

网络出版时间:2018-07-30 17:12

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.02.004

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180730.1710.008.html

饲料碳水化合物水平对洛氏鲮消化酶和糖代谢酶活性的影响

瞿子惠¹, 吴莉芳¹, 周 锴¹, 杨 兰¹, 祖岫杰², 段 晶¹, 王婧瑶¹

(1 吉林农业大学 动物科学技术学院 动物营养与饲料科学重点实验室, 吉林 长春 130118;

2 吉林省水产科学研究院, 吉林 长春 130033)

【摘 要】 【目的】研究饲料中不同碳水化合物水平对洛氏鲮(*Rhynchocypris lagowskii* Dybowski)消化酶和糖代谢酶活性的影响。【方法】以初始体质量为 (7.64 ± 0.04) g/尾的洛氏鲮幼鱼为研究对象,以鱼粉、豆粕、菜粕和棉粕为蛋白源,玉米油和鱼油为脂肪源,糊精为碳水化合物,配制 5 种等氮(360.0 g/kg)、等脂肪(60.0 g/kg)、碳水化合物水平分别为 0.0% (对照组),10.0%,16.0%,22.0%,28.0% (均为质量分数)的试验饲料,在控温养殖系统中进行 8 周饲养试验。饲养试验结束后,测定洛氏鲮肝胰脏和肠道淀粉酶、脂肪酶、蛋白酶及糖代谢酶活性和肝糖原含量。【结果】在本试验条件下,随着饲料碳水化合物水平的升高,洛氏鲮肝胰脏、前肠、中肠和后肠蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶活性均呈先上升后下降的趋势。10.0%,16.0%和 22.0%组肝胰脏蛋白酶活性显著高于对照组($P < 0.05$),而 28.0%组显著低于对照组($P < 0.05$);10.0%,16.0%,22.0%和 28.0%组前肠、中肠和后肠蛋白酶活性均显著高于对照组($P < 0.05$)。10.0%和 16.0%组肝胰脏淀粉酶活性显著高于对照组($P < 0.05$),22.0%和 28.0%组显著低于对照组($P < 0.05$);前肠和后肠淀粉酶活性以 22.0%组最高,且 10.0%,16.0%,22.0%和 28.0%组显著高于对照组($P < 0.05$),中肠淀粉酶活性以 16.0%组最高,且 16.0%和 22.0%组显著高于对照组($P < 0.05$);而 10.0%组与对照组差异不显著($P > 0.05$),28.0%组显著低于对照组($P < 0.05$)。22.0%组洛氏鲮肝胰脏和肠道脂肪酶活性均最高,且 10.0%,16.0%,22.0%和 28.0%组均显著高于对照组($P < 0.05$)。洛氏鲮肝胰脏己糖激酶、丙酮酸激酶、果糖-1,6-二磷酸酶活性及肝糖原含量均随着饲料碳水化合物水平的升高呈先升高后下降趋势。饲料碳水化合物水平为 16.0%和 22.0%时,洛氏鲮肝胰脏己糖激酶活性显著高于对照组($P < 0.05$),而 10.0%和 28.0%组与对照组差异不显著($P > 0.05$);丙酮酸激酶活性在饲料碳水化合物水平为 22.0%时达到最高值,16.0%,22.0%和 28.0%组显著高于对照组($P < 0.05$),而 10.0%组与对照组差异不显著($P > 0.05$);果糖-1,6-二磷酸酶活性在饲料碳水化合物水平为 16.0%和 22.0%时显著高于对照组($P < 0.05$),而 10.0%和 28.0%组与对照组差异不显著($P > 0.05$);肝糖原含量则在饲料碳水化合物水平为 22.0%和 28.0%时显著高于对照组($P < 0.05$),而 10.0%和 16.0%组与对照组差异不显著($P > 0.05$)。【结论】从消化及糖代谢角度看,洛氏鲮利用饲料中碳水化合物的适宜水平在 16.0%~22.0%。

【关键词】 洛氏鲮;碳水化合物水平;消化酶活性;糖代谢酶活性

【中图分类号】 S965.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)02-0025-08

Effects of dietary carbohydrate levels on activities of digestive enzymes and carbohydrate metabolic enzymes of *Rhynchocypris lagowskii* Dybowski

QU Zihui¹, WU Lifang¹, ZHOU Kai¹, YANG Lan¹, ZU Xiujie², DUAN Jing¹, WANG Jingyao¹

(1 Jilin Provincial Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science, College of Animal Science and Technology, Jilin Agricultural

【收稿日期】 2017-12-22

【基金项目】 吉林省科技厅重点科技攻关项目(20160204019NY)

