

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.140492

饲料中不同碳水化合物水平对刺参幼参生长和能量收支的影响

夏斌¹, 王际英¹, 李培玉^{1,2}, 张利民¹, 李宝山¹, 宋志东¹, 黄炳山^{1,2}

1. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东 烟台 264006;

2. 山东升索渔用饲料研究中心, 山东 烟台 264006

摘要: 通过设置不同碳水化合物水平(25.61%, 34.55%, 45.31%, 55.82%, 66.09%), 探讨对刺参幼参[体重(1.67±0.06) g] 生长、饲料利用、体组成和能量收支的影响。实验周期为 60 d, 每组设 3 个重复, 每个重复 40 头幼参。结果表明: (1) 随着摄食碳水化合物水平的升高, 特定生长率和饲料转化率均呈现先上升后下降的趋势。基于 SGR 和 FCE 的二次回归模型估算幼参碳水化合物的最适需求量为 50.15%~53.95%; (2) 蛋白质效率和摄食能在 45.31%~66.09%碳水化合物水平组均显著高于 25.61%~34.55%组, 说明碳水化合物为幼参获得蛋白质节约效应提供了能量; (3) 饲料中碳水化合物水平对幼参摄食率、排粪率和表观消化率均有显著性影响, 适宜的碳水化合物水平会提高机体对营养物质的利用效率; (4) 全参、体壁及消化道中粗脂肪含量均随摄食碳水化合物水平的升高而有所增加, 表明摄食过量碳水化合物会造成幼参体组织脂肪的沉积; (5) 在 66.09%碳水化合物水平下, 幼参生长能占摄食能的比例显著降低, 粪能、排泄能及呼吸能占摄食能的比例有所升高, 说明过高的碳水化合物水平会造成机体能量利用效率的降低。综上, 适宜的碳水化合物水平可以促进幼参生长, 提高饲料利用效率, 而摄食过量碳水化合物会造成其体组织脂肪的沉积, 并影响机体能量代谢水平。

关键词: 碳水化合物; 刺参; 生长; 体组成; 能量收支

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)04-0645-09

刺参[*Apostichopus japonicus* (Selenka)], 又称仿刺参, 隶属于棘皮动物门(Echinodermata), 海参纲(Holothurioider), 为典型的温带种类^[1]。刺参具有较高的营养和药用价值, 是深受人们喜爱的传统名贵海珍品之一。近年来, 随着人民生活水平的提高, 其市场需求不断增长, 养殖规模也迅速发展, 到 2013 年底, 中国刺参养殖面积已达 21.5 万 hm², 产量 19.4 万 t, 产值超过 200 亿元人民币, 以产值计, 已成为山东省第一大海水养殖品种^[2]。有关刺参养殖技术相关的生物学、营养学和生态学等基础研究已有一些报道^[3-5], 但其研究内容与重点的应用性仍需加强。

碳水化合物是水产动物饲料中廉价而重要的非蛋白能量物质^[6]。适宜的碳水化合物水平不仅可以提高饲料蛋白质利用效率, 产生蛋白质节约效应^[7-9], 而且有效降低其他营养素的分解代谢, 并为某些特殊化合物的合成提供代谢中间产物, 促进机体的生长^[10-12]。然而, 过量的摄食碳水化合物会造成脂肪沉积、血糖含量过高和免疫力下降等, 抑制生长^[13-14]。目前, 有关水产动物摄食碳水化合物影响的报道主要集中在鱼类和甲壳类^[15-18]。研究表明, 通过优化摄食碳水化合物水平可以提高机体糖代谢能力, 改善能量利用效率^[19]。同时, 对碳水化合物的利用能力因种类和摄食习性而有

收稿日期: 2014-12-02; 修订日期: 2015-01-19.

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系刺参产业创新团队建设项目(SDAIT-08-011-08); 国家海洋生物产业水生动物营养与饲料研发创新示范平台(201501002); 国家海洋公益性行业科研专项(201505022).

作者简介: 夏斌(1986-), 男, 研究方向为水生动物生理生态学. E-mail: frankxb@163.com

通信作者: 王际英, 研究员, 硕士生导师. E-mail: ytwjy@126.com

所差异^[20-22]。有关不同碳水化合物水平对刺参生长的影响尚未见报道。

刺参属于典型的杂食性动物,自然条件下主要靠遁形触手摄食栖息环境中的底栖微藻、小型底栖动物和沉降于水底的有机质碎屑等^[23-24],其天然饵料中含有较高水平的碳水化合物^[25-26]。本研究拟通过设置饲料中碳水化合物不同梯度水平研究其对刺参生长、饲料利用、体组成及能量收支的影响,探求碳水化合物的最适需求量,并为开发高效刺参配合饲料奠定基础。

1 材料与方法

1.1 饲料制备

以鱼粉、豆粕、藻粉、鱿鱼油等为主要原料

制备等蛋白质(19.93%)、等脂肪(2.63%)共 5 组配合饲料,调节糊化玉米淀粉含量使其碳水化合物水平分别为 25.61%、34.55%、45.31%、55.82%、66.09% (表 1)。海泥采集于潮间带,经干燥磨碎并高温煅烧去除有机质。饲料中含有 500 mg/kg 三氧化二钇作为测定表观消化率的惰性内标。原料混合均匀后经螺旋挤压机加工制成颗粒饲料,自然风干备用。

