C _M (24%)	23.83 ± 0.58	221.67 ± 2.83 ^b	842.5 ± 12.02 ^b	93.33 ± 2.36 ^a	3.74 ± 0.02 ^b	1.49 ± 0.04 ^a
	C _H (36%)	23.33 ± 0.29	212.25 ± 2.47 ^c	775.0 ± 11.31 ^c	80.00 ± 4.08 ^b	3.62 ± 0.02 ^c	1.57 ± 0.05 ^b

注:表中数值为平均数 ± 标准差 (n=3); 同一列数值肩标字母不同表示差异显著 (P<0.05), 下同

Notes: Values in the table are mean ± SD (n=3); Values in the same row with different superscripts indicate significant difference (P<0.05), the same below

表 3 饲料糖水平对三种不同食性鱼类糖代谢相关生化指标的影响
 Tab. 3 Effects of different dietary carbohydrate levels on glucose metabolism indicators in fishes of different feeding habits

组别 group	糖水平 carbohydrate	血糖/(mmol/L) plasma glucose	胰岛素/(uIU/mL) plasma insulin	肝糖原/(mg/g) hepatic glycogen	肌糖原/(mg/g) muscle glycogen	甘油三酯/(mmol/L) triglyceride
罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	C _L (20%)	3.32 ± 0.09 ^a	4.69 ± 0.26 ^a	13.48 ± 0.46 ^a	2.58 ± 0.12 ^a	1.12 ± 0.08 ^a
	C _M (30%)	4.60 ± 0.57 ^b	6.53 ± 0.51 ^b	16.58 ± 0.35 ^b	2.45 ± 0.18 ^a	1.21 ± 0.03 ^a
	C _H (40%)	7.74 ± 0.36 ^c	9.58 ± 0.28 ^c	22.43 ± 1.13 ^c	3.45 ± 0.46 ^b	1.56 ± 0.11 ^b
卵形鲳鲹 <i>T. ovatus</i>	C _L (13%)	3.36 ± 0.14 ^a	4.43 ± 0.19 ^a	12.79 ± 0.85 ^a	2.42 ± 0.43 ^a	1.08 ± 0.09 ^a
	C _M (26%)	3.83 ± 0.06 ^a	5.13 ± 0.10 ^a	13.66 ± 0.10 ^b	3.27 ± 0.33 ^{ab}	1.29 ± 0.06 ^b
	C _H (39%)	4.83 ± 0.21 ^b	7.69 ± 0.34 ^b	16.04 ± 0.95 ^c	3.85 ± 0.42 ^b	1.34 ± 0.13 ^b
军曹鱼 <i>R. canadum</i>	C _L (12%)	2.04 ± 0.14 ^a	5.09 ± 0.28	15.37 ± 1.25 ^a	2.93 ± 0.27 ^a	0.87 ± 0.04 ^a
	C _M (24%)	3.84 ± 0.24 ^b	5.27 ± 0.11	17.85 ± 0.05 ^a	3.08 ± 0.08 ^a	0.90 ± 0.04 ^a
	C _H (36%)	4.49 ± 0.31 ^b	5.36 ± 0.39	18.59 ± 0.79 ^b	3.68 ± 0.36 ^b	1.22 ± 0.07 ^b

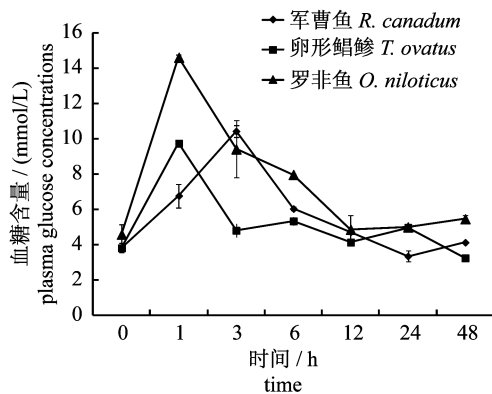


图 1 三种不同食性鱼类注射葡萄糖后 48 h 内血糖含量的变化

Fig. 1 The changes of plasma glucose content in three fishes of different food habits after injection within 48 h

胰岛素水平缓慢上升,至 3 h 达最高水平 ($P < 0.05$) (图 2); 而卵形鲳鲹组在注射葡萄糖后血浆胰岛素水平急剧下降,在 1 h 后开始缓慢上升,直至 6 h 达最高水平 ($P < 0.05$)。