【作者简介】 瞿子惠(1995—),女,吉林农安人,在读硕士,主要从事水产动物营养与饲料研究。E-mail:47992301@qq.com

【通信作者】 吴莉芳(1970—),女,吉林农安人,教授,博士,硕士生导师,主要从事水产动物营养与饲料研究。

E-mail:wulifang2915@126.com

University, Changchun, Jilin 130118, China; 2 Fisheries Science Research Institute of Jilin Province, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract:【Objective】The effects of different dietary carbohydrate levels on activities of digestive enzymes and carbohydrate metabolic enzymes of *Rhynchocypris lagowskii* Dybowski were investigated. 【Method】Juvenile *Rhynchocypris lagowskii* Dybowski with initial weight of (7.64 ± 0.04) g were assigned to five treatment groups and fed on five isonitrogenous (360.0 g/kg) and equal lipid (60.0 g/kg) diet with carbohydrate levels of 0.0% (the control), 10.0%, 16.0%, 22.0%, and 28.0%, respectively. The experiment was conducted in a temperature control breeding system for 8 weeks. The diet used fish meal, soybean, rapeseed meal and cottonseed meal as protein source, corn oil and fish oil as fat source, and dextrin as carbohydrates. After the feeding trial, the activities of hepatopancreas, lipase and amylase in intestine were determined using the kit, the activities of protease were determined by folin-phenol, and the activities of carbohydrate metabolic enzymes and the content of the liver glycogen in hepatopancreas were determined using the kit. 【Result】In this experiment, with the increase of dietary carbohydrate level, the protease activities in hepatopancreas, foregut, midgut and hindgut, amylase activities and lipase activities increased firstly and then decreased. Hepatopancreas protease activities of groups 10.0%, 16.0% and 22.0% were significantly higher than the control group ($P < 0.05$), while the group 28.0% was significantly lower. The protease activities in foregut, midgut and hindgut of groups 10.0%, 16.0%, 22.0% and 28.0% were significantly higher than control group ($P < 0.05$). The amylase activities of hepatopancreas in groups 10.0% and 16.0% were significantly higher than the control group ($P < 0.05$), while groups 22.0% and 28.0% were significantly lower than the control group ($P < 0.05$). The amylase activities in foregut and hindgut of group 22.0% were the highest, and groups 10.0%, 16.0%, 22.0% and 28.0% were significantly higher than the control group ($P < 0.05$). The amylase activities in midgut of group 16.0% were the highest, and groups 16.0% and 22.0% were significantly higher than those in the control group ($P < 0.05$). The difference between group 10.0% and the control group was not significant ($P > 0.05$), and that of group 28.0% was significantly lower than that of the control group ($P < 0.05$). The lipase activities in hepatopancreas and intestine of group 22.0% were the highest, and that in hepatopancreas, foregut, midgut and hindgut of groups 10.0%, 16.0%, 22.0% and 28.0% were significantly higher than the control group ($P < 0.05$). With the increase of the dietary carbohydrate level, the activities of hexokinase, pyruvate kinase, and fructose 1,6-bisphosphatase in hepatopancreas and the original content of glycogen firstly increased and then decreased. When dietary carbohydrate levels were 16.0% and 22.0%, hexokinase activities in hepatopancreas were significantly higher than the control group ($P < 0.05$), while hexokinase activities in hepatopancreas in groups 10.0% and 28.0% had no significant difference with control group ($P > 0.05$). Pyruvate kinase activities reached the maximum in group 22.0%, and the activities in groups 16.0%, 22.0% and 28.0% were significantly higher than in the control group ($P < 0.05$), while group 10.0% and the control group had no significant difference ($P > 0.05$). Fructose 1,6-bisphosphatase activities of groups 16.0% and 22.0% were significantly higher than those in control group ($P < 0.05$), while groups 10.0% and 28.0% had no significant difference with the control group ($P > 0.05$). The original contents of glycogen of groups 22.0% and 28.0% were significantly higher than that of the control group ($P < 0.05$), while groups 10.0% and 16.0% had no significant difference with the control group ($P > 0.05$). 【Conclusion】According to the digestive enzymes activities and carbohydrate metabolic enzymes activities of *Rhynchocypris lagowskii* Dybowski, the suggested suitable carbohydrate level was 16.0%—22.0% in formulated diets.

Key words: *Rhynchocypris lagowskii* Dybowski; carbohydrate levels; digestive enzymes activities; carbohydrate metabolic enzymes activities

糖类亦称碳水化合物,是自然界中广泛分布的一类重要营养物质,其因聚合度差异可分为单糖(果糖、葡萄糖等),二糖(蔗糖、麦芽糖等)及多糖(淀粉、纤维素等)。与陆生动物相比,鱼类对碳水化合物的耐受能力相对较弱,但不同鱼类亦存在差异。研究表明,鱼类的耐糖力很大程度上取决于机体消化酶、糖代谢酶活性以及各种激素的分泌状况^[1]。肝胰脏、肠道是鱼类分泌消化酶的主要器官,主要分泌蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶,其通过参与糖、脂类、蛋白质等的代谢活动促进机体对饲料的消化吸收,其中淀粉酶的分泌量及活性直接决定鱼类对饲料中碳水化合物类物质的消化能力。有关饲料碳水化合物水平对鱼类消化酶活性的影响,国内外已有报道。高梅等^[2]研究了饲料中碳水化合物水平对南方鲂幼鱼消化酶活性的影响,结果表明,淀粉酶活性几乎没有变化,而蛋白酶活性随碳水化合物含量的变化呈显著上升变化。Zhou 等^[3]对金鲳鱼幼鱼的研究表明,随着饲料中碳水化合物水平的升高,其淀粉酶活性显著升高,脂肪酶活性则显著下降。在杂食性鱼类上也有相似研究,如李晋南等^[4]在松浦镜鲤上的研究表明,高淀粉组的淀粉酶活性和蛋白质含量显著高于其他各组。碳水化合物经消化吸收进入体内进行一系列的代谢活动,主要包括碳水化合物的分解和合成。近年来有关饲料碳水化合物水平调控鱼类糖酵解、糖异生、磷酸戊糖及糖原代谢途径中关键酶的研究较多。目前,在军曹幼鱼^[5]、高首鲟^[6]、鲮鱼和虹鳟^[7]及大菱鲆^[8]等鱼类中,均有关于糖酵解和糖异生关键酶活性的报道,这些研究结果均表明,饲料碳水化合物水平可以通过调节鱼类肝脏糖酵解和糖

