

七种不同结构糖源对凡纳滨对虾三大营养物质代谢的影响

王美雪, 郭冉*, 夏辉, 申亮, 李垚垚,
解伟, 李赵嘉, 沈庆洲

(河北农业大学海洋学院, 河北秦皇岛 066000)

摘要: 本实验研究了不同结构糖源饲料对初始体质量为(0.14±0.01) g的凡纳滨对虾生长、体组成及相关代谢的影响。实验共设7个处理, 基础饲料中分别添加7种结构不同的糖源: 葡萄糖、果糖、葡萄糖+果糖(1:1)、蔗糖、麦芽糖、玉米淀粉和糊精, 添加水平为20%。每处理设3个平行, 每个平行放50尾虾, 实验期56 d。结果表明, 实验饲料对凡纳滨对虾的特定生长率和蛋白质效率有显著影响, 呈现多糖>蔗糖>其他, 其中葡萄糖组最低; 实验饲料对凡纳滨对虾的全虾水分、灰分、蛋白质无显著影响, 但对脂肪、肝糖原、肌糖原的影响显著。不同结构的糖源饲料对糖代谢相关酶及产物产生显著影响, 对脂肪和蛋白代谢酶及产物影响不显著。

关键词: 凡纳滨对虾; 糖源结构; 生长; 代谢

中图分类号: S 963.1

文献标志码: A

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生长快, 抗病能力强, 营养丰富, 养殖产量逐年提高, 为我国重要的水产养殖动物之一。对虾的天然饵料中蛋白质为主要营养物质, 但是对虾对蛋白质的利用实际上存在很大的浪费^[1]。关于对虾的天然饵料的调查显示, 中小型无脊椎动物糖原的含量很高, 如对虾的饵料——贻贝(*Mytilus edulis*)中含有20%的糖原^[2]。由此可以推断, 对虾能够适应饵料中加入一定水平的可消化多糖, 尽管糖类的平均吸收率比蛋白质低20%, 但糖在对虾的能量代谢中仍然起着很大的作用^[3]。

国内外学者针对糖源水平及种类对对虾营养物质利用的影响做了大量实验^[4-7], 实验证明饲料中适宜的糖水平有利于蛋白质的节约。在集约化养殖过程中, 可以通过提高糖的利用而减少蛋白质的浪费, 起到节约蛋白质的效果^[8]。

以往研究将凡纳滨对虾适宜的糖源水平确定在20%左右, 但是不同养殖环境下, 最适宜的糖源种类却不尽相同^[9-13], 淀粉和蔗糖被认为是最适糖源, 同位素示踪法应用于甲壳动物存在一

定的实验条件限制, 所以甲壳动物糖代谢机理相关的研究还相对较少, 无法说明最适糖源选择的本质原因。故本实验将在饲料中添加7种不同结构的糖源, 糖源选取依据见表1。通过在同样的养殖环境和饲喂条件下测定其生长性能、体组成、三大营养物质相关代谢酶及代谢产物的含量变化, 来分析不同结构的糖源在虾体内的代谢去向及对生长性能的影响, 为凡纳滨对虾的营养生理和饲料配制提供科学的参考依据。

1 材料与amp;方法

1.1 实验饲料的配制

以鱼粉和豆粕为蛋白源, 鱼油、卵磷脂和玉米油为脂肪源, 以20%的葡萄糖、果糖、葡萄糖+果糖(1:1)、蔗糖、麦芽糖、玉米淀粉、糊精分别为糖源配制7种实验饲料。饲料原料经粉碎后过80目筛, 按照比例混合, F-26双螺杆压条机(广东: 华南理工大学科技实业总厂)挤压出直径

收稿日期: 2015-09-11 修回日期: 2015-12-13

资助项目: 河北农业大学青年学术带头人项目

通信作者: 郭冉, E-mail: toguoran@163.com

表 1 糖源选取依据

Tab. 1 The basis of the selection of carbohydrate sources

糖源 carbohydrate	特点 characteristic	研究目的 research purposes
葡萄糖 glucose	单糖, 还原性	葡萄糖作用
果糖 fructose	单糖, 非还原性	果糖作用, 单糖分子结构对糖吸收利用的影响
葡萄糖+果糖 (1:1) glucose+fructose	单糖混合糖	分解底物对糖吸收利用的影响
蔗糖 sucrose	双糖, 非还原性, 可分解为1分子果糖和1分子葡萄糖	是否作为双糖被直接吸收利用
麦芽糖 maltose	双糖, 还原性, 右旋, 可分解为2分子葡萄糖	还原性及酶的专一性对糖吸收利用的影响
玉米淀粉 cornstarch	多糖, 非还原性, 可分解为葡萄糖	被直接吸收还是被缓慢水解为葡萄糖后利用
糊精 dextrin	多糖, 非还原性, 可分解为葡萄糖	分子大小对糖吸收利用的影响