2.5 注射葡萄糖对不同食性鱼类肝/肌糖原含量的影响

卵形鲳鲹组与罗非鱼组在注射葡萄糖后肝糖原含量分别在 3、6 h 达峰值 ($P < 0.05$) (图 3)。而军曹鱼组在注射葡萄糖后 1 h 内呈下降趋势,随后缓慢上升且维持在较高水平,直至 48 h 恢复到与注射前无显著差异 ($P > 0.05$)。比较注射后相同时间点各组间肌糖原含量发现,军曹鱼组与卵形鲳鲹组在 0~48 h 内肌糖原水平显著高于罗非鱼组 ($P < 0.05$),然而各组肌糖原水平在注射葡萄糖后并没有受到显著的影响 ($P < 0.05$) (图 4)。

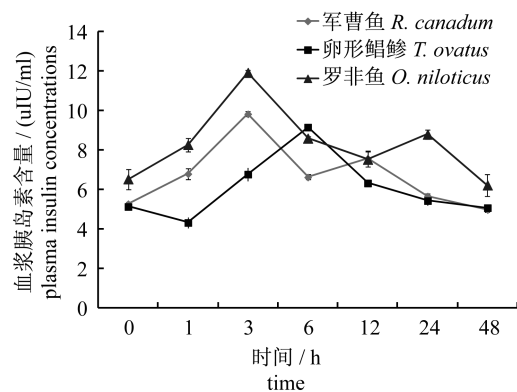


图 2 三种不同食性鱼类注射葡萄糖后 48 h 内血浆胰岛素含量的变化

Fig. 2 The changes of plasma insulin content in three fishes of different food habits after injection within 48 h

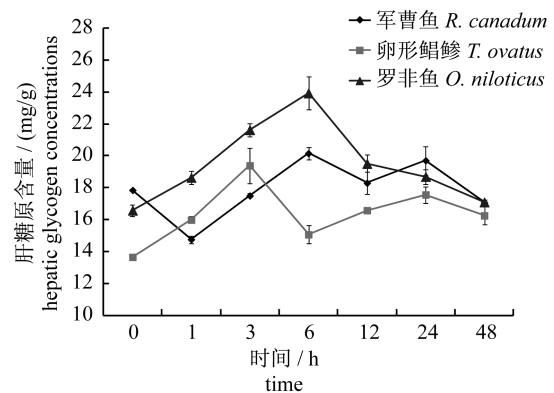


图 3 三种不同食性鱼注射葡萄糖后 48 h 内肝糖原含量的变化

Fig. 3 The changes of hepatic glycogen content in three fishes of different food habits after injection within 48 h

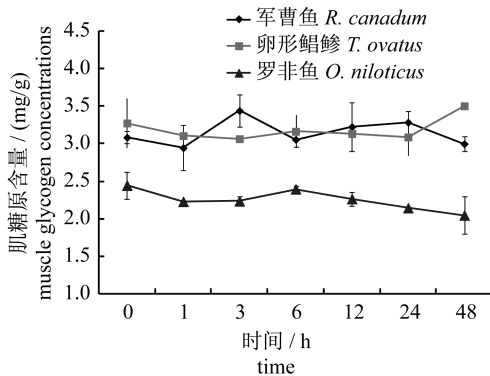


图4 三种不同食性鱼注射葡萄糖后48 h 内肌糖原含量的变化

Fig.4 The changes of muscle glycogen content in three fishes of different food habits after injection within 48 h

2.6 注射葡萄糖对不同食性鱼类血浆甘油三酯含量的影响

罗非鱼组与卵形鲳鲹组在注射葡萄糖后甘油三酯水平缓慢上升,分别在3、6 h达最高水平 ($P < 0.05$) (图5)。而军曹鱼组在注射葡萄糖后1 h内呈下降趋势,随后上升至3 h达最高水平 ($P < 0.05$)。比较注射后相同时间点各组间血浆甘油三酯发现,罗非鱼组与卵形鲳鲹组在0~24 h内甘油三酯水平显著高于军曹鱼组 ($P < 0.05$),均在48 h回到注射前水平。