异生关键酶的活性,从而调节鱼体血液中葡萄糖的含量。

洛氏鲮(*Rhynchocypris lagowskii* Dybowski) 又称拉氏大吻鲮,俗称柳根池,隶属于鲤形目(Cypriniformes)、鲤科(Cyprinidae)、雅罗鱼亚科(Leuciscinae)、鲮属(*Phoxinus*),是我国名贵的杂食性小型经济鱼类,具有广阔的养殖发展前景。关于洛氏鲮的生物学与繁殖力^[9]、生态环境学^[10]、人工繁殖与苗种培育技术^[9]、肌肉蛋白营养价值评价^[11]及胚胎发育^[12]等已有报道,但尚未见洛氏鲮对碳水化合物营养需求方面的相关报道。因此,本试验通过在饲料中添加不同水平的碳水化合物,探讨其对洛氏鲮幼鱼消化酶活性和糖代谢酶活性的影响,确定洛氏鲮幼鱼饲料中碳水化合物的适宜含量,旨在为洛氏鲮的健康养殖及饲料配制提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验鱼及其来源

饲养试验在吉林农业大学水产养殖基地控温养殖系统中完成。洛氏鲮幼鱼由吉林省敦化市名优水产良种场提供。

1.2 饲料的制备

试验饲料中的蛋白原料为鱼粉、豆粕、菜粕和棉粕,脂肪原料为玉米油、鱼油,碳水化合物原料为糊精,将这些原料配制成 5 种不同碳水化合物水平(0.0%(CK),10.0%,16.0%,22.0%,28.0%,均为质量分数,下同)的等氮(360.0 g/kg)、等脂肪(60.0 g/kg)配合饲料(表 1)。

表 1 饲料配方及主要营养成分(风干基础)

Table 1 Formulation and nutritional composition of experimental diets(air-dry basis)						g/kg
配方及其营养成分 Ingredient and proximate composition		碳水化合物水平/% Carbohydrate level				
		0.0(CK)	10.0	16.0	22.0	28.0
配方成分 Ingredient	鱼粉 Fish meal	351.0	351.0	351.0	351.0	351.0
	豆粕 Soybean meal	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0
	菜粕 Rapeseed meal	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
	棉粕 Cottonseed meal	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
	糊精 Dextrin	0.0	100.0	160.0	220.0	280.0
	微晶纤维素 Cellulose microcrystalline	288.2	188.2	128.2	68.2	8.2
	预混料 Premix	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	氯化胆碱 Choline chloride	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	玉米油 Corn oil	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
	鱼油 Fish oil	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
营养成分 Proximate composition	粗蛋白 Crude protein	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0
	粗脂肪 Crude lipid	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
	粗纤维 Crude fiber	289.6	199.6	145.6	96.0	37.5
	粗灰分 Ash	71.6	71.6	71.6	71.6	71.6

所需原料经粉碎机粉碎后过 0.246 mm(60 目)筛,按表 1 配方设计,均匀搅拌后,挤压成颗粒配合饲料(直径 1.5 mm),晾干后于 -20℃冰箱保存备用。

1.3 试验设计

正式饲养试验开始前,预饲养 15 d,饱食投喂对照组饲料。选取初始体质量为(7.64±0.04) g/尾的洛氏鲮幼鱼 600 尾,随机分成 5 组,每组设 3 个重复,每个重复放养洛氏鲮幼鱼 40 尾,进行为期 8 周的饲养试验。

饲养试验期间保持水温在 22~24℃,每天换 1 次水,每次换整体水体积的 1/4~1/3,保持水质稳定,溶解氧(DO) 5.0 mg/L 以上,pH 在 7.0~8.0,亚硝酸盐质量浓度小于 0.05 mg/L,氨氮质量浓度小于 0.3 mg/L。日投饵率为 3%~4%,视具体情况随机调整,分 3 次(早上 07:00、中午 12:00、晚上 17:00)投喂,采取人工手撒的投饵方式进行投喂。

1.4 样品收集及指标测定

饲养试验结束后,每缸随机取洛氏鲮 10 尾,在冰盘上进行活体解剖,迅速取其肠道(分前肠、中肠和后肠)和肝胰脏,-80℃冰箱中保存备用。

蛋白酶活性采用福林酚试剂法测定,淀粉酶、脂

肪酶、己糖激酶、丙酮酸激酶、果糖-1,6-二磷酸酶活性和肝糖原含量采用试剂盒(南京建成生物工程有限公司)测定。

1.5 数据统计与分析

采用 SPSS 20.0 软件对洛氏鲮消化酶及糖代谢酶活性和肝糖原含量数据进行方差分析,若方差分析显著,再进行 Duncan's 多重比较,分析试验组间的差异显著性,显著水平设定 $P<0.05$,试验数据采用“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 饲料碳水化合物水平对洛氏鲮消化酶活性的影响