1.2 实验设计

实验用幼参购于东营市垦利县育苗场,初始体重为(1.67±0.06) g。在暂养池中驯化 3 周,然后将其随机分成 5 组,每组设 3 个重复,每个重复 40 头刺参,于直径 60 cm,高 80 cm,水深 50 cm 的圆柱形玻璃钢中进行饲养,实验周期为 60 d。

表 1 实验饲料组分及营养水平
Tab. 1 Formulation and nutritional composition of the experimental diets

原料组分 ingredients	实验饲料组 diet treatment				
	D1	D2	D3	D4	D5
鱼粉 fish meal	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
豆粕 soybean meal	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0
糊化玉米淀粉 gelatinized cornstarch	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0
藻粉 algae powder	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
小麦淀粉 wheat starch	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
鱿鱼油 squid liver oil	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
卵磷脂 lecithin	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
矿物质预混料 ¹ mineral premix ¹	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
维生素预混料 ² vitamin premix ²	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
海泥 sea mud	45.45	35.45	25.45	15.45	5.45
三氧化二钇 Y ₂ O ₃	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
营养水平 nutrient analysis					
粗蛋白 crude protein	20.18	19.81	19.93	20.06	19.65
粗脂肪 crude lipid	2.72	2.53	2.50	2.61	2.79
灰分 ash	51.90	42.74	32.26	21.92	11.06
碳水化合物 ³ carbohydrate ³	25.61	34.55	45.31	55.82	66.09
能量/(kJ·g ⁻¹) energy	10.01	11.68	13.33	15.01	16.54
蛋能比/(mg·kJ ⁻¹) P : E	19.79	17.28	14.95	13.09	11.98

注: 1. 矿物质预混料(g·kg⁻¹): MgSO₄·7H₂O, 90.0; 柠檬酸铁, 18.0; ZnSO₄·7H₂O, 3.0; MnSO₄·H₂O, 2.5; Ca(H₂PO₄)₂, 160; 乳酸钙, 25.8; CuCl₂, 0.8; AlCl₃·6H₂O, 0.18; NaCl, 2.0; KIO₃, 0.04; CoCl₂·6H₂O, 0.07.
2. 维生素预混料(g·kg⁻¹): 抗坏血酸, 150.0; 维生素 E 醋酸酯, 10.0; 盐酸硫胺素, 6.0; 核黄素, 8.0; 盐酸吡哆醇, 5.0; 烟酸, 40.0; 肌醇, 100.0; 生物素, 0.3; 叶酸, 1.5; 氨基苯甲酸, 10.0; 维生素 K, 4.0; 维生素 A, 1.5; 维生素 D₃, 0.005; 维生素 B₁₂, 0.005.
3. 碳水化合物=100(%)–粗蛋白–粗脂肪–灰分^[25-26].
Note: 1. mineral premix (g·kg⁻¹): MgSO₄·7H₂O, 90.0; ferric citrate, 18.0; ZnSO₄·7H₂O, 3.0; MnSO₄·H₂O, 2.5; Ca(H₂PO₄)₂, 160.0; Ca-lactate, 25.8; CuCl₂, 0.8; AlCl₃·6H₂O, 0.18; NaCl, 2.0; KIO₃, 0.04; CoCl₂·6H₂O, 0.07.
2. Vitamin premix (g·kg⁻¹): L-ascorbic acid, 150.0; DL-α-tocopheryl acetate, 10.0; thiamin hydrochloride, 6.0; riboflavin, 8.0; pyridoxine hydrochloride, 5.0; niacin, 40.0; myo-inositol, 100.0; D-biotin, 0.3; folic acid, 1.5; p-amino benzoic acid, 10.0; menadione, 4.0; retinyl acetate, 1.5; cholecalciferol, 0.005; cyanocobalamin, 0.005.
3. carbohydrate = 100(%)–crude protein–crude lipid–ash^[25-26].

实验采用循环水养殖系统, 24 h 持续增氧。水温保持在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 盐度 28~30, pH 7.8~8.2。每天投喂 1 次, 投喂量为幼参体重的 5%, 投喂后 20 h 采用虹吸法收集残饵和粪便, 并于 60°C 烘干保存。残饵量利用饲料在水中的浸出率进行校正^[27]。

1.3 样品采集与测定

实验开始前, 随机取 10 头幼参称重作为初始体重。实验结束前一天停止投喂, 每桶取 10 头刺参称重, 并按如下公式计算生长和饲料利用指标:

特定生长率(specific growth rate, SGR, $\% \cdot \text{d}^{-1}$) = $\ln(\text{末干重}/\text{初始干重}) / \text{时间} \times 100$;

饲料转化率(feed conversion efficiency, FCE, $\%$) = $(\text{末干重} - \text{初始干重}) / \text{饲料摄食量} \times 100$;

蛋白质效率(protein efficiency ratio, PER) = $(\text{末干重} - \text{初始干重}) / \text{蛋白摄食量}$;