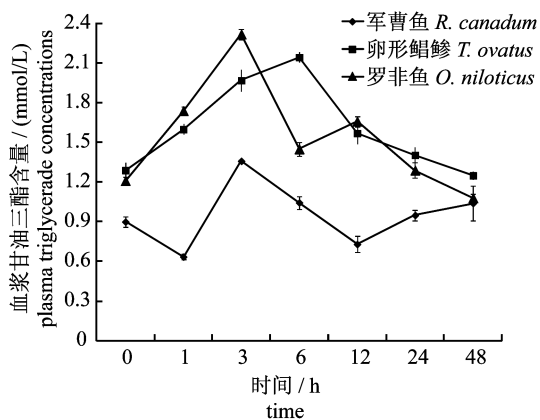


图5 三种不同食性鱼注射葡萄糖后48 h 内血浆甘油三酯含量的变化

Fig.5 The changes of plasma triglyceride content in three fishes of different food habits after injection within 48 h

3 讨论

鱼类的食性是在自然环境中经长期进化演变而成的,鱼类在经过幼年期后从环境中所摄取的

主要食物大体可分为肉食性、杂食性和植食性。与哺乳动物相比较,鱼类尤其是肉食性鱼类对糖的利用相当有限。通常情况下,杂食性及植食性鱼类对糖的吸收利用率较高,可以利用饲料中较高水平的糖类物质;而肉食性鱼类对饲料中糖类物质的利用能力较低,摄食后糖利用能力也较弱。本实验获得了类似的研究结果,杂食性吉富罗非鱼高糖水平饲料组的增重率与特定生长率也最高,该结果与吴凡等^[12]在奥尼罗非鱼上的研究结果相似,表明杂食性吉富罗非鱼相对温和肉食性卵形鲳鲹和凶猛肉食性军曹鱼而言可更高效地利用饲料糖物质。同时卵形鲳鲹和军曹鱼高饲料糖水平组存活率均显著低于其他各组 ($P < 0.05$);而增重率与特定生长率则均为 C_M 组显著最高 ($P < 0.05$),提示饲料糖水平对肉食性海洋鱼类有不同程度的影响。其他学者对肉食性长吻鲈 (*Leiocassis longirostris* Günther)^[13]和大西洋鲑^[2]的研究表明,低水平碳水化合物饲料促生长效果较好。但同时也有研究指出,Brauge等^[4]投喂等氮等能的碳水化合物饲料,结果表明高碳水化合物饲料对虹鳟生长并没有显著影响。本实验前期在石斑鱼上的研究显示,随着饲料碳水化合物水平的增加,WGR和SGR呈逐渐上升趋势,但无显著性差异,说明饲料碳水化合物水平在一定范围内对石斑鱼生长有影响但不显著^[14]。提示同样对肉食性海洋鱼类而言,种群的差异也是影响糖利用能力很重要的一个因素。研究表明肉食性鱼类饲料中糖含量一般应不超过20%,而杂食性鱼类饲料中糖含量在30%~40%^[15]。当饲料中添加量超过适宜水平时,会导致鱼类出现免疫力下降、生长速度减缓,甚至引发死亡等现象^[16]。本研究中当肉食性卵形鲳鲹和军曹鱼饲料糖水平分别达到39%和36%时,其增重率、特定生长率和存活率均显著低于中等饲料糖水平组,表明肉食性卵形鲳鲹和军曹鱼对饲料糖物质的利用能力仍然较低。

鱼类对糖利用能力的高低,通常认为主要与其食性以及对其膳食糖物质耐受能力密切相关。目前,国内外许多学者对不同食性鱼类的葡萄糖耐受能力进行了大量研究,通过对吉富罗非鱼^[17]、虹鳟^[18]、青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*) 和草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)^[19]等大量研究发现,鱼类血糖变化规律与在人类糖尿病上血糖变化的