2.1.1 蛋白酶活性 从表 2 可以看出,在本试验条件下,随着饲料碳水化合物水平的升高,洛氏鲮肝胰脏、前肠、中肠和后肠蛋白酶活性均呈先上升后下降的趋势,当碳水化合物水平为 16.0%时达到最高。10.0%,16.0%和 22.0%组肝胰脏蛋白酶活性显著高于对照组($P<0.05$),而 28.0%组显著低于对照组($P<0.05$);前肠、中肠和后肠蛋白酶活性表现为 10.0%,16.0%,22.0%和 28.0%组均显著高于对照组($P<0.05$)。

表 2 饲料碳水化合物水平对洛氏鲮蛋白酶活性的影响

Table 2 Effects of dietary fat level on protease activities of <i>Rhynchocypris lagowskii</i> Dybowski					U/g
饲料碳水化合物水平/% Carbohydrate levels	肝胰脏 Hepatopancrea	前肠 Fore intestine	中肠 Middle intestine	后肠 Hind intestine	
0.0(CK)	1 451.13±52.33 b	917.47±23.06 a	955.12±47.39 a	1 025.30±69.20 a	
10.0	1 561.66±88.40 c	999.02±28.44 c	1 050.60±30.65 c	1 079.16±16.42 c	
16.0	1 576.63±56.97 c	1 011.45±31.86 d	1 171.13±59.10 e	1 175.55±46.03 e	
22.0	1 569.93±84.94 c	996.64±15.13 c	1 124.90±23.71 d	1 125.44±82.27 d	
28.0	1 312.32±85.68 a	943.37±50.94 b	1 016.83±13.91 b	1 033.33±64.15 b	

注:同列数据后标相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$),标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note: Same lowercase letters indicate insignificant difference($P>0.05$), while different lowercase letters indicate significant difference($P<0.05$). The same below.

2.1.2 淀粉酶活性 饲料碳水化合物水平对洛氏鲮淀粉酶活性的影响见表 3。

表 3 饲料碳水化合物水平对洛氏鲮淀粉酶活性的影响

Table 3 Effects of dietary fat level on amylase activities of <i>Rhynchocypris lagowskii</i> Dybowski					U/g
饲料碳水化合物水平/% Carbohydrate levels	肝胰脏 Hepatopancrea	前肠 Fore intestine	中肠 Middle intestine	后肠 Hind intestine	
0.0(CK)	15.55±2.15 b	4.35±0.08 a	3.68±0.02 b	3.33±0.01 a	
10.0	16.73±1.11 c	4.46±0.02 b	3.72±0.02 b	3.48±0.03 b	
16.0	17.67±0.91 d	4.73±0.03 c	5.49±0.07 d	3.65±0.05 c	
22.0	14.43±1.75 a	4.97±0.01 e	4.18±0.03 c	3.67±0.04 c	
28.0	14.29±0.95 a	4.78±0.19 d	3.34±0.09 a	3.22±0.02 a	

从表 3 可知,饲料碳水化合物水平对洛氏鲮肝胰脏淀粉酶活性有显著影响,随着饲料碳水化合物水平升高呈先上升后下降的趋势,其中 10.0%和 16.0%组肝胰脏淀粉酶活性显著高于对照组($P<0.05$),而 22.0%和 28.0%组显著低于对照组($P<0.05$);前肠和后肠淀粉酶活性随着饲料碳水化合物水平升高也呈先上升后下降趋势,当碳水化合物水平为 22.0%时达到最高值,且 10.0%,16.0%,

22.0%和28.0%组显著高于对照组($P<0.05$);中肠淀粉酶活性随着饲料碳水化合物水平升高也呈先上升后下降趋势,当碳水化合物水平为16.0%时达到最高值,且16.0%和22.0%组显著高于对照组($P<0.05$),而10.0%组与对照组差异不显著($P>0.05$),28.0%组显著低于对照组($P<0.05$)。

表 4 饲料碳水化合物水平对洛氏鲮脂肪酶活性的影响

Table 4 Effects of dietary fat level on lipase activities of <i>Rhynchocypris lagowskii</i> Dybowski				U/g
饲料碳水化合物水平/% Carbohydrate levels	肝胰脏 Hepatopancrea	前肠 Fore intestine	中肠 Middle intestine	后肠 Hind intestine
0.0(CK)	10.33±1.82 a	16.18±1.40 a	10.93±0.00 a	6.90±0.28 a
10.0	14.54±2.12 b	16.91±1.38 b	13.27±0.00 b	9.58±0.30 b
16.0	15.29±0.95 c	19.07±0.79 d	18.04±0.00 d	15.26±0.00 c
22.0	22.09±4.44 e	20.26±1.16 e	18.36±0.82 e	15.61±0.33 c
28.0	20.58±2.85 d	17.68±1.11 c	16.67±0.26 c	9.24±0.84 b

2.2 饲料碳水化合物水平对洛氏鲮糖代谢酶活性的影响

表 5 表明,洛氏鲮肝胰脏己糖激酶、丙酮酸激酶、果糖-1,6-二磷酸酶活性及肝糖原含量均随着饲料碳水化合物水平的升高呈先升高后下降趋势。饲料碳水化合物水平为16.0%和22.0%时,洛氏鲮肝胰脏己糖激酶活性显著高于对照组($P<0.05$),而10.0%和28.0%组与对照组差异不显著($P>0.05$);丙酮酸激酶活性在饲料碳水化合物水平为

