



## 水苏糖对仿刺参幼参生长、消化生理与糖代谢的影响

郭鹏<sup>1,2</sup>, 王际英<sup>1\*</sup>, 李宝山<sup>1</sup>, 王美琪<sup>1,2</sup>,  
孙永智<sup>1</sup>, 黄炳山<sup>1</sup>, 王世信<sup>1</sup>

(1. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东烟台 264006;  
2. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心,  
水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306)

**摘要:** 为研究饲料中添加水苏糖对刺参生长、消化生理与糖代谢的影响, 以初始体重为 (11.46±0.03) g 的刺参幼参为实验对象, 在基础饲料中添加包膜水苏糖, 配成水苏糖含量分别为 0 (D1, 对照组)、0.04%(D2)、0.11%(D3)、0.15%(D4)、0.21%(D5) 和 0.27%(D6) 的 6 组实验饲料, 在循环水养殖桶中进行为期 67 d 的生长实验。结果显示, ①随着饲料中水苏糖含量的增加, 刺参的增重率及特定生长率均先上升后下降, D2~D5 组显著高于对照组, 体壁基本营养成分不受水苏糖添加量的影响; ②肠道蛋白酶、脂肪酶和超氧化物歧化酶活性先上升后下降, D3、D4 组显著高于对照组, 丙二醛含量先下降后上升, 在 D3 组达最低值, 淀粉酶、碱性磷酸酶和酸性磷酸酶活性无显著性差异; D3、D4 组肠道皱襞高度显著大于对照组, D6 组出现炎症细胞浸润; ③葡萄糖激酶活性先上升后平稳, D5、D6 组显著高于其他组, 果糖磷酸激酶和丙酮酸激酶活性先上升后下降, 分别在 D4、D3 组达最大值; 磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶活性呈上升趋势, D6 组显著高于其他各组。研究表明, 水苏糖提高了刺参糖代谢效率, 改善了机体消化生理和抗氧化能力, 从而促进了刺参的生长; 以增重率为评价标准, 刺参幼参饲料中水苏糖的最适添加量为 0.129%。水苏糖作为功能性低聚糖, 在刺参消化、代谢与抗氧化方面起重要作用。面起重要作用。

**关键词:** 仿刺参; 水苏糖; 生长; 消化生理; 免疫; 糖代谢

中图分类号: S 963.7

文献标志码: A

水苏糖 (stachyose, STA) 是一种天然的非还原性功能性低聚糖, 是由 1 分子葡萄糖、1 分子果糖和 2 分子半乳糖通过  $\alpha$ -1, 6 糖苷键、 $\beta$ -1, 2 糖苷键连接而成的四糖, 分子式为  $C_{24}H_{42}O_{22}$ , 结构稳定, 具有良好的热稳定性<sup>[1-2]</sup>。由于动物小肠缺少  $\alpha$ -半乳糖苷酶, 水苏糖不能被肠道直接吸收, 而是被肠道中的双歧杆菌 (*Bifidobacterium*) 和乳酸杆菌 (*Lactobacillus*) 水解, 并改善肠道菌群、促进

矿物质吸收和调节糖类与脂类代谢<sup>[3-4]</sup>。与其相似的低聚糖有棉子糖、大豆低聚糖、低聚木糖及低聚果糖等, 被统称为功能性低聚糖<sup>[5]</sup>。研究表明, 水苏糖对大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*)<sup>[6-7]</sup>、大西洋鲑 (*Salmo salar*)<sup>[8]</sup>、异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*)<sup>[9]</sup> 等水产动物的生长、抗氧化和免疫有促进作用, 并能改善肠道结构。

仿刺参 (*Apostichopus japonicus*) 隶属棘皮动物

收稿日期: 2021-07-19 修回日期: 2021-10-20

资助项目: 山东省刺参产业技术体系 (SDAIT-22-06); 烟台市科技发展计划 (2021XDHZ056)

第一作者: 郭鹏 (照片), 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: 403868037@qq.com

通信作者: 王际英, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: ytwjy@126.com



门 (Echinodermata) 海参纲 (Holothuroidea) 仿刺参属 (*Apostichopus*)<sup>[10]</sup>, 营养价值高, 是我国黄渤海地区的重要养殖种类<sup>[11-12]</sup>。目前, 对壳寡糖<sup>[13]</sup>、低聚果糖<sup>[14]</sup>等功能性低聚糖的研究表明, 功能性低聚糖对仿刺参生长与免疫有促进作用, 但其对仿刺参糖代谢影响的研究较少。本实验通过在基础饲料中添加不同梯度的水苏糖饲喂仿刺参幼参, 以研究水苏糖对仿刺参幼参生长、消化生理及糖代谢的影响, 旨在为功能性低聚糖在仿刺参养殖中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

以鱼粉、藻粉和小麦粉为主要蛋白源, 设计粗蛋白含量 14.00%、粗脂肪含量 1.80% 的基础饲料配方。在基础饲料中分别添加 0、0.12%、0.24%、0.36%、0.48% 和 0.60% 的包膜水苏糖 (陕西森悦生物科技有限公司, 纯度 ≥98%), 配置水

苏糖含量分别为 0、0.04%、0.11%、0.15%、0.21% 和 0.27% 的 6 组等氮等脂的实验饲料, 命名为 D1(对照组)、D2、D3、D4、D5 和 D6 组。

将等质量的水苏糖与卡拉胶混合, 加入适量的水调至稠状, 90 °C 加热搅拌 15 min, 冷却后用冻干机干燥成胶状, 经 75 °C 烘干后, 磨成粉状, 制成包膜水苏糖待用。在 10 mL 蒸馏水中加入 1 g 包膜水苏糖, 静置 5 h 后过滤, 测定滤液中总糖含量 (DB12/T 847—2018), 计算包膜水苏糖 5 h 的溶失率为 36%。

将固体原料超微粉碎后经 200 目标准筛过滤, 按照饲料配方配比进行称重, 加入鱼油及适量的蒸馏水, 充分混匀, 用小型颗粒饲料挤压机制成直径为 0.3 cm 的条状饲料, 60 °C 烘干, 密封保存。饲料配方及营养组成见表 1。

### 1.2 实验管理及样品采集

养殖实验在山东省海洋资源与环境研究院东营实验基地的循环水养殖系统中进行, 所用刺参

表 1 饲料配方及营养组成 (风干物质)

Tab. 1 Composition and nutrient level of the experimental diets (air dried matter)