规律类似,即呈现持续的高血糖现象。但是与哺乳类不同,在不同种类及食性鱼类的相关研究结果差异较大。本研究发现随着饲料糖水平的升高,杂食性吉富罗非鱼投喂高糖饲料组血糖、胰岛素、肝/肌糖原、甘油三酯均显著高于其他各组 ($P < 0.05$),而温和肉食性卵形鲳鲈和凶猛肉食性军曹鱼血糖、胰岛素、肝/肌糖原、甘油三酯则差异并不显著,表明杂食性吉富罗非鱼相对肉食性鱼类而言更能充分利用膳食中的糖物质。有报道含糖丰富的饲料可以诱导机体胰岛素的分泌^[20],但也有研究发现胰岛素的分泌与饲料中糖含量无关^[21],而且摄食高糖水平饲料后胰岛素含量不但不升高反而降低^[22]。本研究结果显示随着饲料糖水平的升高,可在一定程度上促进胰岛素的分泌,并和食性存在相关性(表3)。鱼类摄入高水平糖饲料后呈现持续的高血糖现象,其中植食性和杂食性鱼类能较快地降低血糖水平,而肉食性鱼类降低血糖水平的速度较慢。许多学者报道杂食性鱼类如鲤高血糖持续 5 h^[3],罗非鱼(*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)和斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)分别持续 6 h^[23]和 8 h^[24];肉食性鱼类虹鳟高血糖负荷持续 18 h^[22],金头鲷和舌齿鲈均持续 12 h^[6],高首鲟(*Acipenser transmontanus*)持续时间长达 24 h^[25];可见肉食性鱼类高血糖现象持续时间更持久,出现这种现象可能是与肉食性鱼类体内胰岛素受体及葡萄糖转运蛋白(glucose transporter protein, GLUTs)种类和数量有关^[26],或者亲和力较其他食性鱼类低^[27],并且肉食性鱼类在摄入葡萄糖后其糖酵解活性会受到抑制,而糖异生效能增强^[28]。其中,食性与葡萄糖转运蛋白的种类、数量以及与葡萄糖亲和力的关系已经得到了大量学者的关注和研究探讨。

本实验研究表明,3种鱼注射葡萄糖后均呈现持续的高血糖现象,这和其他鱼类在口服或注射葡萄糖后血糖持续升高的现象一致^[3,29]。从高血糖持续的时间来看,罗非鱼组和卵形鲳鲈组在注射葡萄糖 1 h 后血糖水平达峰值,并且均在 12 h 恢复到注射前水平,但军曹鱼组在 3 h 血糖达峰值后直至 24 h 才回到注射前水平。而且比较三者间血糖水平变化的幅度发现,罗非鱼组血糖最高浓度显著高于其他两组。由此可见,罗非鱼减轻高血糖负荷的能力最强,卵形鲳鲈次之,而

军曹鱼糖耐受能力最弱。这与 Furuichi 等^[3]对五条鲮、真鲷和鲤的研究结果类似。而且在给美洲鳎和鲶进行葡萄糖耐量实验后也发现,血糖含量在 1 h 内就回到饥饿水平,但虹鳟在 6 h 后才下降至饥饿水平^[5]。对金头鲷和舌齿鲈静脉注射葡萄糖溶液后也发现,金头鲷的血糖升幅明显大于舌齿鲈^[3]。以上研究表明,不同食性鱼类对葡萄糖耐受能力存在明显的差异,一般来说,肉食性鱼类对糖的耐受能力较杂食性和草食性鱼类低。作为调节和维持血糖平衡最为重要的调节因子,胰岛素主要是通过促进糖原、脂肪、蛋白质合成,同时抑制糖异生过程,从而降低血糖水平^[30]。而较之哺乳动物,鱼类糖耐受能力低下,其主要原因曾被认为胰岛素分泌不足^[31]。然而近年来已有报道,胰岛素缺乏并不是鱼类对糖利用能力低的主要原因^[7],甚至在某些鱼类胰岛素水平要远远高于哺乳动物^[30]。本实验结果表明,军曹鱼组与罗非鱼组在注射葡萄糖后血浆胰岛素水平缓慢上升,至 3 h 达最高水平。这与在真鲷^[3]、大鳞大麻哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)^[32]以及罗非鱼^[17]上进行葡萄糖耐量实验后研究结果一致,说明军曹鱼与罗非鱼对胰岛素的分泌与其对葡萄糖的吸收速度不一致,前者明显滞后于后者,从而使吸收后的葡萄糖不能被较好利用。此外,鱼的种类、采样的时间和季节都会对胰岛素的分泌和调节产生不同程度的影响^[33]。