摄食率(feed intake, FI, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) = $\text{饲料摄食量} / [(\text{初始干重} + \text{末干重}) / 2 \times \text{时间}]$;

排粪率(feces production rate, FPR, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) = $\text{排粪量} / [(\text{初始干重} + \text{末干重}) / 2 \times \text{时间}]$;

表观消化率(apparent digestibility coefficient, ADC, $\%$) = $[1 - (\text{饲料中 } \text{Y}_2\text{O}_3 \text{ 量} / \text{粪便中 } \text{Y}_2\text{O}_3 \text{ 量})] \times (\text{粪便量} / \text{饲料摄食量}) \times 100$ 。

饲料和粪便中三氧化二钼的含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, VIATA-MPX)测定。分别采用凯氏定氮法、索氏抽提法和马弗炉灼烧法测定饲料、刺参全参及其体组织中粗蛋白、粗脂肪和灰分的含量。样品中能量水平的测定采用氧弹仪(Parr 6100, Parr Instrument Company), 氮含量采用元素分析仪测定(PE2400 Series II, Perkin-Elmer)。

刺参的能量收支符合公式: $C = G + F + U + R$ ^[27], 其中, C 为摄食能, G 为生长能, F 为粪能, U 为排泄能, R 为呼吸能。根据测定的饲料、粪便和幼参的能值以及饲料摄食量、排粪量及刺参生长的干物质量, 分别计算出摄食能、粪能和生长能。排泄能按如下公式估算: $U = (C_N - F_N - G_N) \times 24830$ ^[28], 其中, C_N 为摄食氮, F_N 为粪便氮, G_N 为生长氮, 24830 为刺参排泄每克氮氮的能值(J/g)。呼吸能由能量收支方程 $R = C - G - F - U$ 求出^[29-30]。

1.4 统计分析

数据分析前均进行方差齐性检验^[31]。用 SPSS16.0 版进行 One-way ANOVA 和 Turkey 多重比较, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著的标准^[32]。基于 SGR 和 FCE 的二次回归模型估算刺参碳水化合物的最适需求量^[33]。数值均采用平均值 $\pm$ 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同碳水化合物水平对刺参幼参生长和饲料利用的影响

饲料中不同碳水化合物水平投喂下刺参生长和饲料利用情况。实验周期内, 不同摄食组间刺参存活率无显著性差异(ANOVA, $P > 0.05$)。所有组刺参均出现显著性增长, 随着饲料中碳水化合物水平的升高, 特定生长率(SGR)呈现先上升后下降的趋势, D3 和 D4 组 SGR 显著高于其他各组(ANOVA, $P < 0.05$)。基于 SGR 的二次回归模型估算幼参饲料中碳水化合物的最适需求量为 50.15% ($y = -0.0008x^2 + 0.0767x - 0.2190$, $r^2 = 0.96$) (图 1)。从 D1 到 D3 组, 饲料转化率(FCE)显著性增加, 而 D3、D4、D5 组间 FCE 无显著性差异(ANOVA, $P > 0.05$)。基于 FCE 和碳水化合物水平的二次回归关系估算幼参其最适需求量为 53.95% ($y = -0.0017x^2 + 0.1829x - 0.6000$, $r^2 = 0.99$) (图 2)。

与 SGR 相似, 随着摄食碳水化合物水平的升高幼参蛋白质效率(PER)和表观消化率(ADC)也

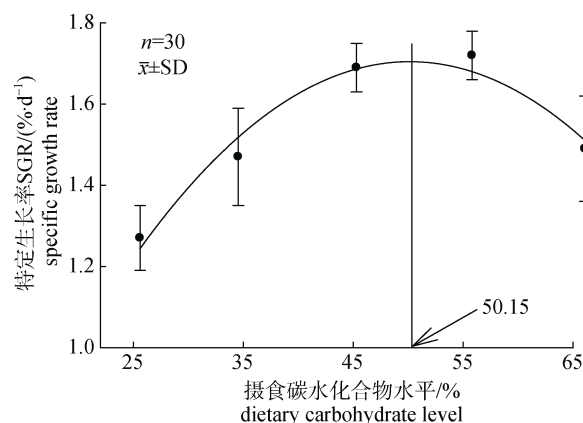


图1 碳水化合物水平与刺参特定生长率的相关性分析

Fig. 1 Relationship between dietary carbohydrate level and specific growth rate (SGR) of *A. japonicus* fed the different experimental diets

表 2 不同碳水化合物水平投喂下刺参生长和饲料利用情况

Tab. 2 Growth performance and feed utilization of *A. japonicus* fed the experimental diets containing different carbohydrate levels
n=30; $\bar{x} \pm SD$