项目 items	组别 groups					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>原料/% ingredient</b>						
白鱼粉 fish meal	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
小麦粉 wheat flour	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
藻粉 algae powder	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
鱼油 fish oil	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
抗氧化剂 antioxidants	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
维生素预混料 <sup>1</sup> vitamin premix	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
矿物质预混料 <sup>2</sup> mineral premix	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
卡拉胶 carrageenan	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
包膜水苏糖 coated STA	0.00	0.12	0.24	0.36	0.48	0.60
海泥 sea mud	46.60	46.48	46.36	46.24	46.12	46.00
合计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>营养成分(干物质) nutrient composition (DM)</b>						
粗蛋白/% crude protein	15.73	15.70	15.67	15.68	16.16	15.77
粗脂肪/% crude lipid	1.89	1.98	1.90	1.85	1.94	1.87
粗灰分/% crude ash	56.25	56.11	55.89	55.94	55.78	55.62
能量/(kJ/g) energy	7.72	7.83	7.96	7.74	7.98	8.02
水苏糖/% STA	0.00	0.04	0.11	0.15	0.21	0.27

注: 1. 维生素预混料(mg/kg or IU/kg 饲料)含维生素 A 7 500.00 IU, 维生素 D 1 500.00 IU, 维生素 E 60.00 mg, 维生素 K<sub>3</sub> 18.00 mg, 维生素 B<sub>1</sub> 12.00 mg, 维生素 B<sub>2</sub> 12.00 mg, 维生素 B<sub>12</sub> 0.10 mg, 泛酸 48.00 mg, 烟酰胺 90.00 mg, 叶酸 3.70 mg, D-生物素 0.20 mg, 吡哆醇 60.00 mg, 维生素 C 310.00 mg; 2. 矿物质预混料(mg/kg 饲料)含锌 35.00 mg, 锰 21.00 mg, 铜 8.30 mg, 铁 23.00 mg, 钴 1.20 mg, 碘 1.00 mg, 硒 0.30 mg。

Notes: 1. Vitamin premix(mg/kg or IU/kg diet) contain vitamin A 7 500.00 IU, vitamin D 1 500.00 IU, vitamin E 60.00 mg, vitamin K<sub>3</sub> 18.00 mg, vitamin B<sub>1</sub> 12.00 mg, vitamin B<sub>2</sub> 12.00 mg, vitamin B<sub>12</sub> 0.10 mg, pantothenate acid 48.00 mg, niacin 90.00 mg, folic acid 3.70 mg, D-biotin 0.20 mg, pyridoxine 60.00 mg, vitamin C 310.00 mg. 2. Mineral premix (mg/kg diet): Zn 35.00 mg, Mn 21.00 mg, Cu 8.30 mg, Fe 23.00 mg, Co 1.20 mg, I 1.00 mg, Se 0.30 mg.

幼参购自山东安源种业科技有限公司。养殖实验前, 将刺参幼参暂养于养殖系统中, 以基础饲料暂养 2 周, 控食 36 h 后, 挑选个体健壮, 体重相近 ( $11.46 \pm 0.03$ ) g 的刺参幼参 540 头, 随机分配到 18 个循环水养殖桶 ( $\Phi 70 \text{ cm} \times 65 \text{ cm}$ ) 中, 每桶 30 头, 各实验组随机投喂 3 桶, 共 6 组, 每桶放置一个海参养殖筐。养殖周期为 67 d, 养殖期间, 每天 16:00 饱食投喂 1 次, 初始投喂量为刺参幼参初始体重的 3%, 根据每日摄食情况调整次日投喂量, 每 3 天清理 1 次残饵和粪便并换水, 换水量为 1/3 水体, 养殖 1 个月时更换海参养殖筐。养殖室保持弱光, 控制水温为  $16 \sim 18 \text{ }^\circ\text{C}$ , pH  $7.6 \sim 7.6 \sim 8.3$ , 溶解氧大于  $6 \text{ mg/L}$ , 氨氮与亚硝酸盐含量低于  $0.05 \text{ mg/L}$ 。

养殖实验结束后, 控食 48 h, 统计各桶刺参数量并称重, 计算成活率、增重率和特定生长率。每桶随机选取 8 头刺参置于干净托盘中, 轻轻擦干表面水分, 称量体重。之后进行解剖, 清理体腔液和肠道内容物, 收集体壁及肠道并称重, 计算肠壁比, 样品保存于  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

切取仿刺参中前肠部位 (位置相同)  $0.4 \text{ cm}$ , 置于 Bouin 氏液中固定 24 h, 之后转入 70% 的乙醇中长期保存。实验严格遵守山东省海洋资源与环境研究院伦理规范。

### 1.3 检测指标与方法

成活率 (survival rate, SR, %) =  $(N_t/N_0) \times 100\%$ ;

增重率 (weight gain rate, WGR, %) =  $(W_t - W_0)/W_0 \times 100\%$ ;

特定生长率 (specific growth rate, SGR, %/d) =  $(\ln W_t - \ln W_0)/t \times 100\%$ ;

肠壁比 (ratio of intestine weight to body wall weight, IBR, %) =  $W_i/W_w \times 100\%$ 。

式中,  $N_t$  为终末头数,  $N_0$  为初始头数,  $W_t$  为仿刺参终末重量 (g),  $W_0$  为仿刺参初始重量 (g),  $t$  为养殖天数 (d),  $W_i$  为养殖终末仿刺参肠道重量 (g),  $W_w$  为养殖终末仿刺参体壁重量 (g)。

实验中, 水分采用  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  恒重法 (GB/T 6435—2014) 测定; 灰分采用  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  马弗炉灼烧法 (GB/T 6438—2007) 测定; 粗蛋白采用凯氏定氮法 (GB/T 6432—2018) 测定; 粗脂肪采用索氏抽提法 (GB/T 6433—2006) 测定; 能量采用燃烧法 (IKA, C6000, Germany) 测定; 水苏糖含量采用高效液相色谱法 (QB/T 4260—2018) 测定。

肠道蛋白酶 (protease)、脂肪酶 (lipase)、淀粉

酶 (amylase)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、丙二醛 (malondialdehyde, MDA)、碱性磷酸酶 (alkaline phosphatase, AKP)、酸性磷酸酶 (acid phosphatase, ACP)、葡萄糖激酶 (glucokinase, GK)、果糖磷酸激酶 (6-phosphofructokinase, PFK)、丙酮酸激酶 (pyruvate kinase, PK)、磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶 (phosphoenolpyruvate, PEPCK) 活性使用南京建成生物工程研究所的试剂盒测定, 方法参照各试剂盒说明书进行。