为1.2 mm的饲料, 出料温度为70 °C, 切碎, 烘箱60 °C熟化干燥30 min, 风干, 在-20 °C冰箱中冷冻保存备用。实验饲料配方及营养成分如表2所示。

1.2 实验动物的养殖管理

将仔虾在水族箱中暂养, 挑出初始体质量为(0.14±0.01) g、个体大小均匀健康的对虾进行实验。实验期为8周, 在实验室循环水族箱(40 cm×50 cm×60 cm)内进行。实验用水为天然海水, 盐度为29±1, 光周期为12 h: 12 h。7种饲料, 每个

处理3个平行, 共21个箱, 每箱50尾虾。开始实验后, 每天以虾体质量的5%~12%饱食投喂饲料, 记录饲料投喂量, 每天在7:00、13:30、19:00各投喂1次。每天定时测水温, 24 h增氧, 每天换入1/3过滤新鲜水, 每2周测pH值、溶氧和氨氮指标1次。水温为(26.7±1.0) °C, 水中溶氧量为(7.4±0.5) mg/L, pH 8.0~8.5, 氨氮含量为(0.5±0.1) mg/L。每天记录对虾死亡数目。

1.3 样品的采集与分析

实验结束空腹24 h后采样, 每箱称重并计

表 2 实验饲料配方及营养组成(风干基础)

Tab. 2 Formulation and composition of experimental diets

分组 group	1	2	3	4	5	6	7
原料 ingredients	葡萄糖 glucose	果糖 fructose	葡萄糖+果糖 (1:1) glucose+fructose	蔗糖 sucrose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 cornstarch	糊精 dextrin
糖源 carbohydrate	20	20	20	20	20	20	20
其他 others	80	80	80	80	80	80	80
合计 total	100	100	100	100	100	100	100
营养水平 nutrient levels							
粗蛋白质 CP	45.5	46.2	47.4	44.7	48.4	44.3	46.7
粗脂肪 EE	11.8	10.9	10.7	11.1	10.2	10.0	10.4
灰分 ash	9.9	9.8	10.2	9.8	10.1	9.9	9.9

注: 其他(%): 鱼粉 35, 虾粉 10, 豆粕 17, 纤维素 6, 卵磷脂 1, 鱼油 2, 玉米油 2, 胆碱 (w=50%) 0.5, 磷酸二氢钙 1, Vc磷酸脂 0.5, CMC 2, 复合维生素2(%): 氯化胆碱 5.55, 肌醇 2.22, VC 1.11, 泛酸钙 0.83, VB₁ 0.22, VB₂ 0.56, VB₆ 0.06, Vk 0.06, 叶酸 0.02, VB₁₂ 0.012, 生物素 0.006, 醋酸 α -生育酚 0.44, 纤维素 88.87; 复合矿物质1 (%): Ca (H₂PO₄)₂·2H₂O 12.29; 乳酸钙 47.42; NaH₂PO₄·2H₂O 4.20, NaCl 3.23, K₂SO₄ 16.38, KCl 6.58; FeSO₄·7H₂O 1.07, 柠檬酸铁 3.83, MgSO₄·7H₂O 4.42, Zn SO₄ 0.47, MnSO₄·H₂O 0.033, CuSO₄·5H₂O 0.022, CoCl₂·6H₂O 0.043, KIO₄ 0.022

Notes: others(%): fish meal 35, shrimp meal 10, defatted soybean meal 17, cellulose 6, soybean lecithin 1, fish oil 2, corn oil 2, choline chloride (w=50%) 0.5, KH₂PO₄ 1, ascorbic phosphate 0.5, CMC 2, vitamin mixture 2(%): choline chloride 5.55, inositol 2.22, VC 1.11, calcium pantothenate 0.83, VB₁ 0.22, VB₂ 0.56, VB₆ 0.06, Vk 0.06, folic acid 0.02, VB₁₂ 0.012, biotin 0.006, alpha tocopherol acetate 0.44, cellulose 88.87; mineral mixture 1 (%): Ca (H₂PO₄)₂·2H₂O 12.29; calcium lactate 47.42; NaH₂PO₄·2H₂O 4.20, NaCl 3.23, K₂SO₄ 16.38, KCl 6.58; FeSO₄·7H₂O 1.07, ferric citrate 3.83, MgSO₄·7H₂O 4.42, Zn SO₄ 0.47, MnSO₄·H₂O 0.033, CuSO₄·5H₂O 0.022, CoCl₂·6H₂O 0.043, KIO₄ 0.022