指标 parameter	实验饲料组 diet treatment				
	D1	D2	D3	D4	D5
存活率/% survival	91.39±6.15	89.44±5.12	89.01±7.32	89.72±4.07	92.50±5.86
特定生长率 SGR (%·d ⁻¹)	1.27±0.08 ^a	1.47±0.12 ^b	1.69±0.06 ^c	1.72±0.06 ^c	1.49±0.13 ^b
饲料转化率 FCE/%	3.00±0.09 ^a	3.63±0.21 ^b	4.26±0.24 ^c	4.32±0.26 ^c	4.08±0.33 ^c
蛋白质效率 PER	0.15±0.01 ^a	0.18±0.01 ^b	0.21±0.02 ^c	0.22±0.01 ^c	0.21±0.02 ^{bc}
摄食率 FI/(g·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.40±0.02 ^a	0.38±0.01 ^{ab}	0.37±0.01 ^{bc}	0.37±0.02 ^{bc}	0.34±0.02 ^c
排粪率 FPR/(g·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.33±0.01 ^a	0.31±0.02 ^{ab}	0.30±0.01 ^b	0.29±0.02 ^b	0.31±0.01 ^{bc}
表观消化率 ADC/%	26.19±2.01 ^a	27.88±1.07 ^{ab}	30.97±0.86 ^c	29.34±0.49 ^b	27.01±1.23 ^a

注：同一行中数字标有不同字母表示显著性差异($P<0.05$)。各组成见表 1。
Note: Numbers with different superscripted letters within the same row of each table block mean significant differences ($P<0.05$). The diet composition of each treatment is showed in Tab.1.

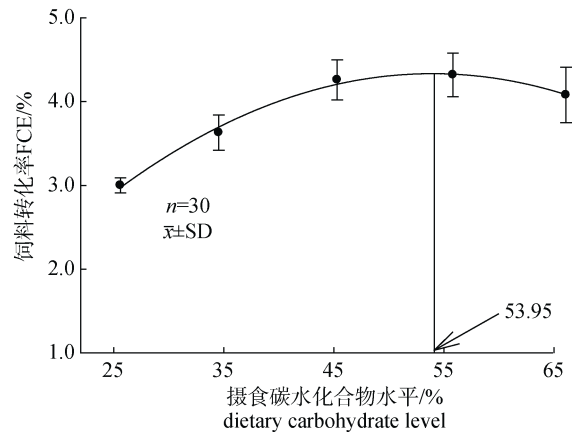


图 2 碳水化合物水平与饲料转化率的相关性分析

Fig. 2 Relationship between dietary carbohydrate level and feed conversion efficiency (FCE) of *A. japonicus* fed the different experimental diets

呈现先升高后下降的趋势, PER 在 D4 组值最高(0.22), D3 组 ADC 值显著高于其他各组(ANOVA, $P<0.05$) (表 2)。摄食率(FI)从 D1 到 D5 组逐渐降低, 不同摄食组间 FI 存在显著性差异(ANOVA, $P<0.05$)。碳水化合物水平对刺参排粪率(FPR)影响显著, D4 组 FPR 值最低[0.29 g/(g·d)]。

2.2 不同碳水化合物水平对刺参幼参体组成的影响

饲料中不同碳水化合物水平投喂下刺参体组成情况见表 3。从 D3 组开始, 全参粗脂肪含量出现显著性增加, 而 D3 到 D5 组间无显著性差异。消化道粗脂肪含量在 D5 组显著升高(ANOVA, $P<0.05$)。碳水化合物水平对刺参体壁粗脂肪含量也存在显著性影响, D4 和 D5 组值显著高于 D1 和

D2 组(ANOVA, $P<0.05$)。随着饲料中碳水化合物水平的升高, 仅体壁粗蛋白含量在不同摄食组间出现显著性差异(ANOVA, $P<0.05$), 且在 D5 组值最高(4.35%)。全参和体壁灰分含量均呈现先下降后上升的趋势, 而消化道灰分在组间无显著性差异(ANOVA, $P>0.05$)。

2.3 不同碳水化合物水平对刺参幼参能量收支的影响

饲料中不同碳水化合物水平投喂下刺参能量收支情况见表 4。随着碳水化合物水平的升高, 刺参摄食能(C)显著性增加, D4 和 D5 组 C 值无显著性差异。生长能(G)及其占摄食能的比例均呈现先上升后下降的趋势, 均在 D4 组获得最大值[0.47 kJ/(g·d); 8.46%/C]。摄食 D4 和 D5 组粪能(F)显著高于其他各组, 而粪能占摄食能的比例则先下降后上升(ANOVA, $P<0.05$)。从 D1 到 D5 组, 排泄能(U)逐渐增加, 而碳水化合物水平对排泄能占摄食能的比例无显著性差异(ANOVA, $P>0.05$)。D3 到 D5 组呼吸能(R)显著高于 D1 和 D2 组, 而组间无显著性差异, 呼吸能占摄食能的比例先升高后降低, 在 D3 组 R 值最高(24.46%/C)。

3 讨论

目前, 有关碳水化合物影响的研究主要集中于鱼类和甲壳类, 而不同种类和摄食习性的水生动物对碳水化合物的利用能力有所差异^[15-16]。一般认为, 杂食性和草食性水产动物可耐受较高水

表 3 不同碳水化合物水平投喂下刺参体组成变动情况

Tab. 3 Proximate composition of *A. japonicus* fed the experimental diets containing different carbohydrate levels