动物体内肝脏和肌肉是葡萄糖以糖原的形式储存的主要部位。肝糖原在体内的主要作用是保持血糖浓度的稳定,肌糖原则在运动时分解以供能。大量报道鱼类在摄食饲料糖后会显著提高肝糖原水平^[34-35]。本研究结果表明,卵形鲳鲈组与罗非鱼组肝糖原水平在注射葡萄糖后显著上升,分别在 3、6 h 达峰值。但是军曹鱼组在注射葡萄糖后 1 h 内呈下降趋势,随后缓慢上升且维持在较高水平,直至 48 h 恢复到注射前水平。类似的研究在其他鱼类也有发现,黄鹤忠等^[19]研究发现,在给青鱼和草鱼灌喂高剂量(1 370 mg/kg 体质量)葡萄糖后,肝糖原水平分别在 1 和 3 h 降至最低点;而在灌喂低剂量(420 mg/kg 体质量)葡萄糖后,青鱼肝糖原水平在 3 h 时降至最低,而草鱼肝糖原水平却不降反升,在 3 h 达峰值。而且对于食性相同的舌齿鲈和金头鲷,腹腔注射葡萄糖后二者肝糖原变化也不相同,舌齿鲈肝糖原

含量在 3 h 达峰值,而金头鲷肝糖原含量却在注射 1 h 后显著下降^[6]。上述研究表明,在不同食性鱼类葡萄糖耐量实验中,鱼类食性与其肝糖原含量变化之间并没有明显的关联性。对于肌糖原,比较注射后相同时间点各组间肌糖原含量发现,军曹鱼组与卵形鲳鲹组在 0~48 h 内肌糖原水平显著高于罗非鱼组,然而各组肌糖原水平在注射葡萄糖后并没有受到显著的影响。在糖代谢过程中,葡萄糖经无氧酵解生成丙酮酸,丙酮酸在有氧条件下氧化脱羧转变成乙酰辅酶 A (COA),COA 进入胞液后在脂肪酸合成酶系作用下生成脂酰辅酶 A,进而与 α 磷酸甘油为原料合成甘油三酯。一般来说,哺乳动物能够将体内多余糖转化为脂肪,然而在鱼类因种类和食性不同而异^[35]。本研究中,罗非鱼组与卵形鲳鲹组在注射葡萄糖后甘油三酯水平缓慢上升,分别在 3、6 h 达最高水平。而军曹鱼组在注射葡萄糖后 1 h 内呈下降趋势,随后上升至 3 h 达峰值。这与蔡春芳等^[36]对异育银鲫的研究结果类似。比较注射后相同时间点各组间血浆甘油三酯发现,罗非鱼组与卵形鲳鲹组在 0~24 h 内甘油三酯水平显著高于军曹鱼组,均在 48 h 回到注射前水平。这说明罗非鱼与卵形鲳鲹甘油三酯的合成能力均强于军曹鱼,通过提升甘油三酯的合成能力以减轻高血糖的负荷。

研究表明,饲料糖水平对 3 种食性鱼类生长、糖代谢生化指标、葡萄糖利用和耐受能力具有不同程度的影响,当投喂高水平糖饲料并进一步注射造成高葡萄糖负荷后,不同食性鱼类均在短时间内产生持续的高血糖,但杂食性鱼类吉富罗非鱼血浆胰岛素和甘油三酯含量显著高于温和肉食性鱼类卵形鲳鲹和凶猛肉食性军曹鱼,其血糖恢复速度也与肉食性鱼类有显著差异。而肝糖原和肌糖原的高低变化差异表明高糖负荷下杂食性鱼类糖脂代谢速度相比肉食性鱼类更快,提示杂食性鱼类可能在一定程度上依靠脂肪合成代谢来降低高血糖负荷。杂食性罗非鱼可比肉食性鱼类更好地利用膳食糖物质。葡萄糖耐受能力则以杂食性吉富罗非鱼为最强,卵形鲳鲹次之,军曹鱼葡萄糖耐受能力最低。