数, 计算生长性能, 从每箱中随机取出5尾虾, 吸干表面水分, 105 °C烘至恒重制备全虾样品, 测定体营养成分。水分用烘干(105 °C)失重法; 粗蛋白用凯氏定氮法(N×6.25); 脂肪用索氏抽提法; 灰分用马弗炉灰化法(550 °C, 9 h)。每箱随机取空腹24 h的12尾虾取其肝胰腺进行相关代谢酶的测定, 其中包括脂肪代谢相关酶(苹果酸脱氢酶)、糖代谢相关酶(己糖激酶、磷酸果糖激酶、丙酮酸激酶、 α -酮戊二酸脱氢酶复合体)、蛋白质代谢相关酶(谷氨酰胺合成酶), 方法参照文献[14–17]。每箱在饲喂前和饲喂后2、4、7 h随机取3尾虾抽血, 离心沉淀过夜后送至医院测定不同时段血糖和饲喂前总蛋白、总胆固醇和甘油三酯含量; 同时取饲喂前肝胰腺和肌肉吸干水分并称量, 测定肝/肌糖原含量。肝/肌糖原使用南京建成试剂盒进行测定。根据最后一周测定的水体氨氮含量来计算排氮率。

特定生长率(SGR, %/d)=[(ln平均终末体质量–ln平均初始体质量)/饲养时间(d)]×100;

存活率(SR, %)=实验结束时对虾尾数/实验开始时对虾尾数×100;

蛋白质效率(PER)=体质量增加量/蛋白质摄入量;

饲料系数(FCR)=投入饲料量(g)/体质量增加量(g)。

1.4 数据分析

实验结果以平均值±标准差(mean±SD)表示, 数据统计应用Duncan氏多重比较分析实验结果差异显著性, $P<0.05$ 表示差异显著, 统计软件使用SPSS 17.0。

2 结果

2.1 不同糖源对凡纳滨对虾生长性能的影响

各实验组间凡纳滨对虾的特定生长率、蛋白质效率存在显著差异($P<0.05$, 表3), 均呈现多糖>蔗糖>其他组, 玉米淀粉组和糊精组最高, 葡萄糖组最低, 蔗糖与麦芽糖2种双糖相比蔗糖对生长的优势较大些, 单糖中果糖效果较好。各实验组间凡纳滨对虾的存活率、饲料系数无显著差异($P>0.05$)。

2.2 不同糖源对凡纳滨对虾体营养成分的影响

不同糖源的饲料对凡纳滨对虾全虾的水分、灰分和蛋白质含量影响均不显著($P>0.05$, 表4), 但是全虾的粗脂肪含量差异显著($P<0.05$), 麦芽糖、葡萄糖、果糖、蔗糖组的全虾粗脂肪含量显著高于淀粉、混合单糖和糊精组。糖原数据显示, 肝糖原、肌糖原含量存在显著差异($P<0.05$), 肝糖原葡萄糖、果糖组显著低于其他各组。肌糖原玉米淀粉组最高, 麦芽糖组最低。

2.3 不同糖源对凡纳滨对虾三大营养物质相关代谢酶的影响

不同糖源饲料对凡纳滨对虾体内的 α -酮戊二酸脱氢酶、磷酸果糖激酶、己糖激酶存在显著影响($P<0.05$, 表5)。 α -酮戊二酸脱氢酶活力蔗糖组显著高于葡萄糖组($P<0.05$); 磷酸果糖激酶活力: 玉米淀粉组和糊精组显著高于混合单糖组($P<0.05$); 己糖激酶活力: 混合单糖组和麦芽糖组显著高于其他各组($P<0.05$)。但是对脂肪代谢酶—苹果酸脱氢酶、糖代谢酶—丙酮酸激酶以及蛋白质代谢酶—谷氨酰胺合成酶影响均不显

表3 不同糖源对凡纳滨对虾生长性能的影响

Tab. 3 Effect of different carbohydrate sources on growth performance of *L. vannamei*