%; $n=30$; $\bar{x} \pm SD$

指标 parameter	实验饲料组 diet treatment				
	D1	D2	D3	D4	D5
全参 whole body					
水分 moisture	89.59±2.01	91.14±1.77	90.04±1.05	91.45±1.55	90.38±1.71
粗蛋白 crude protein	4.11±0.20	4.31±0.25	4.29±0.17	4.17±0.10	4.23±0.16
粗脂肪 crude lipid	0.15±0.01 ^a	0.18±0.02 ^{ab}	0.20±0.04 ^b	0.22±0.02 ^b	0.23±0.03 ^b
灰分 ash	2.51±0.06 ^{ab}	2.48±0.06 ^a	2.35±0.10 ^{abc}	2.21±0.15 ^c	2.33±0.08 ^{bc}
体壁 body wall					
水分 moisture	92.14±1.98	91.88±1.32	90.67±2.38	91.02±1.45	92.37±2.00
粗蛋白 crude protein	3.98±0.15 ^a	4.10±0.11 ^{ab}	4.25±0.05 ^{bc}	4.31±0.15 ^{bc}	4.35±0.10 ^c
粗脂肪 crude lipid	0.15±0.03 ^a	0.16±0.03 ^a	0.21±0.02 ^{ab}	0.21±0.01 ^b	0.22±0.02 ^b
灰分 ash	2.58±0.08 ^a	2.45±0.11 ^{ab}	2.40±0.08 ^b	2.34±0.06 ^b	2.59±0.10 ^a
消化道 intestine					
水分 moisture	90.12±1.16	92.31±2.61	92.19±1.82	90.47±1.09	91.50±1.68
粗蛋白 crude protein	3.91±0.24	4.07±0.13	4.11±0.12	4.00±0.19	3.89±0.11
粗脂肪 crude lipid	0.16±0.02 ^a	0.16±0.04 ^a	0.18±0.02 ^a	0.21±0.01 ^{ab}	0.22±0.01 ^b
灰分 ash	2.33±0.18	2.45±0.08	2.39±0.13	2.41±0.09	2.29±0.21

注: 同一行中数字标有不同字母表示显著性差异($P<0.05$). 各组组成见表 1.

Note: Numbers with different superscripted letters within the same row mean significant differences ($P<0.05$). The diet composition of each treatment is showed in Tab.1.

表 4 不同碳水化合物水平投喂下刺参能量收支情况

Tab. 4 Allocation of the consumed energy of *A. japonicus* fed the experimental diets containing different carbohydrate levels

$n=30$; $\bar{x} \pm SD$

指标 parameter	实验饲料组 diet treatment				
	D1	D2	D3	D4	D5
摄食能 C ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	4.10±0.14 ^a	4.44±0.12 ^b	4.89±0.15 ^c	5.50±0.23 ^d	5.68±0.25 ^d
生长能 G ($\% \cdot \text{C}^{-1}$)	6.60±0.68 ^a	7.70±0.26 ^{bc}	8.32±0.61 ^{bc}	8.46±0.16 ^c	6.99±0.30 ^b
生长能 G ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.27±0.04 ^a	0.34±0.02 ^b	0.42±0.04 ^{cd}	0.47±0.01 ^d	0.40±0.03 ^{bc}
粪能 F ($\% \cdot \text{C}^{-1}$)	69.21±1.95 ^a	65.24±0.47 ^{ab}	61.08±2.86 ^b	63.43±3.05 ^b	65.22±1.96 ^{ab}
粪能 F ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	2.80±0.18 ^a	2.90±0.08 ^a	2.98±0.07 ^a	3.49±0.25 ^b	3.71±0.28 ^b
排泄能 U ($\% \cdot \text{C}^{-1}$)	5.73±0.21	6.18±0.42	6.15±0.23	6.08±0.16	6.42±0.31
排泄能 U ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.23±0.01 ^a	0.27±0.02 ^b	0.30±0.01 ^{bc}	0.33±0.01 ^{cd}	0.36±0.03 ^d
呼吸能 R ($\% \cdot \text{C}^{-1}$)	18.46±2.47 ^a	20.88±0.28 ^{ab}	24.46±2.28 ^b	22.03±2.91 ^{ab}	21.37±2.56 ^{ab}
呼吸能 R ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.74±0.07 ^a	0.93±0.02 ^a	1.20±0.15 ^b	1.21±0.16 ^b	1.21±0.09 ^b

注: 同一行中数字标有不同字母表示显著性差异($P<0.05$). 各组组成见表 1.

Note: Numbers with different superscripted letters within the same row mean significant differences ($P<0.05$). The diet composition of each treatment is showed in Tab.1.

平的碳水化合物,并在一定范围内表现出明显的蛋白质节约效应^[34-36]。本研究中,从 25.61%到 55.82%摄食碳水化合物水平,刺参幼参的特定生长率和饲料转化率均逐渐升高,但在 66.09%时出现下降趋势,说明适宜碳水化合物水平有利于促进幼参生长,提高饲料利用效率,而摄食过量碳

水化合物则会抑制刺参机体生长^[37-39]。基于 SGR 和 FCE 二次回归模型分析表明,幼参饲料中碳水化合物的最适需求水平为 50.15%~53.95%,这也说明杂食性的刺参具有较高利用碳水化合物的能力^[26]。Kaushik 等^[40]曾报道,鲑类可通过调节摄食率以满足自身能量需求,且随着摄食碳水化合物