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, Hansen T. Utilisation of different dietary starch sources and tolerance to glucose loading in Atlantic salmon (*Salmo salar*), during parr - smolt transformation [J]. *Aquaculture*, 1998, 161(1): 145-157.
- [3] Furuichi M, Yone Y. Change of blood sugar and plasma insulin levels of fishes in glucose tolerance test[J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1981, 47(6): 761-764.
- [4] Brauge C, Médale 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.
- [5] Capilla E, Médale F, Navarro I, et al. Muscle insulin binding and plasma levels in relation to liver glucokinase activity, glucose metabolism and dietary carbohydrates in rainbow trout [J]. *Regulatory peptides*, 2003, 110(2): 123-132.
- [6] Peres H, Goncalves P, Oliva-Teles A. Glucose tolerance in gilthead seabream (*Sparus aurata*) and European seabass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. *Aquaculture*, 1999, 179(1): 415-423.
- [7] Legate N J, Bonen A, Moon T W. Glucose tolerance and peripheral glucose utilization in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), American eel (*Anguilla rostrata*), and black bullhead catfish (*Ameiurus melas*) [J]. *General and Comparative Endocrinology*, 2001, 122(1): 48-59.
- [8] Chen S J, Li L H, Yang X Q, et al. Present situation of tilapia industry and measures of improving export competition power [J]. *South China Fisheries Science*. 2007, 3(1): 75-80. [陈胜军, 李来好, 杨贤庆, 等. 我国罗非鱼产业现状分析及提高罗非鱼出口竞争力的措施. 南方水产, 2007, 3(1): 75-80.]
- [9] Yang H S. Studies On the Culture of Pompano, *Trachinotus ovatus* [J]. *Journal of Fujian Fisheries*. 2006, (1): 39-41. [杨火盛. 卵形鲳鲹人工养殖实验. 福建水产, 2006, (1): 39-41.]
- [10] Holt G J, Faulk C K, Schwarz M H. A review of the larviculture of cobia *Rachycentron canadum*, a warm water marine fish [J]. *Aquaculture*, 2007, 268(1-4): 181-187.
- [11] Yang W, Ye J D, Wang K, et al. Glucose tolerance in Grouper (*Epinephelus coioides*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012 36(3): 563-568. [杨伟, 叶继丹, 王琨, 等. 斜带石斑鱼经葡萄糖灌喂后

- 的代谢反应. 水生生物学报, 2012, 36 (3): 563 - 568.]
- [12] Wu F, Wen H, Jiang M, *et al.* Effects of different dietary carbohydrate levels on growth performance, body composition and serum biochemical indices of juvenile hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) [J]. Journal of South China Agricultural University, 2011, 32(4): 91 - 95. [吴凡, 文华, 蒋明, 等. 饲料碳水化合物水平对奥尼罗非鱼幼鱼生长, 体成分和血清生化指标的影响. 华南农业大学学报, 2011, 32(4): 91 - 95.]
- [13] Pei Z H, Xie H Q, Lei W, *et al.* Comparative study on the effect of dietary corn starch content on growth, feed utilization and body composition of Chinese longsnout catfish (*Leiocassis Longirostris* Gbnther) and gibel carp (*Carassius auratus* gibelio) [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2005, 29 (3): 239 - 247. [裴之华, 解缓启, 雷武, 等. 长吻鮠和异育银鲫对玉米淀粉利用差异的比较研究. 水生生物学报, 2005, 29(3): 239 - 247.]
- [14] Mao Y B, Liu H Y, Tan B P, *et al.* Effects of different dietary carbohydrate levels and nutrition status on growth and glucose tolerance ability in grouper (*Epinephelus coioides*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(4): 549 - 558. [毛义波, 刘泓宇, 谭北平, 等. 饲料碳水化合物水平及饥饿处理对斜带石斑鱼生长及葡萄糖耐受能力的影响. 水产学报, 2014, 38(4): 549 - 558.]
- [15] Beamish F W H, Hilton J W, Niimi E, *et al.* Dietary carbohydrate and growth, body composition and heat increment in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. Fish physiology and biochemistry, 1986, 1 (2): 85 - 91.
- [16] Dixon D G, Hilton J W. Influence of available dietary carbohydrate content on tolerance of waterborne copper by rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson [J]. Journal of fish biology, 1981, 19 (5): 509 - 518.
- [17] Liu H L. Effects of glucose injection on glucose metabolism, insulin receptor and GLUT4 gene expression of Tilapia [D]. Qingdao: Shandong Agriculture University, 2012. [刘含亮. 注射葡萄糖对罗非鱼糖代谢, 胰岛素受体和 GLUT4 基因表达的影响. 青岛: 山东农业大学, 2012.]
- [18] Harmon J S, Eilertson C D, Sheridan M A, *et al.* Insulin suppression is associated with hypersomatostatinemia and hyperglucagonemia in glucose-injected rainbow trout [J]. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 1991, 261(3): 609 - 613.
- [19] Huang H Z, Ding L, Song X H, *et al.* Comparative research on glucose tolerance between black carp *Mylopharyngodon piceus* and grass carp *Ctenopharyngodon idellus* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12 (4): 496 - 500. [黄鹤忠, 丁磊, 宋学宏, 等. 青鱼和草鱼葡萄糖耐量的比较研究. 中国水产科学, 2005, 12(4): 496 - 450.]
- [20] Parrizas M, Planas J, Plisetskaya E M, *et al.* Insulin binding and receptor tyrosine kinase activity in skeletal muscle of carnivorous and omnivorous fish [J]. American Journal of Physiology, 1994, 266 (6): 1944 - 1950.
- [21] Capilla E, Médale F, Navarro I, *et al.* Muscle insulin binding and plasma levels in relation to liver glucokinase activity, glucose metabolism and dietary carbohydrates in rainbow trout [J]. Regulatory Peptides, 2003, 110(2): 123 - 132.
- [22] del sol Novoa M, Capilla E, Rojas P, *et al.* Glucagon and insulin response to dietary carbohydrate in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. General and Comparative Endocrinology, 2004, 139 (1): 48 - 54.
- [23] Shiau S Y. Utilization of carbohydrates in warmwater fish-with particular reference to tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus* [J]. Aquaculture, 1997, 151 (1 - 4): 79 - 96.
- [24] Davis K B, Torrance P, Parker N C, *et al.* Growth, body composition and hepatic tyrosine aminotransferase activity in cortisol - fed channel catfish, *Ictalurus punctatus* Rafinesque [J]. Journal of fish biology, 1985, 27(2): 177 - 184.
- [25] Deng D F, Refstie S, Hung S S O. Glycemic and glycosuric responses in white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) after oral administration of simple and complex carbohydrates [J]. Aquaculture, 2001, 199(1 - 2): 107 - 117.
- [26] Caruso M A, Sheridan M A. New insights into the signaling system and function of insulin in fish [J]. General and Comparative Endocrinology, 2011, 173 (2): 227 - 247.
- [27] Baños N, Baro J, Castejón C, *et al.* Influence of high-carbohydrate enriched diets on plasma insulin levels and insulin and IGF-I receptors in trout [J]. Regulatory Peptides, 1998, 77(1 - 3): 55 - 62.
- [28] Furuichi M, Yone Y. Changes in activities of hepatic enzymes related to carbohydrate metabolism of fishes