糖源 carbohydrate	葡萄糖 glucose	果糖 fructose	葡萄糖+果糖(1:1) glucose+fructose	蔗糖 sucrose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 cornstarch	糊精 dextrin
存活率/% SR	85.33±5.77	84.00±6.00	83.33±8.08	89.33±4.62	91.33±2.31	90.00±8.72	88.67±9.87
初始体质量/g initial weight	0.14±0.008	0.15±0.003	0.14±0.002	0.14±0.005	0.14±0.006	0.14±0.001	0.14±0.002
终末体质量/g final weight	2.16±0.57 ^a	2.78±0.12 ^{ab}	2.66±0.55 ^{ab}	3.10±0.22 ^{bc}	2.70±0.48 ^{ab}	3.61±0.25 ^c	3.27±0.17 ^{bc}
特定生长率/% SGR	4.80±0.43 ^a	5.24±0.06 ^{ab}	5.20±0.34 ^{ab}	5.48±0.16 ^{bc}	5.23±0.25 ^{ab}	5.76±0.14 ^c	5.62±0.07 ^{bc}
蛋白质效率/% PER	1.10±0.16 ^a	1.26±1.35 ^{ab}	1.22±0.24 ^{ab}	1.32±0.13 ^{ab}	1.19±0.10 ^{ab}	1.58±0.56 ^{ab}	1.68±0.11 ^b
饲料系数 FCR	2.02±0.31	1.87±0.19	1.91±0.40	1.79±0.18	1.91±0.17	1.57±0.70	1.39±0.09

注: 同一行不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同

Notes: Different superscripts in each line indicate significant difference($P<0.05$), the same below

著 ($P>0.05$)。

2.4 不同糖源对凡纳滨对虾血淋巴中相关代谢产物的动态影响

总蛋白、甘油三酯、总胆固醇含量无明显差异 ($P>0.05$), 但是排氮率差异显著, 混合单糖组

明显高于果糖组、麦芽糖组、糊精组 ($P<0.05$, 表6)。血糖含量饲喂前无显著差异 ($P>0.05$), 葡萄糖组血糖含量最高, 混合单糖组最低; 在饲喂后 2 h, 葡萄糖组、混合单糖组、玉米淀粉组、糊精组血糖达到峰值; 蔗糖组在饲喂后 4

表 4 不同糖源对凡纳滨对虾体营养成分的影响

Tab. 4 Effect of different carbohydrate sources on body composition of *L. vannamei*

糖源 carbohydrate	葡萄糖 glucose	果糖 fructose	葡萄糖+果糖(1:1) glucose+fructose	蔗糖 sucrose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 cornstarch	糊精 dextrin
水分/% moisture	77.69±1.36	77.14±0.53	77.60±0.59	77.39±0.58	77.43±1.26	76.12±1.46	77.96±0.44
灰分/% ash	3.53±0.25	3.68±0.31	3.56±0.31	3.49±0.31	3.50±0.27	3.32±0.25	3.29±0.03
粗蛋白/% CP	16.67±0.55	17.51±1.17	17.50±0.51	16.98±0.75	17.15±1.60	18.22±0.70	16.56±0.90
粗脂肪/% EE	0.89±0.19 ^b	0.78±0.42 ^b	0.32±0.10 ^a	0.70±0.14 ^b	0.95±0.06 ^b	0.34±0.10 ^a	0.22±0.13 ^a
肝糖原/(mg/g) HG	0.73±0.11 ^a	2.54±2.27 ^a	4.81±0.47 ^b	5.37±1.14 ^b	5.35±0.11 ^b	5.67±0.51 ^b	4.92±0.76 ^b
肌糖原/(mg/g) MG	1.10±0.14 ^a	1.28±0.44 ^{ab}	1.00±0.05 ^a	1.00±0.12 ^a	0.96±0.09 ^a	1.64±0.12 ^b	1.43±0.40 ^{ab}

表 5 不同糖源对凡纳滨对虾代谢酶的影响

Tab. 5 Effect of different carbohydrate sources on metabolic enzymes of *L. vannamei*

糖源 carbohydrate	葡萄糖 glucose	果糖 fructose	葡萄糖+果糖(1:1) glucose+ fructose	蔗糖 sucrose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 cornstarch	糊精 dextrin
苹果酸脱氢酶/ (U/mg prot) MDH	1.17±0.81	1.32±0.51	0.92±0.69	1.91±0.66	0.87±0.67	1.52±0.59	1.41±0.10
丙酮酸激酶/ (U/g prot) PK	2497.33±782.23	2240.39±1222.76	2865.05±163.74	2826.82±849.67	1934.10±818.93	2294.17±129.73	2481.48±362.81
α -酮戊二酸脱氢 酶/(mg/mL) α - KGDHC	26.29±19.98 ^a	43.81±2.19 ^{ab}	40.38±11.26 ^{ab}	46.83±4.46 ^b	45.42±4.62 ^{ab}	39.04±9.76 ^{ab}	40.90±5.53 ^{ab}
磷酸果糖激酶/ (mg/mL) PFK	2.93±0.34 ^{ab}	3.18±0.43 ^{ab}	2.68±0.45 ^a	3.14±0.23 ^{ab}	3.07±0.37 ^{ab}	3.71±0.28 ^b	3.48±0.22 ^b
己糖激酶/ (U/g prot) HK	368.71±372.04 ^{ab}	244.21±134.64 ^a	799.15±118.42 ^c	279.19±170.85 ^{ab}	638.09±116.87 ^{bc}	399.08±70.81 ^{ab}	405.49±68.69 ^{ab}
谷氨酰胺合成酶/ (U/mg prot) GS	17.24±2.16	24.76±5.71	25.06±1.20	22.84±1.60	24.36±8.00	21.44±4.27	24.19±3.60