水平的升高其摄食率逐渐降低,本研究结果与其一致。摄食碳水化合物水平从25.61%增加到45.31%时,幼参蛋白质效率逐渐升高,摄食能也显著增加,说明碳水化合物为幼参获得蛋白质节约效应提供了足够的能量,但随着饲料中碳水化合物水平的继续升高,蛋白质效率并无显著性差异。而Mohanta等^[16]和Tan等^[38]研究发现银无须鲋(*Puntius gonionotus*)幼鱼和银鲫(*Carassius auratus* var. *gibelio*)摄食过量碳水化合物时,蛋白质效率则出现明显下降趋势。本研究结果同样显示,摄食碳水化合物水平对幼参的表观消化率具有显著性影响。随着饲料中碳水化合物水平的升高,表观消化率先升高后下降,而排粪率先下降后上升,这说明摄食过量碳水化合物会降低幼参机体对营养物质的利用效率,这与大多数杂食性鱼类和甲壳类的研究结果一致^[15,41]。而对草食性水生动物而言,因其具有更高的碳水化合物耐受性,往往表现出碳水化合物水平和消化率之间的非相关性或正相关性^[13-14]。Li等^[20]研究发现,适宜的碳水化合物水平可诱导银鲫(*Carassius auratus gibelio* var. CAS III)和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)淀粉酶活性升高,增加机体表观消化率,但水平过量时又会抑制淀粉酶活性。

以往研究表明,长期摄食较高水平的碳水化合物可能会造成水生动物机体体内脂肪的沉积^[16,42]。本研究中刺参全参、体壁及消化道粗脂肪含量随碳水化合物水平的升高均有不同程度的增加。Hemre等^[19]发现鱼类在高碳水化合物水平投喂下,戊糖磷酸代谢过程中的葡萄糖六磷酸脱氢酶活性显著升高。但是通过此途径沉积的脂肪量相对较少,另一种解释是高的碳水化合物水平促进了脂肪的合成效率,同时降低了脂肪作为有氧代谢的能量供应。Shimeno等^[43]研究表明,尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)可通过加快糖酵解,降低糖异生,促进糖原合成和脂肪沉积等过程来实现机体内糖代谢的稳态,维持正常生命活动。然而,过量摄食碳水化合物易造成糖代谢负担,诱发高血糖症,影响机体物质和能量代谢水平^[44]。本研究中,在66.09%碳水化合物水平投喂下,幼参生

长能占摄食能的比例显著降低,粪能、排泄能及呼吸能占摄食能的比例有所升高,表明过量摄食碳水化合物造成了幼参机体能量利用效率的下降。

4 结论

饲料中适宜的碳水化合物水平,可以促进刺参生长,提高饲料利用效率,产生蛋白质节约效应。幼参摄食碳水化合物的最适需求量为50.15%~53.95%。

不同碳水化合物水平会显著影响刺参的体组成,摄食过量的碳水化合物会抑制生长,并造成机体脂肪的沉积。

饲料中添加过量的碳水化合物会显著降低刺参机体能量利用效率。

参考文献:

- [1] Liao Y L. Holothurioider, Echinodermata, Fauna of China [M]. Beijing: Science Press, 1997.[廖玉麟. 中国动物志, 棘皮动物门, 海参纲[M]. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [2] Ministry of Agriculture of China. China Fisheries Yearbook, 2013[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.[农业部. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.]
- [3] Huang H W, Wang Y G. The current situation, issues and prospects of sea cucumber culturing[J]. China Fisheries, 2007(10): 50-53.[黄华伟, 王印庚. 海参养殖的现状、存在问题与前景展望[J]. 中国水产, 2007(10): 50-53.]
- [4] Guo N. Studies on the effects of different diets on growth, digestive physiology and energy budget of *Apostichopus japonicus*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.[郭娜. 不同饲料对刺参生长、消化生理和能量收支的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.]
- [5] Wang J Y, Song Z D, Li P Y, et al. Effects of dietary galactomannan oligosaccharides on growth, digestion, body wall nutritional composition and immunity of juvenile sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(2): 310-319.[王际英, 宋志东, 李培玉, 等. 饲料添加半乳甘露寡糖对刺参幼参生长、体壁营养成分及免疫力的影响[J]. 中国水产科学, 2014, 21(2): 310-319.]
- [6] Wilson R P. Utilization of dietary carbohydrate by fish[J]. Aquaculture, 1994, 124(1-4): 67-80.
- [7] Azaza M S, Khiari N, Dhraief M N, et al. Growth performance, oxidative stress indices and hepatic carbohydrate metabolic enzymes activities of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L., in response to dietary starch to protein