### 1.4 肠道组织切片的制作与观察

将固定后的肠道组织经脱水、透明、透蜡后包埋, 之后切成  $6 \mu\text{m}$  厚的切片用苏木精-伊红染色, 用中性树脂封片。每个样品选取 10 个非连续的切片, 在  $40\times$  物镜下观察, 采用 Leica DM500 图像采集系统测量肌层厚度 (thickness of muscularis, tM) 及皱襞高度 (height of fold, hF)。

### 1.5 数据统计分析

实验数据采用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 若各组间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 则用 Duncan 氏检验进行多重比较分析。统计结果以平均值  $\pm$  标准差 (mean  $\pm$  SD) 表示。

## 2 结果

### 2.1 水苏糖对仿刺参生长性能及体成分的影响

饲料中不同含量的水苏糖对仿刺参幼参存活率 (SR) 无显著性影响 ( $P > 0.05$ ): 除 D6 组外, 各组仿刺参幼参的增重率 (WGR) 和特定生长率 (SGR) 均显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ), 且随着水苏糖含量的增加, 呈先上升后下降的趋势, 在 D3 组达到最大值; 肠壁比无显著性差异 ( $P > 0.05$ ) (表 2)。

以增重率为评价指标, 经一元二次回归分析得出, 初始体重为 ( $11.46 \pm 0.03$ ) g 仿刺参幼参饲料中水苏糖的最适添加量为  $0.129\%$  (图 1)。

饲料中不同含量的水苏糖对仿刺参幼参体壁的水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分无显著性影响 ( $P > 0.05$ ) (表 3)。

### 2.2 水苏糖对仿刺参肠道消化生理的影响

随着饲料中水苏糖含量的增加, 仿刺参肠道蛋白酶和脂肪酶活性均呈先上升后下降的趋势。D3、D4 组蛋白酶活性显著高于 D1、D5、D6 组 ( $P < 0.05$ ); D3 组脂肪酶显著高于除 D2 组外的其他组 ( $P < 0.05$ )。水苏糖对肠道淀粉酶活性影响不

表 2 水苏糖对仿刺参生长性能的影响

Tab. 2 Effects of dietary STA on growth performance of sea cucumber *A. japonicus*

指标 items	组别 groups					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
初始体重/g IBW	11.48±0.02	11.45±0.04	11.43±0.04	11.48±0.02	11.45±0.04	11.47±0.04
终末体重/g FBW	18.73±0.82 <sup>a</sup>	20.43±0.85 <sup>b</sup>	21.82±0.51 <sup>c</sup>	21.06±0.32 <sup>bc</sup>	20.52±0.45 <sup>b</sup>	18.75±0.32 <sup>a</sup>
增重率/% WGR	63.22±6.90 <sup>a</sup>	78.48±6.80 <sup>b</sup>	90.88±4.57 <sup>c</sup>	83.48±2.50 <sup>bc</sup>	79.08±4.46 <sup>b</sup>	63.51±2.67 <sup>a</sup>
特定生长率(%/d) SGR	0.73±0.07 <sup>a</sup>	0.87±0.06 <sup>b</sup>	0.96±0.04 <sup>c</sup>	0.90±0.02 <sup>bc</sup>	0.86±0.04 <sup>b</sup>	0.73±0.02 <sup>a</sup>
肠壁比/% IBR	7.98±1.44	7.29±0.43	7.04±0.13	7.97±1.92	7.71±0.39	7.76±0.34
存活率/% SR	98.89±1.92	97.78±1.92	98.89±1.92	97.78±1.92	100.00±0.00	97.78±1.92

注: 同行数据上标不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 下同。

Notes: In the same row, different superscript letters represent significant differences( $P<0.05$ ), the same below.

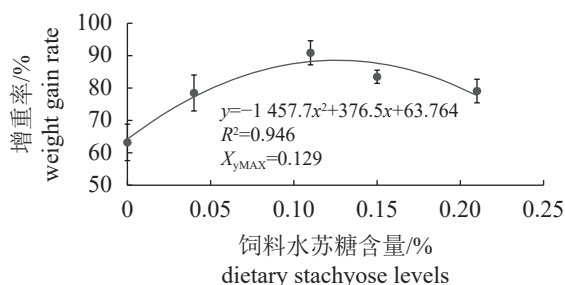


图 1 仿刺参增重率与饲料水苏糖含量的回归分析

Fig. 1 Regression analysis between dietary STA level and weight gain rate (WGR) of *A. japonicus*

显著 ( $P>0.05$ )(表 4)。

实验仿刺参肠道的皱襞高度随水苏糖含量的增加而呈先上升后下降的趋势, 其中 D3、D4 组显著高于对照组 ( $P<0.05$ ), 而 D5、D6 组显著低

于 D3、D4 组 ( $P<0.05$ ); 肌层厚度无显著性差异 ( $P>0.05$ )(表 5)。

D3、D4 组细胞核排列整齐、紧密, D6 组肠道皱襞出现异常, 有炎症细胞浸润的现象 (图版)。

### 2.3 水苏糖对仿刺参肠道免疫酶活性的影响

随着饲料中水苏糖含量的增加, 仿刺参肠道 SOD 活性呈先上升后下降的趋势, D3、D4、D5 组 SOD 活性显著高于对照组 ( $P<0.05$ ); MDA 含量呈先下降后上升的趋势, 且 D3 组显著低于其他组 ( $P<0.05$ )。ACP、AKP 活性不受饲料中水苏糖含量的影响 ( $P>0.05$ ) (表 6)。

### 2.4 水苏糖对仿刺参肠道糖代谢酶活性的影响

随着饲料中水苏糖含量的增加, 刺参肠道 GK 活性呈先上升后平稳的趋势, 且 D3 ~ D6 显著

表 3 水苏糖对仿刺参体壁基本成分的影响

Tab. 3 Effects of dietary STA on approximate composition of body wall of *A. japonicus*

指标 items	组别 groups					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
水分/% moisture	91.33±0.06	91.34±0.12	91.34±0.48	91.37±0.05	91.24±0.03	91.3±0.26
粗蛋白/% crude protein	46.86±0.13	46.85±0.23	46.82±0.18	46.79±0.07	46.68±0.10	46.68±0.11
粗脂肪/% crude lipid	4.00±0.36	4.18±0.16	4.09±0.06	4.08±0.06	3.93±0.13	4.12±0.11
粗灰分/% crude ash	32.92±0.12	32.87±0.09	33.10±1.78	32.94±0.32	32.62±0.22	33.24±0.97

注: 粗灰分、粗蛋白和粗脂肪含量为干基含量; 下同。

Notes: The crude ash, crude protein and crude lipid contents of body wall are based on dry basis, the same below.