表 6 不同糖源对凡纳滨对虾代谢产物的影响

Tab. 6 Effect of different carbohydrate sources on metabolite of *L. vannamei*

糖源 carbohydrate	葡萄糖 glucose	果糖 fructose	葡萄糖+果糖(1:1) glucose+ fructose	蔗糖 sucrose	麦芽糖 maltose	玉米淀粉 cornstarch	糊精 dextrin
总蛋白/(g/L) TP	36.27±7.26	43.14±30.32	41.11±26.02	58.92±23.26	57.59±43.81	36.38±9.56	35.22±14.34
排氮率/(mg/L) AER	1.11±0.43 ^{ab}	0.69±0.35 ^a	2.15±0.79 ^b	1.10±0.21 ^{ab}	0.63±0.25 ^a	1.27±1.20 ^{ab}	0.58±0.23 ^a
甘油三酯/(mmol/L) TG	1.19±0.22	1.27±0.54	1.06±0.33	1.08±0.47	1.26±0.44	1.00±0.14	0.81±0.12
总胆固醇/(mmol/L) CHOL	0.55±0.12	0.63±0.32	0.50±0.19	0.52±0.12	0.60±0.17	0.43±0.07	0.35±0.06
饲喂前血糖/(mmol/L) GLU before feeding	0.82±0.09	0.61±0.20	0.53±0.32	0.57±0.15	0.71±0.19	0.77±0.34	0.63±0.27
饲喂后 2 h/(mmol/L) GLU after feeding 2 h	0.92±0.40 ^a	0.55±0.49 ^a	0.59±0.18 ^a	0.59±0.19 ^a	0.70±0.25 ^a	2.43±0.81 ^b	1.15±0.05 ^a
饲喂后 4 h/(mmol/L) GLU after feeding 4 h	0.51±0.23 ^a	0.39±0.06 ^a	0.50±0.10 ^a	0.71±0.30 ^a	0.32±0.03 ^a	1.52±0.99 ^b	0.84±0.23 ^{ab}
饲喂后 7 h/(mmol/L) GLU after feeding 7 h	0.41±0.08 ^a	0.49±0.18 ^a	0.27±0.24 ^a	0.37±0.09 ^a	0.48±0.11 ^a	0.43±0.19 ^a	0.78±0.18 ^b

h达到峰值；果糖组、麦芽糖组血糖含量出现了先降后升的现象。总体而言，各组血糖在2~4 h达到峰值。

3 讨论

凡纳滨对虾生长性能指标显示多糖组优于蔗糖组，更优于其他组。大量研究证明，大分子的淀粉和非还原性的蔗糖是对虾比较适合的糖源，而小分子还原性葡萄糖不利于对虾生长^[18-20]，与本实验结果一致。而对于对虾利用葡萄糖能力低的原因，目前存在2种观点：Shiau等^[21]认为是由于葡萄糖穿过消化道的速率较快，而双糖和多糖需要进一步酶解，所以通过消化道的速率相对比较慢，这样更有利于糖的吸收利用；另一种观点认为葡萄糖在肠道中会影响一些氨基酸的吸收。本实验结合对虾淋巴中总蛋白和排氨率的分析发现，葡萄糖与其他结构单糖、双糖和多糖相比较，对于蛋白质的吸收代谢影响并不显著，而饲喂前后血糖的变化，与Shiau等^[21]的第一种假设不谋而合。