- ratios[J]. Aquac Res, 2015, 46(1): 14–27.
- [8] Honorat C A, Almeida L C, da Silva Nunes C, et al. Effects of processing on physical characteristics of diets with distinct levels of carbohydrates and lipids: the outcomes on the growth of pacu (*Piaractus mesopotamicus*)[J]. Aquacult Nutr, 2010, 16(1): 91–99.
- [9] Vásquez-Torres W, Arias-Castellanos J A. Effect of dietary carbohydrates and lipids on growth in cachama (*Paractus brachypomus*)[J]. Aquac Res, 2013, 44(11): 1768–1776.
- [10] Polakof S, Panserat S, Soengas J L, et al. Glucose metabolism in fish: a review[J]. J Comp Physiol B, 2012, 182(8): 1015–1045.
- [11] Vielma J, Koskela J, Ruohonen K, et al. Optimal diet composition for European whitefish (*Coregonus lavaretus*): carbohydrate stress and immune parameter responses[J]. Aquaculture, 2003, 225(1–4): 3–16.
- [12] Ye W J, Tan X Y, Chen Y D, et al. Effects of dietary protein to carbohydrate ratios on growth and body composition of juvenile yellow catfish, *Pelteobagrus fulvidraco* (Siluriformes, Bagridae, *Pelteobagrus*)[J]. Aquac Res, 2009, 40(12): 1410–1418.
- [13] Chen Y J, Tian L X, Yang H J, et al. Effect of protein and starch level in practical extruded diets on growth, feed utilization, body composition, and hepatic transaminases of juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idella*[J]. J World Aquacult Soc, 2012, 43(2): 187–197.
- [14] Gao W, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of dietary carbohydrate-to-lipid ratios on growth performance, body composition, nutrient utilization and hepatic enzymes activities of herbivorous grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Aquacult Nutr, 2010, 16(3): 327–333.
- [15] 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.
- [16] Mohanta K N, Mohanty S N, Jena J, et al. Carbohydrate level in the diet of silver barb *Puntius gonionotus* (Bleeker) fingerlings: effect on growth, nutrient utilization and whole body composition[J]. Aquac Res, 2009, 40(8): 927–937.
- [17] Oliveira G T, Rossi I C, Kucharski L C, et al. Hepatopancreas gluconeogenesis and glycogen content during fasting in crabs previously maintained on a high-protein or carbohydrate-rich diet[J]. Comp Biochem Phys A, 2004, 137(2): 383–390.
- [18] Radford C A, Marsden I D, Davison W, et al. Haemolymph glucose concentrations of juvenile rock lobsters, *Jasus edwardsii*, feeding on different carbohydrate diets[J]. Comp Biochem Phys A, 2005, 140(2): 241–249.
- [19] Hemre G I, Mommsen T P, Kroghdahl Å. Carbohydrates in fish nutrition: effects on growth, glucose metabolism and hepatic enzymes[J]. Aquacult Nutr, 2002, 8(3): 175–194.
- [20] Li X S, Zhu X M, Han D, et al. Carbohydrate utilization by herbivorous and omnivorous freshwater fish species: a comparative study on gibel carp (*Carassius auratus gibelio*. var. CAS III) and grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. Aquac Res, 2014, DOI: 10.1111/are.12476.
- [21] Rawles S D, Gatlin D M. Carbohydrate utilization in striped bass (*Morone saxatilis*) and sunshine bass (*M. chrysops* ♀ × *M. saxatilis* ♂)[J]. Aquaculture, 1998, 161(1–4): 201–212.
- [22] Tran-Duy A, Smit B, Van Dam A A, et al. Effects of dietary starch and energy levels on maximum feed intake, growth and metabolism of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. Aquaculture, 2008, 277(3–4): 213–219.
- [23] Slater M J, Carton A G. Sea cucumber habitat differentiation and site retention as determined by intraspecific stable isotope variation[J]. Aquac Res, 2010, 41(10): e695–e702.
- [24] Gao Q F, Wang Y S, Dong S L, et al. Absorption of different food sources by sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) (Echinodermata: Holothuroidea): Evidence from carbon stable isotope[J]. Aquaculture, 2011, 319(1–2): 272–276.
- [25] Seo J Y, Lee S M. Optimum dietary protein and lipid levels for growth of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* [J]. Aquacult Nutr, 2011, 17(2): e56–e61.
- [26] Seo J Y, Shin I S, Lee S M. Effect of dietary inclusion of various plant ingredients as an alternative for *Sargassum thunbergii* on growth and body composition of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Aquacult Nutr, 2011, 17(5): 549–556.
- [27] Pei S R, Dong S L, Wang F, et al. Effects of density on variation in individual growth and differentiation in endocrine response of Japanese sea cucumber (*Apostichopus japonicus* Selenka)[J]. Aquaculture, 2012, 356–357: 398–403.
- [28] Wang F, Dong S L, Huang G Q, et al. The effect of light color on the growth of Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Aquaculture, 2003, 228(1–4): 351–360.
- [29] An Z H, Dong Y W, Dong S L. Effects of temperature fluctuation and rations on the growth and energy budget of sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(5): 739–743.[安振华, 董云伟, 董双林. 日粮水平对周期性变温模式下刺参生长和能量收支的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(5): 739–743.]
- [30] Yuan X T, Yang H S, Wang L L, et al. Effects of aestivation on energy budget of sea cucumber *Apostichopus japonicus*