- in glucose and insulin-glucose tolerance tests [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1982, 48(3) :463 – 466.
- [29] Lin S C, Liou C H, Shiau S Y. Renal threshold for urinary glucose excretion by tilapia in response to orally administered carbohydrates and injected glucose [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2000, 23(2) :127 – 132.
- [30] Mommsen T, Plisetskaya E. Insulin in fishes and agnathans-history, structure, and metabolic-regulation [J]. *Reviews in Aquatic Sciences*, 1991, 4(2 – 3) : 225 – 259.
- [31] Poitout V, Hagman D, Stein R, *et al.* Regulation of the insulin gene by glucose and fatty acids [J]. *The Journal of nutrition*, 2006, 136(4) :873 – 876.
- [32] Mazur C N, Higgs D A, Plisetskaya E, *et al.* Utilization of dietary starch and glucose tolerance in juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) of different strains in seawater [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1992, 10 (4) : 303 – 313.
- [33] Gutierrez J, Carrillo M, Zanuy S, *et al.* Daily rhythms of insulin and glucose levels in the plasma of sea bass *Dicentrarchus labrax* after experimental feeding [J]. *General and Comparative Endocrinology*, 1984, 55(3) :393 – 397.
- [34] Moon T W. Glucose intolerance in teleost fish: fact or fiction [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2001, 129(2 – 3) :243 – 249.
- [35] Suárez M D, Sanz A, Bazoco J, *et al.* Metabolic effects of changes in the dietary protein:carbohydrate ratio in eel (*Angilla anguilla*) and trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture International*, 2002, 10(2) :143 – 156.
- [36] Cai C F, Wang D Z. Study on glucose tolerance of *Carassius auratus gibelio* [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 1998, 7(增刊) :63 ~ 66. [蔡春芳,王道尊. 异育银鲫糖耐量的研究. 上海水产大学学报, 1998, 7(suppl.) :63 – 66.]