不同结构的糖源被分解成小分子进入肝胰腺后，在己糖激酶的作用下磷酸化，一部分用于下一步能量代谢，另一部分在肝胰腺中转化为糖原、脂肪后转移到肌肉储存。吸收的单糖异化成糖原的需要底物、引物分子(未降解完全的糖原分子或糖原素)和糖原酶的共同作用^[22]，单糖吸收速率快，在血液中很快形成高浓度效应，于是被作用能量分解了，底物减少从而导致合成糖原比例减少，糖分直接用于能量代谢使得吸收的脂肪累积，但是当糖含量不足以直接提供能量的时候，能量代谢开始消耗其他营养物质，虽然脂肪用于能量代谢时的产能和耗能远高于糖原^[23]。实验数据显示，长期饲喂对虾，出现了单糖组的脂肪累积量高于其他组别，饥饿处理24 h后，三羧酸循环的限速酶(α -酮戊二酸脱氢酶)含量偏低，说明虾体并没有充分地利用脂肪和糖供能，从而导致了生长的能量减少，代谢缓慢，蛋白效率下降，生长性能低于分子量较大的双糖和多糖。

己糖激酶、磷酸果糖激酶的活力大小主要取决于底物的含量，由于不同饲料消化吸收后的单糖含量及比例存在差异，自然就影响了这2种酶的活力大小，糖原的含量也是其活力的限定因素^[24]。因为对于双糖和多糖来说，通过消化

道的速率主要受酶的影响，目前研究显示，甲壳动物体内存在淀粉酶、麦芽糖酶、几丁质酶和壳二糖酶，然而蔗糖酶却没有报道。麦芽糖酶可以从麦芽糖的非还原性末端切开 α -1,4糖苷键，释放出葡萄糖，但是蔗糖的非还原性末端连接键为 α , β -1,2糖苷键，肠道中不存在专一分解蔗糖的酶，所以蔗糖通过甲壳动物消化道的的时间较长，吸收利用缓慢。2种大分子多糖也因消化酶的作用而影响了吸收利用时间。蔗糖、玉米淀粉、糊精在消化后被吸收，在血液中形成血糖浓度时间长，血糖浓度变化缓慢，可以在较长时间内维持较高的血糖浓度，于是启动糖原合成通路，使糖原含量增加，当血糖含量不足以供能时，糖原再快速分解补充血糖，所以这3种糖利用程度更高，其中混合单糖和麦芽糖己糖激酶活力较蔗糖和多糖高很多，这也证实了蔗糖和多糖可以储存足够的糖原用于长时间的代谢供能，而混合单糖组磷酸果糖激酶活力较低，相反于己糖激酶活力，受2个原因影响，一是葡萄糖和果糖都是单纯地依赖 Na^+ 的运载系统，通过扩散方式通过细胞膜而被吸收利用，但是果糖的运载蛋白不同于葡萄糖，所以它们通过细胞膜的速率也不同^[25]；二是受代谢底物的差异性影响，果糖在己糖激酶催化下直接生成6-磷酸果糖，而磷酸果糖激酶是用于催化6-磷酸葡萄糖异构化为6-磷酸果糖的酶，从而加快了混合单糖的糖代谢速率，但是其较高的排氨率证实了饲喂混合单糖饲料的对虾能够利用较多的蛋白质作为能量来源，从而导致蛋白质沉积降低，生长较慢。 α -酮戊二酸脱氢酶的活性是能量代谢的速率控制的关键酶，蔗糖组酶活力显著高于葡萄糖组，受2个原因影响，一是蔗糖吸收速率慢，使得机体积累了糖原和脂肪用于先导能量代谢，同时加快代谢速率来促进糖的吸收，代谢速率加快，使得其生长性能提高；二是葡萄糖吸收利用较快，导致机体后续能量供应不足，从而降低了整体的代谢速率。

麦芽糖组与蔗糖组代谢途径不存在显著差异，但是单糖混合组与蔗糖组存在显著差异($P<0.05$)，说明双糖分解产物对糖代谢影响不大，而糖结构是影响糖代谢的重要因素。2种大分子多糖对于糖的吸收利用率大于其他各组，在其代谢途径中主要依靠糖作为能量来源，对蛋白质起到了一定的节约作用，故其生长性能

优于其他各组。

糖源对全虾的蛋白质、水分和灰分没有显著影响, 同时丙酮酸激酶、谷氨酰胺合成酶和苹果酸脱氢酶在各组间没有显著性差异, 但是长期实验结果却对蛋白质效率, 脂肪沉积产生了影响, 推测在适宜的糖源添加范围内, 为满足能量需求, 三大营养物质在体内的转换是一个复杂而缓慢的过程。

4 结论

综上所述, 凡纳滨对虾通过控制代谢途径及速率对其体营养组成进行了重新分配。机体对于糖源的利用受到分子量大小、双糖连接键和糖分子空间构象的影响, 大分子淀粉、糊精和非还原性的蔗糖对生长促进作用最佳, 小分子的还原性葡萄糖作用最差。