2.1.3 脂肪酶活性 从表 4 可以看出,饲料碳水化合物水平对洛氏鲮肝胰脏及前肠、中肠和后肠脂肪酶活性有显著影响,均随着饲料碳水化合物水平升高呈先上升后下降的趋势,当碳水化合物水平为22.0%时达到最高值;对照组显著低于其他各组($P<0.05$)。

22.0%时达到最高值,且16.0%,22.0%和28.0%组显著高于对照组($P<0.05$),而10.0%组与对照组差异不显著($P>0.05$);果糖-1,6-二磷酸酶活性在饲料碳水化合物水平为16.0%和22.0%组时显著高于对照组($P<0.05$),而10.0%和28.0%组与对照组差异不显著($P>0.05$);肝糖原含量则在饲料碳水化合物水平为22.0%和28.0%时显著高于对照组($P<0.05$),而10.0%和22.0%组与对照组差异不显著($P>0.05$)。

表 5 饲料碳水化合物水平对洛氏鲮糖代谢酶活性的影响

Table 5 Effects of dietary fat level on activities of carbohydrate metabolic enzymes of <i>Rhynchocypris lagowskii</i> Dybowski				
饲料碳水化合物水平/% Carbohydrate levels	己糖激酶/(U·g ⁻¹) Hexokinase	丙酮酸激酶/(U·g ⁻¹) Pyruvatekinas	果糖-1,6-二磷酸酶/(U·g ⁻¹) Fructose 1,6-bisphosphatase	肝糖原/(mg·g ⁻¹) Liver glycogen
0.0(CK)	5.39±0.28 a	32.84±1.36 a	10.876±0.96 a	5.70±0.64 a
10.0	5.81±0.41 a	36.84±3.92 ab	12.13±1.32 ab	6.12±0.20 a
16.0	10.76±1.09 b	44.09±4.96 b	43.22±2.60 d	7.16±0.73 ab
22.0	9.82±0.25 b	68.65±5.89 d	26.39±2.77 c	9.75±0.64 c
28.0	5.80±1.09 a	55.95±4.12 c	13.00±2.71 ab	8.28±0.55 b

3 讨 论

3.1 饲料碳水化合物水平对洛氏鲮消化酶活性的影响

3.1.1 蛋白酶活性 大量研究表明,消化酶活性的高低在一定程度上反映了机体对营养物质的消化程度,饲料营养物质水平的改变极易引起酶活性的变化。消化器官内的蛋白酶主要用于消化蛋白质,其活性高低可以反映蛋白质的利用程度^[2]。本试验结果表明,肝胰脏和肠道蛋白酶活性均随着饲料碳水化合物水平的升高呈先上升后下降的趋势,当碳水化合物水平为16.0%时达到最高值。通过饲养试验得出,洛氏鲮终末体质量、体质量增加率、特定生长率、饲料效率、蛋白质效率均随碳水化合物水平的

升高呈先升高后降低的趋势,其中当碳水化合物水平为16.0%时最高,其洛氏鲮的终末体质量、体质量增加率显著高于对照组($P<0.05$)(数据尚未发表),可知两者研究结果相吻合。李晋南等^[4]在松浦镜鲤上的研究表明,高淀粉组蛋白酶活性显著高于低淀粉组,呈上升趋势。郝甜甜等^[13]在对大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)的研究中发现,饲料中添加糖萆素使肠道蛋白酶活性呈先升后降趋势,显著提高了蛋白酶活性,这与本试验结果相似。说明草食性或杂食性鱼类摄食含碳水化合物的饲料后,蛋白酶活性也会表现出较强的可塑性^[2],饲料中添加适宜的碳水化合物可以提高机体对蛋白质的消化吸收能力,进而达到节约蛋白质的效果。Shias 等^[14]在点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)上的研究

亦证明了在饲料中添加碳水化合物具有节约蛋白质的作用。

3.1.2 淀粉酶活性 饲料中碳水化合物水平的变化直接影响消化器官内淀粉酶的活性,虽然鱼类的淀粉酶活性较其他种类消化酶活性低,这与食物组成的变化存在一定相关性,也是鱼类对生态环境的一种适应^[15]。本试验结果表明,随着饲料碳水化合物水平的升高,肝胰脏和肠道淀粉酶活性呈先上升后下降的趋势,这表明一定范围内饲料碳水化合物水平的升高可以调动淀粉酶活性的提高,加快体内糖的代谢。这可能与洛氏鲮的杂食性特征有关。郝甜甜等^[13]对大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)的研究表明,饲料中添加糖萜素使肠道淀粉酶活性呈先上升后下降趋势。任鸣春等^[16]对团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)的研究表明,肝脏淀粉酶活性随饲料淀粉水平的增加呈先上升后下降趋势。于艳梅^[17]对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)的研究表明,肠道淀粉酶活性随魔芋甘露寡糖添加浓度的增加呈先升高后降低的趋势,这与本试验结果相似。吴凡等^[18]在奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)上的研究也验证了这一点。