表 4 水苏糖对仿刺参肠道消化酶活性的影响

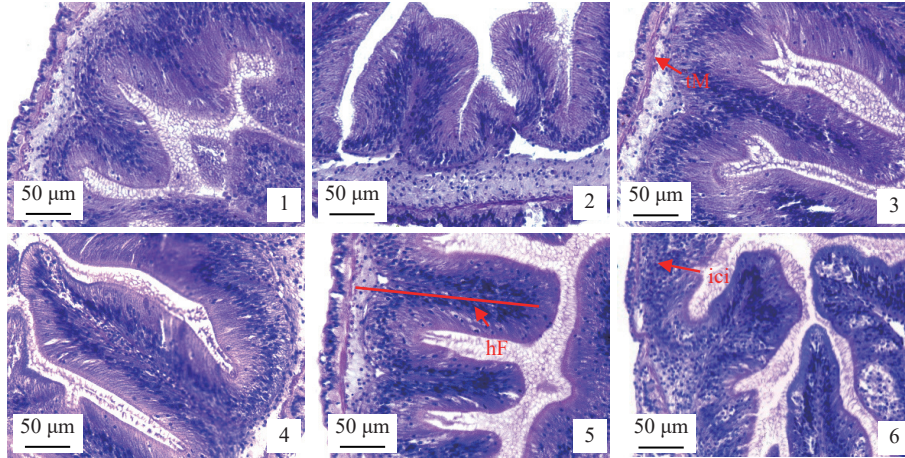
Tab. 4 Effects of dietary STA on intestinal digestive enzymes of *A. japonicus*

指标 items	组别 groups					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
蛋白酶/[U/(mg prot)] protease	1267.90±30.61 <sup>a</sup>	1388.46±34.07 <sup>bc</sup>	1456.08±36.86 <sup>c</sup>	1445.00±43.27 <sup>c</sup>	1351.26±67.53 <sup>b</sup>	1326.96±25.55 <sup>ab</sup>
脂肪酶/[U/(g prot)] lipase	4.22±0.72 <sup>a</sup>	4.87±0.17 <sup>bc</sup>	5.27±0.08 <sup>c</sup>	4.65±0.09 <sup>ab</sup>	4.55±0.03 <sup>ab</sup>	4.52±0.14 <sup>ab</sup>
淀粉酶/[U/(mg prot)] amylase	1.28±0.41	1.26±0.11	1.33±0.05	1.31±0.04	1.33±0.27	1.27±0.01

表 5 水苏糖对仿刺参肠道结构的影响

Tab. 5 Effects of dietary STA on the structure of intestine of *A. japonicus*

指标 items		组别 groups					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
肌层厚度/ $\mu\text{m}$	tM	6.96 $\pm$ 0.63	6.86 $\pm$ 1.73	6.10 $\pm$ 0.62	6.37 $\pm$ 1.55	6.61 $\pm$ 0.27	6.46 $\pm$ 0.35
皱襞高度/ $\mu\text{m}$	hF	176.93 $\pm$ 20.34 <sup>ab</sup>	204.08 $\pm$ 20.8 <sup>b</sup>	274.91 $\pm$ 25.02 <sup>c</sup>	306.16 $\pm$ 25.95 <sup>c</sup>	187.43 $\pm$ 15.63 <sup>ab</sup>	150.15 $\pm$ 10.82 <sup>a</sup>

图版 水苏糖对仿刺参肠道组织形态的影响 ( $\times 40$ )

1-6 分别表示仿刺参肠道在 0、0.04%、0.11%、0.15%、0.21% 和 0.27% 水苏糖影响下的组织形态。tM. 肌层厚度, hF. 皱襞高度, ici. 炎症细胞浸润。

Plate Effects of dietary STA on intestinal morphology of *A. japonicus*( $\times 40$ )

1-6 show the intestinal morphology of *A. japonicus* under the influence of 0, 0.04%, 0.11%, 0.15%, 0.21% and 0.27% stachyose, respectively. tM. thickness of muscularis, hF. height of fold, ici. inflammatory cell infiltration.

表 6 水苏糖对仿刺参肠道免疫酶活性的影响

Tab. 6 Effects of dietary STA on intestinal immune enzymes of *A. japonicus*

指标 items		组别 groups					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
酸性磷酸酶/[金氏单位/(g prot)]	ACP	147.14 $\pm$ 6.96	157.80 $\pm$ 10.17	154.92 $\pm$ 7.64	143.46 $\pm$ 2.16	141.92 $\pm$ 8.97	153.85 $\pm$ 3.10
碱性磷酸酶/[金氏单位/(g prot)]	AKP	633.64 $\pm$ 34.74	606.33 $\pm$ 31.94	631.68 $\pm$ 28.02	617.87 $\pm$ 35.00	630.50 $\pm$ 24.25	668.88 $\pm$ 48.59
超氧化物歧化酶/[U/(mg prot)]	SOD	7644.36 $\pm$ 226.89 <sup>a</sup>	7784.66 $\pm$ 26.77 <sup>ab</sup>	8269.63 $\pm$ 310.50 <sup>bc</sup>	8472.09 $\pm$ 359.90 <sup>c</sup>	8044.62 $\pm$ 376.50 <sup>b</sup>	7776.57 $\pm$ 330.50 <sup>ab</sup>
丙二醛/[nmol/(mg prot)]	MDA	4.42 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>	3.48 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	2.77 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	3.49 $\pm$ 0.15 <sup>b</sup>	3.81 $\pm$ 0.11 <sup>bc</sup>	4.06 $\pm$ 0.38 <sup>c</sup>

高于对照组, D5、D6 组显著高于 D3、D4 组 ( $P < 0.05$ ); PFK 和 PK 活性呈先上升后下降的趋势, 分别在 D4 和 D3 组达最大值; PEPCK 活性呈上升趋势, D2 ~ D5 组显著高于对照组, D6 组显著高于其他各组 ( $P < 0.05$ ) (表 7)。