参考文献:

- [1] 孙燕军, 龙勇. 南美白对虾营养需求的研究进展[J]. 齐鲁渔业, 2007, 24(5): 39-41.
Sun Y J, Long Y. The research progress of *Litopenaeus vannamei* nutrition demand [J]. Shandong Fisheries, 2007, 24(5): 39-41 (in Chinese).
- [2] Sedgwick R W. Influence of dietary protein and energy on growth, food consumption and food conversion efficiency in *Penaeus merguensis* de Man [J]. Aquaculture, 1979, 16(1): 7-30.
- [3] Fenucci J L, de Fenucci A C, Lawrence A L, et al. The assimilation of protein and carbohydrate from prepared diets by the shrimp, *Penaeus stylirostris* [J]. Journal of the World Mariculture Society, 1982, 13(1-4): 134-145.
- [4] Rosas C, Cuzon G, Gaxiola G, et al. Influence of dietary carbohydrate on the metabolism of juvenile *Litopenaeus stylirostris* [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2000, 249(2): 181-198.
- [5] 郭冉, 梁桂英, 刘永坚, 等. 糖和蛋白质水平对饲养于咸淡水中的凡纳滨对虾生长、体营养成分组成和消化率的影响[J]. 水产学报, 2007, 31(3): 355-360.
Guo R, Liang G Y, Liu Y J, et al. Effect of dietary carbohydrate and protein levels on growth performance and digestibility of *Litopenaeus vannamei* juvenile reared in brackish water [J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(3): 355-360 (in Chinese).
- [6] 郭冉, 刘永坚, 田丽霞, 等. 不同玉米淀粉水平对凡纳滨对虾肝胰腺脂肪代谢的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(2): 105-109.
Guo R, Liu Y J, Tian L X, et al. Effects of dietary cornstarch levels on fat metabolism of hepatopancrease in *Litopenaeus vannamei* [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2011, 50(2): 105-109 (in Chinese).
- [7] 郭冉, 刘永坚, 田丽霞, 等. 不同糖源对南美白对虾 *Penaeus vannamei* 生长、成活率和虾体组成的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(3): 90-92.
Guo R, Liu Y J, Tian L X, et al. The effects of different carbohydrate sources on the growth, survival rate and body composition of *Penaeus vannamei* [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2005, 44(3): 90-92 (in Chinese).
- [8] 胡毅, 谭北平, 麦康森, 等. 不同碳水化合物水平饲料对凡纳滨对虾生长及部分生理生化指标的影响[J]. 水生生物学报, 2009, 33(2): 289-295.
Hu Y, Tan B P, Mai K S, et al. Influence of dietary carbohydrate levels on growth and some physiological-biochemical index in juvenile *Litopenaeus vannamei* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, 33(2): 289-295 (in Chinese).
- [9] Shiau S Y, Peng C Y. Utilization of different carbohydrates at different dietary-protein levels in grass prawn, *Penaeus monodon*, reared in seawater [J]. Aquaculture, 1992, 101(3-4): 241-250.
- [10] 徐新章, 李爱杰. 中国对虾配饵中蛋白质、糖、纤维素、脂肪的适宜含量及日需量研究[J]. 海洋科学, 1988, (6): 1-6.
Xu X Z, Li A J. Studies on the daily requirements and optimum contents of protein, carbohydrate, fiber and fat in the compound diet of *Penaeus orientalis* [J]. Marine Sciences, 1988, (6): 1-6 (in Chinese).
- [11] Andrews J W, Sick L V, Baptist G J. The influence of dietary protein and energy levels on growth and survival of penaeid shrimp [J]. Aquaculture, 1972, 1: 341-347.
- [12] Sick L V, Andrews J W. The effect of selected dietary lipids, carbohydrates and proteins on the growth, survival and body composition of *Penaeus duorarum* [J]. Proceedings of the annual workshop-World Mariculture Society, 1973, 4(1-4): 263-276.
- [13] Deshimaru O, Yone Y. Studies on a purified diet for