3.1.3 脂肪酶活性 脂肪酶在鱼类分泌系统中的主要分泌器官是肝胰脏,它能够切断酯键的酯酶,水解甘油酯、磷脂和蜡酯。本试验表明,随着饲料碳水化合物水平升高,洛氏鲮肝胰脏及前肠、中肠和后肠脂肪酶活性呈先上升后下降的趋势,当碳水化合物水平为 22.0% 时达到最高值,且 10.0%, 16.0%, 22.0% 和 28.0% 组均显著高于对照组。于艳梅^[17]对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)的研究表明,肠道脂肪酶活性随魔芋甘露寡糖添加浓度的增加呈先升高后降低的趋势。郭本月等^[19]在牙鲆(*Paralichthys*)上的研究表明,糖胁迫使脂肪酶活性呈先升高后降低趋势,与本试验结果一致。说明一定范围内饲料碳水化合物水平的升高可以提高脂肪酶的活性,进而提升洛氏鲮这种杂食性且偏植物性鱼类对脂肪的利用能力。但亦有不同的研究结果出现,如韩勃等^[20]在淡水黑鲷(*Hephaestus fuliginosus*)和王猛强等^[21]在大黄鱼(*Larimichthys crocea* Richardson)上的研究均表明,饲料碳水化合物水平对肠道脂肪酶活性无显著影响,这可能与不同试验鱼类的食性差异有关。

3.2 饲料碳水化合物水平对洛氏鲮糖代谢酶活性的影响

糖代谢过程主要包括糖的分解与合成,即糖酵

解和糖异生过程,二者的共同调节才能维持鱼类的血糖稳态。调节鱼类糖代谢的关键酶有很多,本试验选取己糖激酶、丙酮酸激酶、果糖-1,6-二磷酸酶及肝糖原含量作为衡量饲料碳水化合物水平调控洛氏鲮糖代谢的指标。己糖激酶可以催化葡萄糖为葡萄糖 6 磷酸(G-6-P)用于糖原合成。本试验结果表明,随着饲料碳水化合物水平升高,己糖激酶活性呈先升高后降低的趋势,说明一定范围内增加饲料碳水化合物水平可以提高洛氏鲮肝胰脏的糖代谢能力。类似的研究结果也出现在对大黄鱼报道中,邢淑娟等^[22]研究表明,随饲料中糖水平的升高,大黄鱼肝脏己糖激酶活性先上升后下降,在糖含量为 21.15% 时达到最大值。然而,戈贤平等^[23]对翘嘴红鲌(*Erythroculter ilishaeformis* Bleeker)的研究却表明,己糖激酶活性在中碳水化合物水平(14.45%)时降低,高碳水化合物组(23.98%)与对照组无显著性差异。这可能是与其食性(翘嘴红鲌为肉食性)不同有关。

丙酮酸激酶可调节细胞中 ATP、ADP 和糖酵解的中间产物,催化磷酸烯醇式丙酮酸转变为丙酮酸,是催化糖酵解最后一步的关键酶。本试验结果表明,与对照相比,饲料中碳水化合物水平升高后,丙酮酸激酶随之升高,说明饲料碳水化合物水平可增加洛氏鲮肝胰脏丙酮酸激酶活性,使得糖酵解途径得到加强,Fernandez 等^[24]对金头鲷(*Sparus aurata*)和 Enes 等^[25]对舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)的研究也得出类似的结果。本研究中,在碳水化合物水平达到 28.0% 时,丙酮酸激酶活性仍显著高于对照组,表明糖酵解能力增强,说明洛氏鲮对高糖具有较高的耐受力。但类似试验仍有结果不一致的现象,如在鲤鱼和斑点叉尾鲷(*Leiostichus xanthurus* Günther)上的研究结果呈相反趋势,即随碳水化合物水平升高,肝脏丙酮酸激酶活性降低^[26],而大黄鱼(*Larimichthys crocea* Richardson)肝脏丙酮酸激酶活性随饲料小麦淀粉水平的升高呈先降低后升高趋势^[27]。因此,饲料中碳水化合物水平对鱼类肝脏丙酮酸激酶活性的影响仍需进一步研究。

本研究中,糖异生酶果糖-1,6-二磷酸酶活性随着饲料碳水化合物水平的升高呈先升高后降低的趋势,当碳水化合物水平为 28.0% 时与对照组无显著差异,表明洛氏鲮体内的葡萄糖稳态失衡可能与糖异生酶活性不受饲料糖含量的调节有关,这与 Moon^[28]对大黄鱼的研究结果类似。但聂琴等^[8]在

大菱鲆上的研究显示,当饲料中葡萄糖添加量为 5% 时显著促进了果糖-1,6-二磷酸酶活性,当葡萄糖添加量升高至 15% 或 28% 时,果糖-1,6-二磷酸酶活性与对照组无显著差异,且在糊精组中果糖-1,6-二磷酸酶活性受到饲料添加糊精的显著抑制。这一结果说明大菱鲆体内可能存在较为完善的糖异生调节机制,但具体调控因素仍有待于进一步研究。