### 3 讨论

#### 3.1 水苏糖对仿刺参生长性能及体成分的影响

本实验中, 仿刺参幼参的存活率未受饲料中水苏糖含量的影响, 且饲料中添加适量水苏糖, 仿刺参的 WGR 和 SGR 显著提高, 但随着水苏糖

含量的进一步提高, 生长性能呈下降趋势, 这与在大菱鲆上的研究类似<sup>[6-7]</sup>。水苏糖和壳寡糖等低聚糖作为双歧因子, 可促进肠道中双歧杆菌及乳酸杆菌增殖<sup>[13]</sup>, 水苏糖的促生长作用可能与之相关。首先, 水苏糖被双歧杆菌和乳酸杆菌转运至其细胞内, 被其所含有的  $\alpha$ -半乳糖苷酶水解为单糖<sup>[15]</sup>, 影响了机体糖代谢, 为生命活动提供能量, 提高了仿刺参的生长性能<sup>[3]</sup>; 其次, 水苏糖的代谢产物短链脂肪酸 (乙酸、丙酸等) 可以降低肠道 pH 值, 促进钙、镁等矿物质的吸收, 增殖有益菌, 抑制了内、外源有害菌的生长<sup>[16-18]</sup>; 然后, 水苏糖能诱导双歧杆菌和乳酸杆菌大量增殖, 有益菌

表 7 水苏糖对仿刺参肠道代谢酶活性的影响

Tab. 7 Effects of dietary STA on intestinal metabolic enzymes of *A. japonicus*

指标 items	组别 groups					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
葡萄糖激酶/(ng/mL) GK	3.22±0.09 <sup>a</sup>	3.42±0.10 <sup>a</sup>	3.81±0.10 <sup>b</sup>	4.00±0.14 <sup>b</sup>	4.35±0.15 <sup>c</sup>	4.25±0.18 <sup>c</sup>
果糖磷酸激酶/[U/(mg prot)] PFK	24.80±1.43 <sup>a</sup>	27.23±1.35 <sup>b</sup>	30.98±1.37 <sup>c</sup>	31.31±0.84 <sup>c</sup>	29.52±1.06 <sup>c</sup>	25.70±1.35 <sup>ab</sup>
丙酮酸激酶/[U/(g prot)] PK	170.23±2.56 <sup>a</sup>	207.32±15.37 <sup>bc</sup>	222.86±33.30 <sup>c</sup>	207.49±12.99 <sup>bc</sup>	177.26±1.90 <sup>ab</sup>	162.98±12.52 <sup>a</sup>
磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶/[U/(mg prot)] PEPCCK	40.91±2.96 <sup>a</sup>	54.29±2.81 <sup>b</sup>	55.30±3.04 <sup>b</sup>	58.24±0.66 <sup>b</sup>	58.68±1.93 <sup>b</sup>	64.37±1.85 <sup>c</sup>

能自身合成或促进合成多种维生素, 如维生素 B 和叶酸等<sup>[18]</sup>; 此外, 水苏糖还促进了肠道蠕动, 提高了肠道对营养物质的吸收能力<sup>[8]</sup>。本实验中, 随着水苏糖含量的增加, 仿刺参生长性能呈下降趋势, 与在牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*)<sup>[19]</sup> 上的研究一致, 由于水苏糖无法被动物肠道消化吸收, 需被双歧杆菌和乳酸杆菌水解, 当水苏糖含量超过机体耐受极限, 会破坏肠道菌群平衡, 改变肠道上皮细胞的渗透压, 导致肠道胀气或炎症, 并影响肠道对营养物质的吸收, 最终抑制机体生长<sup>[20]</sup>。以 WGR 为评价指标, 采用一元二次回归分析得出仿刺参幼参水苏糖的最适添加量为 0.129%, 远低于大菱鲆 (1.25%)<sup>[6]</sup>, 这可能与仿刺参的肠道结构和糖代谢能力有关。水苏糖对仿刺参幼参体壁水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分影响不显著, 该结果与大菱鲆<sup>[6]</sup>、异育银鲫<sup>[9]</sup> 和大西洋鲑<sup>[8]</sup> 一致。

### 3.2 水苏糖对仿刺参消化生理及抗氧化酶活性的影响

研究表明, 功能性低聚糖 (含水苏糖) 作为营养物质被肠道的双歧杆菌和乳酸杆菌等消化利用, 这些有益菌可以促进肠道上皮细胞增殖, 从而提高消化酶活性<sup>[21]</sup>。本实验中, 仿刺参肠道的淀粉酶活性未受水苏糖的影响, 这与在牙鲆上的研究结果一致<sup>[19]</sup>, 其原因可能和淀粉酶无法水解水苏糖的半乳糖苷键有关<sup>[31]</sup>; 而蛋白酶和脂肪酶活性随水苏糖含量增加, 呈先上升后下降的趋势, 与在大菱鲆<sup>[6]</sup> 上的研究一致, 同为功能性低聚糖的壳寡糖和低聚木糖在仿刺参上的研究也有相同的结果<sup>[13-14]</sup>。进一步增加水苏糖含量会导致消化酶活性降低, 这可能是由于水苏糖与双歧杆菌、乳酸杆菌等产生了过量的代谢产物, 刺激了肠道蠕动<sup>[22]</sup>, 营养物质和代谢产物在肠道停留的时间减少, 消化酶被抑制或排出体外<sup>[23]</sup>。

仿刺参不具备专门的消化酶分泌器官, 且消

化酶多位于肠道黏膜的柱状细胞内, 所以, 肠道黏膜能否为消化酶分泌提供特定位点, 是决定营养物质利用率的基础<sup>[24-25]</sup>。添加 0.11%~0.15% 的水苏糖, 仿刺参肠道的皱襞高度变长且细胞核排列更整齐, 表明水苏糖可通过改善仿刺参肠道结构, 促进消化酶的分泌, 提高了营养物质的消化利用率。当饲料中水苏糖含量过高时, 仿刺参肠道的皱襞高度变短, 且出现炎症细胞浸润的现象, 此时, 仿刺参肠道渗透压增加, 这会有利于病原菌在肠道上皮的定植, 导致肠道过度蠕动, 营养物质消化率降低, 抑制仿刺参生长<sup>[26]</sup>。