- prawn. 13. effect of dietary carbohydrate source on growth and feed efficiency of prawn [J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1978, 44(10): 1161–1163.
- [14] 郭冉. 凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)对糖的利用[D]. 广州: 中山大学, 2007.
Guo R. Utilization of carbohydrate by *Litopenaeus vannamei* [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2007 (in Chinese).
- [15] 孙瑞健, 张文兵, 徐玮, 等. 饲料蛋白质水平与投喂频率对大黄鱼生长、体组成及蛋白质代谢的影响[J]. 水生生物学报, 2013, 37(2): 281–289.
Sun R J, Zhang W B, Xu W, *et al.* Effects of dietary protein level and feeding frequency on the growth performance, body composition and protein metabolism of juvenile large Yellow croakers, *Pseudosciaena crocea* R [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(2): 281–289 (in Chinese).
- [16] 何金星. 饥饿复投喂下克氏原螯虾的补偿生长研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
He J X. Compensatory growth in crayfish *Procambarus clarkii*: the effect of single long-term and cycling feeding regimes on growth and some *Physiological indices* [D]. Nanjing: Nanjing University, 2010 (in Chinese).
- [17] 王爱民. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼生长及脂肪代谢调节的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011, .
Wang A M. Effects of dietary lipid levels on growth and fat metabolism of GIFT strain of nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese).
- [18] Abdel-Rahman S H, Kanazawa A, Thshima S I. Effects of dietary carbohydrate on the growth and the levels of the hepatopancreatic glycogen and serum glucose of prawn [J]. Nippon Suisan Gakkaish, 1979, 45(12): 1491–1494.
- [19] Piedad-Pascual F, Coloso R M, Tamse C T. Survival and some histological changes in *Penaeus monodon* Fabricius juveniles fed various carbohydrates [J]. Aquaculture, 1983, 31(2-4): 169–180.
- [20] Fu S J, Xie X J. Nutritional homeostasis in carnivorous southern catfish (*Silurus meridionalis*): is there a mechanism for increased energy expenditure during carbohydrate overfeeding [J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2004, 139(3): 359–363.
- [21] Shiao S Y, Lin K P, Chiou C L. Digestibility of different protein sources by *Penaeus monodon* raised in brackish water and in sea water [J]. Journal of Applied Aquaculture, 1992, 1(3): 47–54.
- [22] 刘霞. 低氧暴露与运动对肌糖原合成的调节机理研究[D]. 北京: 北京体育大学, 2007.
Liu X. Research on the regulation mechanism of hypoxia exposure and exercise on muscle glycogen synthesis [D]. Beijing: Beijing Sports University, 2007 (in Chinese).
- [23] 李爱杰. 水产动物营养与饲料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996, 26–36.
Li A J. Aquatic Animal Nutrition and Feed Science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996, 26–36 (in Chinese).
- [24] 胡有力, 钱燕宁, 刘存明, 等. 上腹部手术病人围术期红细胞内HK、PFK和G-6PD酶活性的变化[J]. 中华麻醉学杂志, 2000, 20(10): 606–608.
Hu Y L, Qian Y N, Liu C M, *et al.* Perioperative changes of erythrocytes hexokinase, phosphofructokinase and glucose-6-phosphate dehydrogenase activities in patients undergoing upper abdominal surgery [J]. Chinese Journal of Anesthesiology, 2000, 20(10): 606–608 (in Chinese).
- [25] 何志谦. 人类营养学[M]. 第2版. 北京: 人民卫生出版社, 2000, 74–84.
He Z Q. Human Nutrition [M]. 2nd ed. Beijing: People's Health Publishing House, 2000, 74–84 (in Chinese).

Effects of seven kinds of carbohydrate structure on the metabolism of *Litopenaeus vannamei*

WANG Meixue, GUO Ran*, XIA Hui, SHEN Liang, LI Yaoyao,
XIE Wei, LI Zhaojia, SHEN Qingzhou

(Ocean College of Hebei Agricultural University, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: *Litopenaeus vannamei* [(0.14 ±0.01) g average weight] were fed with seven diets for 56 d to observe the effects of different carbohydrates on the growth performance, body composition and related metabolism in triplicate tanks (50 shrimps/tank) connected to a natural seawater (29) recirculating system. Seven formulated diets all contained about 20% carbohydrate content with different carbohydrate sources: glucose, fructose, glucose+fructose (1 : 1 weight ratio), sucrose, maltose, cornstarch and dextrin. Different carbohydrate sources had significant influence on the growth performance of shrimp when other requirements were met. The results showed that the shrimp fed polysaccharide are better than sucrose and others on the SGR and PER. And there was the lowest SGR and PER in glucose group. Different carbohydrate sources had no significant influence on the crude protein, moisture and ash of body, but had influence on the crude fat and glycogen of shrimp. Meanwhile, glycometabolism instead of fat and protein metabolism was affected by different carbohydrate sources in *L. vannamei*.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; carbohydrate structure; growth performance; metabolism

Corresponding author: GUO Ran. E-mail: toguoran@163.com

Funding projects: Hebei Agricultural University Foundation for Leaders of Disciplines in Science, China