鱼类摄入饲料糖后有一部分以糖原的形式储存起来,储存糖原的主要部位是肝脏和肌肉。本试验结果表明,随着饲料中碳水化合物水平的升高,肝糖原含量先升后降,当碳水化合物水平为 22.0% 时肝糖原含量达到最大值,这可能是因为饲料碳水化合物水平的升高增加了鱼体内糖的积累,这有助于调控摄食碳水化合物饲料后过高的血糖。肝糖原累积量与饲料中的碳水化合物水平在一定范围内呈正相关^[29],但肝糖原的大量累积会使肝细胞功能受损,导致肝细胞出现肿大或空泡化^[30]。因此,鱼体内肝糖原的累积并不是越多越好,且不同鱼类因食性、碳水化合物的来源及生存环境等因素的不同,其肝糖原的沉积结果亦存在差异,这还需具体分析。

[参考文献]

- [1] Dvid A J. Dietary carbohydrate utilization by fish [J]. Reviews in Fisheries Science, 2003, 11(4): 337-369.
- [2] 高梅, 罗毅平, 曹振东. 饲料碳水化合物对南方鲇 (*Silurus meridionalis* Chen) 幼鱼消化酶活性的影响 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2006, 31(2): 119-123.
Gao M, Luo Y P, Cao Z D. Effects of dietary carbohydrate on digestive enzyme activities in juveniles of *Silurus meridionalis* Chen [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science), 2006, 31(2): 119-123.
- [3] Zhou C, Ge X, Niu J, et al. Effect of dietary carbohydrate levels on growth performance, body composition, intestinal and hepatic enzyme activities, and growth hormone gene expression of juvenile golden pompano, *Trachinotus ovatus* [J]. Aquaculture, 2015, 437: 390-397.
- [4] 李晋南, 王常安, 王连生, 等. 不同糖种类及糖水平对松浦镜鲤肠道消化酶活性及肠道和肝脏组织结构的影响 [J]. 动物营养学报, 2016, 28(10): 3217-3224.
Li J N, Wang C A, Wang L S, et al. Effects of different sugar types and sugar levels on intestinal digestive enzyme activities and intestinal and liver tissues of Songpo Mirror Carp [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(10): 3217-3224.
- [5] Cui X, Zhou Q, Ling H, et al. Effects of dietary carbohydrate sources on the growth performance and hepatic carbohydrate metabolic enzyme activities of juvenile cobia (*Rachycentron canadum* Linnaeus.) [J]. Aquaculture Research, 2010, 42(1): 99-107.
- [6] Hung S S, Fynnaikins F K, Lutes P B, et al. Ability of juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) to utilize different carbohydrate sources [J]. Journal of Nutrition, 1989, 119(5): 727.
- [7] Suarez 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.
- [8] 聂琴, 苗惠君, 苗淑琛, 等. 不同糖源及糖水平对大菱鲆糖代谢酶活性的影响 [J]. 水生生物学报, 2013, 37(3): 425-433.
Nie Q, Miao H J, Miao S Y, et al. Effects of different sugar sources and sugar levels on activities of carbohydrate metabolism enzymes in turbot [J]. Journal of Hydrobiology, 2013, 37(3): 425-433.
- [9] 张永泉, 白庆利, 徐伟, 等. 黑龙江流域绥芬河水系洛氏鲮个体繁殖力的研究 [J]. 水产学杂志, 2015, 28(1): 29-33.
Zhang Y Q, Bai Q L, Xu W, et al. Individual fecundity of minnow *Phoxinus lagowskii* Dybowski collected in Suifen river in Heilong river valley [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2015, 28(1): 29-33.
- [10] 康鑫, 张远, 张楠, 等. 太子河洛氏鲮幼鱼栖息地适宜度评估 [J]. 生态毒理学报, 2011, 6(3): 310-320.
Kang X, Zhang Y, Zhang N, et al. Assessment of habitat suitability of juvenile *Phoxinus lagowskii* in Taizi river [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(3): 310-320.
- [11] 张永泉, 尹家胜, 杜佳, 等. 洛氏鲮肌肉某些营养成分分析和肉质蛋白质营养价值评价 [J]. 营养学报, 2013, 35(4): 406-410.
Zhang Y Q, Yin J S, Du J, et al. Analysis of some nutritional components and evaluation of muscle protein of *Phoxinus lagowskii* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 35(4): 406-410.
- [12] 郭文学, 张永泉, 佟广香, 等. 黑龙江流域绥芬河水系野生洛氏鲮胚胎发育 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2530-2536.
Guo W X, Zhang Y Q, Tong G X, et al. Embryonic development of wild *Phoxinus lagowskii* collected from Suifen river in Heilong river [J]. Journal of Ecology, 2015, 34(9): 2530-2536.
- [13] 郝甜甜, 张利民, 李宝山, 等. 饲料中添加糖萜素对大菱鲆幼鱼体成分、消化酶活力、血脂及肠道组织结构的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(3): 391-402.
Hao T T, Zhang L M, Li B S, et al. Effect of adding sacchariterpeter in feed on body composition, digestive enzyme activity, serum lipids and intestinal tissue in juvenile turbot [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(3): 391-402.
- [14] Shias S Y, Lin Y H. Carbohydrate utilization and its protein-sparing effect in diets for grouper (*Epinephelus malabaricus*) [J]. Animal Science, 2016, 73(2): 299-304.
- [15] 李淑云, 刘泓宇, 谭北平, 等. 饲料中糖水平对不同食性海水鱼类 PEPCK 基因表达和酶活性的影响 [J]. 水生生物学报, 2015, 39(1): 80-89.
Li S Y, Liu H Y, Tan B P, et al. Effects of dietary sugar levels on PEPCK gene expression and enzyme activity indifferent