仿刺参是无脊椎动物, 主要依靠非特异性免疫, 对外来物质的识别与清除多依靠吞噬细胞进行<sup>[27]</sup>。AKP 和 ACP 参与了磷酸单脂的水解和磷酸基团的转移, 可代谢机体磷化物及参与机体解毒, 可作为巨噬细胞溶菌体的标志酶, 可反映吞噬细胞活性, 是非特异性免疫的重要指标<sup>[28-29]</sup>。在本实验中, 水苏糖含量对仿刺参肠道 AKP 和 ACP 活性无显著影响, 这表明水苏糖对仿刺参吞噬细胞的影响较弱。SOD 是重要的抗氧化酶, 可以清除机体的超氧阴离子自由基, MDA 则是被自由基氧化后的产物, SOD 和 MDA 均能直接反映机体自由基的代谢状况和组织损伤情况<sup>[30]</sup>。当水苏糖含量在 0.11%~0.15% 时, 仿刺参肠道 SOD 活性显著提高, MDA 含量显著降低, 这表明水苏糖的代谢产物能提高仿刺参抗氧化能力, 这与其他功能性低聚糖 (低聚木糖<sup>[23]</sup>、甘露寡糖<sup>[26]</sup>) 一致。适量的水苏糖可促进肠道双歧杆菌等有益菌的增殖, 提高仿刺参对营养物质的代谢利用能力, 这有利于免疫因子 (NADPH) 的合成, 以提高机体抗氧化能力<sup>[31]</sup>; 过量的水苏糖则会破坏仿刺参肠道菌群平衡, 降低营养物质的利用率, 体内代谢平衡被打破, 从而导致仿刺参抗氧化能力降低<sup>[32]</sup>。

### 3.3 仿刺参对水苏糖代谢的影响

糖代谢相关途径包括糖酵解、三羧酸循环、

磷酸戊糖途径、糖原的生成及分解和糖异生等, 通过这些复杂系统的正常运行可以控制动物体内葡萄糖稳态, 并为机体提供能量<sup>[33]</sup>。GK、PFK 和 PK 是糖酵解途径中 3 个关键的限速酶, 反映了细胞中葡萄糖的分解代谢能力<sup>[34]</sup>。GK 能将葡萄糖磷酸化为葡萄糖-6-磷酸 (glucose-6-phosphate, G-6-P), G-6-P 无法转运出细胞外, 而可作为底物在各催化酶催化下逐步合成糖原或转化为丙酮酸, PFK 和 PK 则是控制该过程方向与速率的关键酶<sup>[33]</sup>。在本实验中, 随着水苏糖含量的增加, D1 ~ D4 组仿刺参肠道 GK、PFK 和 PK 活性呈上升趋势, 这表明适量的水苏糖可促进肠道糖酵解, 增强葡萄糖分解代谢能力, 并为机体提供能量。水苏糖作为双歧因子, 能诱导双歧杆菌产生更多的  $\alpha$ -半乳糖苷酶水解水苏糖<sup>[15]</sup>。相关研究表明, 水苏糖在双歧杆菌中的代谢产物短链脂肪酸 (如乙酸、丙酸等) 能增强细胞活性, 并为机体提供能量, 促进肠道双歧杆菌的增殖<sup>[35]</sup>。在稳定的糖代谢条件下, 机体会通过三羧酸循环、磷酸戊糖循环分别产生短链脂肪酸和 NADPH, 短链脂肪酸来调节肠道微生物系统和改善肠道结构<sup>[17]</sup>, 而 NADPH 作为抗氧化系统中重要的组成部分, 对提高机体抗氧化能力起重要作用<sup>[31]</sup>。当水苏糖含量超过仿刺参的耐受能力时, GK 活性趋于平稳, 而 PFK 和 PK 活性显著降低, 这表明丙酮酸生成途径出现异常<sup>[27]</sup>。丙酮酸作为糖代谢及多种物质相互转化的重要中间体, 影响了仿刺参体内的糖、脂肪与氨基酸之间的相互转化和 NADPH 的产生<sup>[36]</sup>。PEPCK 是糖异生中重要的催化酶, 可反映机体血糖水平是否稳定<sup>[37]</sup>, 也可作为糖异生过程的催化酶, 将丙酮酸、乳酸等非糖类物质转化为糖, 维持体内葡萄糖稳定<sup>[38]</sup>。本实验中, 仿刺参肠道 PEPCK 活性呈显著上升的趋势, 这表明随着水苏糖含量的增加, 其代谢产生的能量超过了仿刺参生理活动所需的能量, 机体糖异生水平升高, 丙酮酸等非糖类物质会转变为葡萄糖或糖原, 过量的葡萄糖会转运至细胞外<sup>[27]</sup>, 此时仿刺参对营养物质的利用能力和抗氧化能力均显著下降, 降低了仿刺参的生长性能。

#### 4 结论

本实验表明, 在饲料中添加 0.11%~0.15% 水苏糖提高了仿刺参糖代谢的效率, 并增强了仿刺

参的消化和抗氧化能力, 进而提高仿刺参的生长性能。以增重率为评价指标, 经一元二次回归分析得出初始体重为 (11.46±0.03) g 的仿刺参幼参配合饲料中水苏糖的最适添加量为 0.129 %。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

#### 参考文献 (References):

- [1] 谢瑾. 微生物发酵法提高水苏糖纯度的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
Xie J. Study on improving purity of stachyose using microorganism fermentation method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [2] 韩诗雯, 高加涛, 桑若杰, 等. 水苏糖调节肠道功能及作用机制研究[J]. 食品科技, 2019, 44(4): 281-284.  
Han S W, Gao J T, Sang R J, *et al.* The function and mechanism of stachyose on intestinal tract[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(4): 281-284 (in Chinese).
- [3] 杨东升. 双歧杆菌及寡糖类双歧因子研究[J]. 中国食品添加剂, 2004(2): 20-24.  
Yang D S. Reserching of *Bifidobacterium* and bifidus-factors[J]. *China Food Additives*, 2004(2): 20-24 (in Chinese).
- [4] 李治龙, 孟良玉. 发酵食品工艺 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2010: 178.  
Li Z L, Meng L Y. Technology of fermented food[M]. Beijing: China Measuring Press, 2010: 178 (in Chinese).
- [5] 任红立, 汪晶晶, 宋建楼, 等. 功能性低聚糖的研究进展[J]. 饲料博览, 2016(4): 35-39.  
Ren H L, Wang J J, Song J L, *et al.* Research progress of functional oligosaccharides[J]. Feed Review, 2016(4): 35-39 (in Chinese).
- [6] Hu H B, Zhang Y J, Mai K S, *et al.* Effects of dietary stachyose on growth performance, digestive enzyme activities and intestinal morphology of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L)[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(5): 905-912.
- [7] Yang P, Hu H B, Liu Y, *et al.* Dietary stachyose altered the intestinal microbiota profile and improved the intestinal mucosal barrier function of juvenile turbot, *Scophthalmus maximus* L.[J]. *Aquaculture*, 2018, 486: 98-106.
- [8] Sørensen M, Penn M, El-Mowafi A, *et al.* Effect of sta-