Effects of different dietary carbohydrate levels on growth and glucose tolerance ability in fishes of different feeding habits

LIU Hongyu¹, MAO Yibo¹, TAN Beiping^{1*}, DONG Xiaohui¹, YANG Qihui¹,
CHI Shuyan¹, ZHANG Shuang¹, CHEN Liqiao²

(1. *Laboratory of Aquatic Animal Nutrition and Feed, College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China*; 2. *Laboratory of Aquatic Animal Nutrition and Environmental Health, School of Life Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China*)

Abstract: To study the effects of different dietary carbohydrate levels on growth, glucose metabolism indicators and tolerance ability in fishes of different feeding habits after an 8-week feeding trial, this experiment was conducted taking Tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*), Derbio (*Trachinotus ovatus*) and Cobia (*Rachycentron canadum*) as the research objects, dextrin as the sugar source, three levels of dietary carbohydrate for each fish at low, medium and high levels (C_L, C_M, C_H ; Tilapia: 20% , 30% , 40% ; Derbio: 13% , 26% , 39% ; Cobia: 12% , 24% , 36%) respectively. The results showed that: the different carbohydrate levels had no significant effect on survival rate of Tilapia ($P > 0.05$); The feeding conversion rate (FCR) showed an increasing trend after the first decline with elevated levels of dietary carbohydrate and the C_L group in Tilapia was the highest ($P < 0.05$); The weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR)

were all the highest in C_H group and significantly higher than the C_L group ($P < 0.05$). The survival rate in C_H groups of Derbio and Cobia were significantly lower than the other groups ($P < 0.05$). However, the WGR and SGR in C_M were the highest significantly ($P < 0.05$). The FCR first increased, then decreased with dietary carbohydrate levels elevated and the C_M lowest groups were the lowest (Tilapia: 1.47, Derbio: 1.61, Cobia: 1.49). Different dietary carbohydrate levels have different effects on glucose metabolism indicators of fish. With rising levels of dietary carbohydrate in Tilapia, the plasma glucose, insulin, hepatic/muscle glycogen and triglycerides of C_H group were significantly higher than the other groups ($P < 0.05$). The plasma glucose, insulin, hepatic/muscle glycogen, triglycerides of C_H groups in Derbio and Cobia are the highest, but there was no significant difference in plasma glucose and insulin between C_L and C_M groups in Derbio ($P > 0.05$). There were also no significant differences in plasma glucose and insulin levels of C_M and C_H in Cobia ($P > 0.05$). The glucose tolerance test (GTT) results showed that: (1) After injection of glucose, the plasma glucose levels of Derbio and Tilapia groups reached the peak at 1 h ($P < 0.05$) and returned to the initial level at 12 h while the Cobia until 24 h after a peak at 3 h. (2) The plasma insulin levels in tilapia and cobia groups rose slowly after the injection of glucose and reached the highest level at 3 h ($P < 0.05$), while the lever in Derbio group was significantly decreased within 1 h ($P < 0.05$). (3) The glycogen levels in Derbio and Tilapia increased slowly and reached the peak at 3 h and 6 h respectively ($P < 0.05$) while the Cobia declined within 1 h. (4) after the injection of glucose, The triglyceride levels in Tilapia and Derbio reached the peak at 3 h and 6 h after injection of glucose respectively ($P < 0.05$) while the Cobia decreased significantly within 1 h ($P < 0.05$). The results of this study suggest that dietary carbohydrate levels have varying degrees of effects on the growth, glucose metabolism indicators, glucose utilization and tolerance of three feeding habits, fish. The omnivorous Tilapia can utilize the dietary carbohydrate better than carnivorous fish. The glucose tolerance ability of omnivorous Tilapia is the strongest, followed by Derbio the intermediate, and Cobia the lowest.

Key words: dietary carbohydrate; feeding habit; fish; growth performance; glucose tolerance test

Corresponding author: TAN Beiping. E-mail: bptan@126.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31272673), National Basic Research Program (973 Program) (2014CB138603), National Special Research Fund for Non-Profit Sector (Agriculture) (201003020), Colleges Pearl River Scholar (GDUPS2011), Guangdong Provincial Natural Science Foundation (S2013010016511), Project of Enhancing School With Innovation of Guangdong Ocean University (GDOU2015050206)