- (Selenka) (Echinodermata: Holothuroidea)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3155–3161.[袁秀堂, 杨红生, 王丽丽, 等. 夏眠对刺参(*Apostichopus japonicus* (Selenka))能量收支的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3155–3161.]
- [31] Zar J H. Biostatistical Analysis[M]. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
- [32] SPSS Inc. SPSS 16.0 Student Version for Windows[Z]. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [33] Robbins K R, Norton H W, Baker D H. Estimation of nutrient requirements from growth data[J]. J Nutr, 1979, 109(10): 1710–1714.
- [34] Mohanta K N, Mohanty S N, Jena J K. Protein-sparing effect of carbohydrate in silver barb, *Puntius gonionotus* fry[J]. Aquacult Nutr, 2007, 13(4): 311–317.
- [35] Peragón J, Barroso J B, García-Salguero L, et al. Carbohydrates affect protein-turnover rates, growth, and nucleic acid content in the white muscle of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Aquaculture, 1999, 179(1–4): 425–437.
- [36] Stone D A J, Allan G L, Anderson A J. Carbohydrate utilization by juvenile silver perch, *Bidyanus bidyanus* (Mitchell). III. The protein-sparing effect of wheat starch-based carbohydrates[J]. Aquac Res, 2003, 34(2): 123–134.
- [37] Li X F, Wang Y, Liu W B, et al. Effects of dietary carbohydrate/lipid ratios on growth performance, body composition and glucose metabolism of fingerling blunt snout bream *Megalobrama amblycephala*[J]. Aquacult Nutr, 2013, 19(5): 701–708.
- [38] Tan Q, Wang F, Xie S, et al. Effect of high dietary starch levels on the growth performance, blood chemistry and body composition of gibel carp (*Carassius auratus* var. *gibelio*)[J]. Aquac Res, 2009, 40(9): 1011–1018.
- [39] Wang Y, Liu Y J, Tian L X, et al. Effects of dietary carbohydrate level on growth and body composition of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*[J]. Aquac Res, 2005, 36(14): 1408–1413.
- [40] Kaushik S J, Médale F. Energy requirements, utilization and dietary supply to salmonids[J]. Aquaculture, 1994, 124(1–4): 81–97.
- [41] Mohapatra M, Sahu N P, Chaudhari A. Utilization of gelatinized carbohydrate in diets of *Labeo rohita* fry[J]. Aquacult Nutr, 2003, 9(3): 189–196.
- [42] Ren M C, Ai Q H, Mai K S. Effect of dietary carbohydrate level on growth performance, body composition, apparent digestibility coefficient and digestive enzyme activities of juvenile cobia, *Rachycentron canadum* L.[J]. Aquac Res, 2011, 42(10): 1467–1475.
- [43] Shimeno S, Ming D C, Takeda M. Metabolic response to dietary carbohydrate to lipid ratios in *Oreochromis niloticus* [J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1993, 59(5): 827–833.
- [44] Furuichi M, Yone Y. Change of blood sugar and plasma insulin levels of fishes in glucose tolerance test[J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1981, 47(6): 761–764.

Effects of dietary carbohydrate intake on the growth and energy budget of juvenile *Apostichopus japonicus* (Selenka) sea cucumbers

XIA Bin¹, WANG Jiying¹, LI Peiyu^{1,2}, ZHANG Limin¹, LI Baoshan¹, SONG Zhidong¹, HUANG Bingshan^{1,2}

1. Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China;

2. Shengsuo Fishery Feed Research Centre of Shandong Province, Yantai 264006, China

Abstract: Carbohydrates are widely included in aquafeed as the major non-protein energy source owing to their wide availability and low cost. This study evaluated the effects of the quantity of dietary carbohydrates (25.61%, 34.55%, 45.31%, 55.82%, 66.09%) on growth performance, feed utilization, body composition, and the energy budget of juvenile *Apostichopus japonicus* (Selenka) sea cucumbers. Sea cucumbers were given feed with the different percentages of carbohydrates for 60 days, with 3-replicates per treatment and 40 sea cucumbers per replicate [$\bar{x} \pm \text{SE}$: (1.67 $\pm$ 0.06) g, body weight]. During the experiment, the specific growth rate and feed conversion efficiency initially increased then decreased with higher levels of dietary carbohydrates. Based on second-order polynomial regression models of these variables, optimal carbohydrate levels for the sea cucumber were estimated to be 50.15%–53.95%. The protein efficiency ratios and energy consumed were significantly higher in diets with 45.31%–55.09% carbohydrates than in those with 25.61%–34.55%, demonstrating that carbohydrates provided energy for protein sparing. Dietary carbohydrate intake had significant effects on sea cucumber feed intake, feces production, and apparent digestibility coefficient. Optimal carbohydrate intake enhanced the efficiency of nutrient utilization. Whole body, body wall, and intestinal crude lipid content all increased with higher levels of dietary carbohydrates, where excess carbohydrates resulted in tissue lipid deposition. In diets with 66.09% carbohydrates, the percentage of energy intake used for growth significantly decreased, while energy accounted for by feces, excretion, and respiration increased, indicating that excess dietary carbohydrates reduced energy utilization efficiency. In conclusion, optimal levels of dietary carbohydrate intake promoted growth and feed utilization in thesea cucumber, while lipid deposition and energy metabolism variability resulted from excess dietary carbohydrates.

Key words: *Apostichopus japonicus*; carbohydrate; growth; body composition; energy budget

Corresponding author: WANG Jiying. E-mail: ytwjy@126.com