- chyose, raffinose and soya-saponins supplementation on nutrient digestibility, digestive enzymes, gut morphology and growth performance in Atlantic salmon (*Salmo salar*, L)[J]. *Aquaculture*, 2011, 314(1-4): 145-152.
- [9] 王文娟, 叶元土, 蔡春芳, 等. 豆粕及其抗营养因子对异育银鲫血清生化和非特异性免疫指标的影响[J]. 中国饲料, 2010(18): 30-33,41.
- Wang W J, Ye Y T, Cai C F, *et al.* Effects of soybean and antinutritional factors on serum biochemical and non-specific immune of Allogynogenetic silver crucian carp[J]. *China Feed*, 2010(18): 30-33,41 (in Chinese).
- [10] 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: 53-64.
- Liao Y L. Fauna Sinica of China Echinoderma Holothuria[M]. Beijing: Science Press, 1997: 53-64 (in Chinese).
- [11] 袁秀堂, 杨红生, 周毅, 等. 盐度对仿刺参(*Apostichopus japonicus*)呼吸和排泄的影响[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(4): 348-354.
- Yuan X T, Yang H S, Zhou Y, *et al.* Salinity effect on respiration and excretion of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka)[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2006, 37(4): 348-354 (in Chinese).
- [12] 崔龙波, 董志宁, 陆瑶华. 仿刺参消化系统的组织学和组织化学研究[J]. 动物学杂志, 2000, 35(6): 2-4.
- Cui L B, Dong Z N, Lu Y H. Histological and histochemical studies on the digestive system of *Apostichopus japonicus*[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2000, 35(6): 2-4 (in Chinese).
- [13] 司滨. 壳寡糖对仿刺参养殖的应用效果研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2017.
- Si B. Study on application effects of dietary Chitosan Oligosaccharide in breeding in sea cucumber *Apostichopus japonicus*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2017 (in Chinese).
- [14] 赵丽丽, 包焕玲, 姜永新, 等. 低聚果糖对仿刺参生长及生长免疫因子的影响[J]. 水产科学, 2019, 38(2): 145-151.
- Zhao L L, Bao H L, Jiang Y X, *et al.* Effects of dietary fructo-oligosaccharides on growth performance and immunological competence of sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Fisheries Science*, 2019, 38(2): 145-151 (in Chinese).
- [15] 邬佳颖, 陈敏暄, 金天赐, 等. 双歧杆菌和乳杆菌对水苏糖的利用特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 13-20.
- Wu J Y, Chen M X, Jin T C, *et al.* Study on the utilization characteristics of stachyose by *Bifidobacterium* and *Lactobacillus*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(24): 13-20 (in Chinese).
- [16] 崔洪斌. 大豆生物活性物质的开发与应用[J]. 中国食物与营养, 2000(1): 15-17.
- Cui H B. Development and application of soybean bioactive substances[J]. *Food and Nutrition in China*, 2000(1): 15-17 (in Chinese).
- [17] Louis P, Hold G L, Flint H J. The gut microbiota, bacterial metabolites and colorectal cancer[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2014, 12(10): 661-672.
- [18] 蔡琨, 苏东海, 陈静, 等. 大豆低聚糖的生理功能研究进展[J]. 中国食物与营养, 2012, 18(12): 56-61.
- Cai K, Su D H, Chen J, *et al.* Research advancement of the physiological functions of stachyose and raffinose in soybeans[J]. *Food and Nutrition in China*, 2012, 18(12): 56-61 (in Chinese).
- [19] 蔡英华. 几种大豆抗营养因子对牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*) 生长和消化生理的影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- Cai Y H. Effects of antinutritional factors in soybean on the growth performance and digestive physiology of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006 (in Chinese).
- [20] Wiggins H S. Nutritional value of sugars and related compounds undigested in the small gut[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 1984, 43(1): 69-75.
- [21] Balcázar J, de Blas I, Ruiz-Zarzuela I, *et al.* The role of probiotics in aquaculture[J]. *Veterinary Microbiology*, 2006, 114(3-4): 173-186.
- [22] Kihara M, Sakata T. Production of short-chain fatty acids and gas from various oligosaccharides by gut microbes of carp (*Cyprinus carpio* L.) in micro-scale batch culture[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2002, 132(2): 333-340.
- [23] 李君华, 刘佳亮, 曹学彬, 等. 饲料中添加低聚木糖对仿刺参幼参生长性能、肠道消化酶活力和免疫力的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(8): 2534-2541.
- Li J H, Liu J L, Cao X B, *et al.* Effects of dietary xylooligosaccharides on growth performance, intestinal