- feeding marine saltwater fishes [J]. Journal of Hydrobiology, 2015, 39(1): 80-89.
- [16] 任鸣春, 贾文锦, 戈贤平, 等. 饲料不同淀粉水平对团头鲂成鱼生长性能、消化酶活性及肌肉成分的影响 [J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1494-1502.
Ren M C, Jia W J, Ge X P, et al. Effects of different starch levels on growth performance, digestive enzyme activities and muscle composition of adult juvenile [J]. Journal of Fisheries, 2014, 38(9): 1494-1502.
- [17] 于艳梅. 魔芋甘露寡糖对黄颡鱼的益生功能研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
Yu Y M. Probiotics of konjac oligosaccharides on yellow catfish [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [18] 吴凡, 文华, 蒋明, 等. 饲料碳水化合物水平对吉富罗非鱼幼鱼生长性能和血液主要生化指标的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 8-14.
Wu F, Wen H, Jiang M, et al. Effects of different dietary carbohydrate levels on growth performance and blood biochemical parameters of juvenile GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 40(12): 8-14.
- [19] 郭本月, 韩冬冬, 张文兵, 等. 糖胁迫对牙鲆肝脏代谢和肠道消化相关酶活性的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 2017(3): 85-90.
Guo B Y, Han D D, Zhang W B, et al. Enzyme activity stress associated carbohydrate digestion and intestinal metabolism in the liver of flounder [J]. Marine Lakes Bulletin, 2017(3): 85-90.
- [20] 韩勃, 宋理平. 饲料淀粉水平对淡水黑鲟生长和消化酶活性的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(2): 207-213.
Han B, Song L P. Effect of feed starch level on growth and digestive enzyme activities of *Hephaestus fuliginosus* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(2): 207-213.
- [21] 王猛强, 黄文文, 周飘苹, 等. 不同蛋白质和小麦淀粉水平对大黄鱼生长性能、糖酵解和糖异生关键酶活性的影响 [J]. 水产学报, 2015, 39(11): 1690-1701.
Wang M Q, Huang W W, Zhou P P, et al. Effects of dietary protein and wheat starch levels on growth performance, hepatic glycolysis and gluconeogenic keyenzymes activities in large yellow croaker (*Larimichthys crocea* Richardson) [J]. Journal of Fisheries, 2015, 39(11): 1690-1701.
- [22] 邢淑娟, 孙瑞健, 马俊, 等. 饲料糖水平对大黄鱼生长和糖代谢的影响 [J]. 水生生物学报, 2017, 41(2): 265-276.
Xing S J, Sun R J, Ma J, et al. Effects of dietary carbohydrate on growth performance and glycometabolism of large yellow croaker *larimichthys crocea* [J]. Journal of Hydrobiology, 2017, 41(2): 265-276.
- [23] 戈贤平, 刘波, 谢骏, 等. 饲料中不同碳水化合物水平对翘嘴红鲌生长及血液指标和糖代谢酶的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2007, 30(3): 88-93.
Ge X P, Liu B, Xie J, et al. Effect of different carbohydrate levels of dietary on growth, plasma biochemical indices and hepatic pancreas carbohydrate metabolic enzymes in topmouth culter (*Erythroculter ilishaeformis* Bleeker) [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2007, 30(3): 88-93.
- [24] Fernandez F, Anna G M, Cordoba M, et al. Effects of diets with distinct protein-to-carbohydrate ratios on nutrient digestibility, growth performance, body composition and liver intermediary enzyme activities in gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) fingerlings [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, 343: 1-10.
- [25] Enes P, Panerat S, Kauhik S. 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, 2006, 143: 89-96.
- [26] Tan Q, Xie S, Zhu X, et al. Effect of dietary carbohydrate sources on growth performance and utilization for gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) and Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther) [J]. Aquaculture Nutrition, 2006, 12(1): 61-70.
- [27] 马红娜, 王猛强, 陆游, 等. 碳水化合物种类和水平对大黄鱼生长性能、血清生化指标、肝脏糖代谢相关酶活性及肝糖原含量的影响 [J]. 动物营养学报, 2017(3): 824-835.
Ma H N, Wang M Q, Lu Y, et al. Effects of carbohydrate type and level on growth performance, serum biochemical indices, hepatic glycometabolism related enzyme activities and hepatic glycogen content of large yellow croaker (*Larimichthys crocea* Richardson) [J]. Journal of Animal Nutrition, 2017(3): 824-835.
- [28] Moon T W. Glucosein tolerance in teleost fish: fact or fiction [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part B Biochemistry & Molecular Biology, 2001, 129(2/3): 243.
- [29] Lee S M, Lee J H. Effect of dietary glucose, dextrin and starch on growth and body composition of juvenile starry flounder *Platichthys stellatus* [J]. Fisheries Science, 2010, 70(1): 53-58.
- [30] Rawles S D, Iii D M G. Carbohydrate utilization in striped bass (*Morone saxatilis*) and sunshine bass (*M. chrysops*, ♀ × *M. saxatilis*, ♂) [J]. Aquaculture, 1998, 161(1/2/3/4): 201-212.