- digestive enzyme activities and immunity of juvenile sea cucumber (*Apostichopus japonicus* Selenka)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(8): 2534-2541 (in Chinese).
- [24] 李宝山, 王际英, 王成强, 等. 仿刺参幼参对饲料中维生素B<sub>6</sub>需求量的研究[J]. 水产学报, 2019, 43(12): 2545-2553.  
Li B S, Wang J Y, Wang C Q, *et al.* Dietary vitamin B<sub>6</sub> requirement of juvenile sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(12): 2545-2553 (in Chinese).
- [25] Fountoulaki E, Alexis M N, Nengas I, *et al.* Effect of diet composition on nutrient digestibility and digestive enzyme levels of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) [J]. *Aquaculture Research*, 2005, 36(13): 1243-1251.
- [26] 谷珉. 仿刺参 (*Apostichopus japonicus*) 免疫增强剂的体外筛选与养殖试验的评估 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
Gu M. Screening immunostimulants for sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) *in vitro* and verification *in vivo*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese).
- [27] 张琴. 刺参 (*Apostichopus japonicus* Selenka) 高效免疫增强剂的筛选与应用 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
Zhang Q. The selection and application of high-effective immunostimulants for sea cucumber (*Apostichopus japonicus* Selenka)[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese).
- [28] 孙静秋, 许燕, 张慧绮, 等. 凡纳对虾体内ACP、AKP酶的细胞化学定位[J]. 复旦学报(自然科学版), 2007, 46(6): 947-951.  
Sun J Q, Xu Y, Zhang H Q, *et al.* Study on cytochemical location of acid phosphatase and alkaline phosphatase of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2007, 46(6): 947-951 (in Chinese).
- [29] Wang Y B, He Z L. Effect of probiotics on alkaline phosphatase activity and nutrient level in sediment of shrimp, *Penaeus vannamei*, ponds[J]. *Aquaculture*, 2009, 287(1-2): 94-97.
- [30] Bagnyukova T V, Storey K B, Lushchak V I. Induction of oxidative stress in *Rana ridibunda* during recovery from winter hibernation[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2003, 28(1): 21-28.
- [31] 姚朋波. 苹果酸酶调控磷酸戊糖途径的分子机制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2018.  
Yao P B. A direct cross-talk between malic enzyme and the pentose phosphate pathway via structural interactions[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018 (in Chinese).
- [32] 强俊, 王辉, 李瑞伟, 等. 低聚木糖对奥尼罗非鱼幼鱼生长、体成分和消化酶活力的影响[J]. 淡水渔业, 2009, 39(6): 63-68.  
Qiang J, Wang H, Li R W, *et al.* Effect of xylooligosaccharides on growth, whole body composition and digestive enzymes activities in hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)[J]. *Freshwater Fisheries*, 2009, 39(6): 63-68 (in Chinese).
- [33] 张傲. 东北林蛙油中糖和脂类及其代谢相关因子表达的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.  
Zhao A. Study on the expression of carbohydrate and lipid and their metabolic related factors in *Rana* oil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020 (in Chinese).
- [34] Brouwers M C G J, Jacobs C, Bast A, *et al.* Modulation of glucokinase regulatory protein: a double-edged sword?[J]. *Trends in Molecular Medicine*, 2015, 21(10): 583-594.
- [35] 孙纪录, 贾英民, 田洪涛, 等. 双歧杆菌生长促进因子的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(8): 110-112.  
Sun J L, Jia Y M, Tian H T, *et al.* Advances in the research of bifidus factor[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2003, 24(8): 110-112 (in Chinese).
- [36] 干懿洁, 丁树哲. 丙酮酸的抗氧化作用[J]. 中国临床康复, 2006, 10(8): 141-143.  
Gan Y J, Ding S Z. Anti-oxidation of pyruvate[J]. *Chinese Journal of Clinical Rehabilitation*, 2006, 10(8): 141-143 (in Chinese).
- [37] Mcleod M J, Krismanich A P, Assoud A, *et al.* Characterization of 3-[(Carboxymethyl)thio]picolinic acid: a novel inhibitor of phosphoenolpyruvate carboxykinase [J]. *Biochemistry*, 2019, 58(37): 3918-3926.
- [38] Oh K J, Han H S, Kim M J, *et al.* CREB and FoxO1: two transcription factors for the regulation of hepatic gluconeogenesis[J]. *BMB Reports*, 2013, 46(12): 567-574.

## Effects of dietary stachyose on growth, digestive physiology and glycometabolism of juvenile sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)

GUO Peng<sup>1,2</sup>, WANG Jiying<sup>1\*</sup>, LI Baoshan<sup>1</sup>, WANG Meiqi<sup>1,2</sup>,  
SUN Yongzhi<sup>1</sup>, HUANG Bingshan<sup>1</sup>, WANG Shixin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Resource and  
Environment Research Institute, Yantai 264006, China;

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

**Abstract:** Stachyose is a functional oligosaccharide, which is utilized by bifidobacterium and lactobacillus in the intestines, and plays an important role in the digestive physiology and antioxidant properties of the body. Juvenile sea cucumbers *Apostichopus japonicus* has high nutritional value and is an important breeding species in the Yellow Sea and Bohai Sea areas of China. This study investigated the effects of dietary stachyose on growth, digestive physiology and glycometabolism of juvenile sea cucumber *A.japonicus*. Six experimental diets were formulated to contain the graded levels of stachyose [0 (D1, control group), 0.04% (D2), 0.11% (D3), 0.15% (D4), 0.21% (D5) and 0.27% (D6) dry diets]. Each diet was randomly assigned to triplicate tanks of sea cucumber juveniles with initial body weight (11.46±0.03) g for 67 days. The results showed that there were no differences in survival rate (SR) and ratio of intestine weight to body wall weight (IBR) among all groups. Both weight gain rate (WGR) and the specific growth rate (SGR) increased with increasing stachyose content until reaching peak levels at 0.15% dietary stachyose, but decreased thereafter. The WGR and SGR of D2, D3, D4 and D5 groups were significantly higher than D1 group. The WGR reached maximum value of 90.88% in the D3 group. There were no significant effects on moisture, crude protein, crude fat and ash of body wall of *Apostichopus japonicus*. The activities of intestinal protease, lipase and superoxide dismutase were increased when dietary stachyose content increased from 0 to 0.15% and then decreased. The protease of D3 and D4 groups were significantly higher than other groups, meanwhile, the lipase of D3 group was significantly higher than other groups. The superoxide dismutase activity of D3, D4 and D5 groups were significantly higher than the control group. The content of malondialdehyde was first decreased and then increased, and reached the lowest value in D3 group. There was no significant difference among the activities of amylase, alkaline phosphatase and acid phosphatase. The height of intestinal folds in D3 and D4 groups was significantly greater than that in the control group, and inflammatory cell infiltration appeared in D6 group. There were no significant differences in the ratio of intestine weight to body wall weight and the thickness of muscularis among all group. With the increase of stachyose content, the activities of glucokinase and phosphoenolpyruvate carboxykinase increased, while the activities of fructosophosphate phosphokinase and pyruvate kinase increased first and then decreased. The glucokinase activities of D3, D4, D5 and D6 groups were significantly higher than the control group. The fructosophosphate phosphokinase activities of D3, D4 and D5 groups were significantly higher than the other groups, and reached maximum value in the D4 group. The pyruvate kinase activities of D3 groups were significantly higher than the other groups. The phosphoenolpyruvate carboxykinase activities of D2, D3, D4 and D5 groups were significantly higher than the control group and significantly lower than D6 group. The results showed that dietary stachyose increased the glucose metabolism efficiency, improved the digestive physiology and antioxidant capacity of the body, and promoted the growth of the sea cucumber juvenile. With the weight gain rate as an evaluation indicator, quadratic regression analysis showed that the optimum dietary stachyose of sea cucumber juvenile was 0.129% diet. As a functional oligosaccharide, stachyose plays an important role in the digestion, metabolism and antioxidation of *A.japonicus*, and has deep research significance in the application of compound feed of *A.japonicus*.

**Key words:** *Apostichopus japonicus*; stachyose; growth; digestive physiology; immunity; glycometabolism

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

**Funding projects:** Sea Cucumber Industry System-Nutrition and Feed position of Shandong Province(SDAIT-22-06); The Science and Technology Development Project of Yantai (2021XDHZ056)