



饲料中添加浒苔对凡纳滨对虾生长性能和肌肉品质的影响

王靖¹, 姚文祥¹, 李小勤¹, 冷向军^{1,2,3*}

- (1. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;
2. 上海海洋大学, 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306;
3. 上海海洋大学, 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 为了探究在不同鱼粉含量的饲料中添加浒苔对凡纳滨对虾的生长性能和肌肉品质的影响, 实验采用 2×3 双因子实验设计, 在鱼粉含量分别为 18%(A) 和 15%(B) 的基础饲料中添加 0、3% 和 6% 浒苔 (分别记为 A0、A3、A6、B0、B3 和 B6), 制成 6 组等氮等能饲料 (粗蛋白含量为 38.5%)。饲喂初始体质量为 (3.0±0.1) g 的凡纳滨对虾, 共 6 组, 每组设 4 个重复, 每个重复 50 尾虾, 饲养 8 周后, 测定虾体生长性能、常规组成、营养物质利用、肌肉系水力和质构。结果显示, 饲料中的鱼粉和浒苔水平对凡纳滨对虾的终末均质量、增重率和饲料系数均有显著影响; A0 组终末均质量为 22.6 g, 增重率最大 (654.2%), 饲料系数最低 (1.61); B6 组终末均质量为 20.8 g, 增重率最低 (595.7%), 饲料系数最高 (1.81); 在 18%、15% 鱼粉饲料中添加 3% 浒苔, 对凡纳滨对虾的生长性能无显著影响, 添加 6% 浒苔, 显著降低了增重率, 升高了饲料系数; 在同等的浒苔添加量下, 15% 鱼粉组 (B 组) 的增重率在数值上低于 18% 鱼粉组 (A 组)。饲料浒苔含量显著影响全虾的粗蛋白和粗脂肪含量, A6、B0、B3 和 B6 组的粗蛋白含量较 A0 组显著降低, A6、B6 组虾体脂肪含量显著低于 A0 和 B0 组。饲料中鱼粉和浒苔的含量显著影响蛋白质效率和蛋白质沉积率, 浒苔含量还显著影响脂肪沉积率和蛋白质表观消化率, A3、A6 和 B3、B6 组的蛋白质效率、蛋白质沉积率、脂肪沉积率和蛋白质表观消化率均分别较 A0、B0 组显著降低。在肌肉品质方面, 当浒苔添加量达到 6% 时, 显著降低肌肉煮失水率、冷冻失水率, 提高了胶原蛋白含量, A3、A6 和 B6 组肌肉硬度和咀嚼性分别较 A0、B0 组显著提高。研究表明, 在饲料中添加 3% 浒苔, 对凡纳滨对虾生长性能无显著影响, 添加 6% 浒苔, 降低了虾体的增重率和饲料利用, 但可改善肌肉品质。

关键词: 凡纳滨对虾; 浒苔; 生长; 肌肉品质

中图分类号: S 963.7

文献标志码: A

浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 俗称苔条、青海苔, 属绿藻门 (Chlorophyta) 绿藻纲 (Chloro-

phyceae) 石莼目 (Ulvales) 石莼科 (Ulvaceae)^[1], 广泛分布于全世界, 具有环境适应性强, 生长迅

收稿日期: 2019-10-31 修回日期: 2020-06-01

资助项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0900203)

第一作者: 王靖 (照片), 从事水产动物营养与饲料学研究, E-mail: 1457787073@qq.com

通信作者: 冷向军, E-mail: xjleng@shou.edu.cn



速等特点^[2]。浒苔暴发后, 规模大, 持续时间长, 且具有很强黏附性, 常常附着在海洋基础设施和船体上, 给海洋生态环境、沿海景观以及海洋渔业和旅游业造成严重破坏^[3-4]。另一方面, 浒苔本身被认为是一种高蛋白、低脂肪、矿物质丰富, 以及富含人体8种必需氨基酸的优质海藻^[5-6]。然而, 浒苔纤维素细胞壁较为坚韧, 影响了动物体对其细胞内的营养物质的消化^[7]。

目前, 国内外已有一些在水产饲料中添加浒苔的报道。在黄斑篮子鱼 (*Siganus oramin*) 饲料中添加5%浒苔对鱼体生长性能没有显著影响, 但当浒苔添加量为10%、15%时, 其生长性能显著下降^[8]; 卢青等^[9]在对大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 的研究中发现, 在饲料中添加5%浒苔对鱼体生长有促进作用; Asino等^[10]在大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 幼鱼的饲料中添加15%浒苔, 对鱼体生长无影响。

凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 是世界范围内广泛养殖的一种虾类, 2016年的全球年产量为415.6万t^[11]。在凡纳滨对虾饲料中是否可添加

浒苔, 对虾体生长和肉质是否会产生影响? 目前均未见有关报道。故本实验以凡纳滨对虾为实验对象, 在不同比例鱼粉(18%、15%)的基础饲料中, 分别添加0%、3%和6%的浒苔, 研究其对凡纳滨对虾的生长性能、虾体成分、肌肉系水力和肌肉质构的影响, 为浒苔的开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验设计和实验饲料

本研究采用2×3双因子实验设计, 在鱼粉含量为18%(A)、15%(B)的饲料中分别添加0%、3%、6%浒苔(分别记为A0、A3、A6、B0、B3和B6), 相应减少次粉比例, 配制成6组等氮等能饲料。浒苔经超微粉碎处理, 含粗蛋白质13.5%, 粗脂肪1.3%。其他主要饲料原料粉碎后过60目筛, 另添加500 mg/kg Y₂O₃作为外源指示剂, 按饲料配方(表1)混合均匀。用单螺杆挤压机制成直径为1.2 mm的沉性颗粒饲料[制粒

表1 实验饲料组成和营养水平(风干基础)
Tab. 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (air dry basis) %

	A0	A3	A6	B0	B3	B6
原料 ingredients						
鱼粉 fish meal	18.00	18.00	18.00	15.00	15.00	15.00
次粉 wheat middlings	29.25	26.25	23.25	27.01	24.01	21.01
浒苔 <i>E.prolifera</i>	0.00	3.00	6.00	0.00	3.00	6.00
豆粕 soybean meal	12.00	12.00	12.00	17.00	17.00	17.00
鱼油 fish oil	2.10	2.10	2.10	2.34	2.34	2.34
维生素预混料 vitamin premix ¹⁾	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
矿物质预混料 mineral premix ²⁾	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
其他 other ³⁾	37.55	37.55	37.55	37.55	37.55	37.55
总计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养成分 nutrient content						
粗蛋白 crude protein	38.76	38.30	38.93	38.28	38.53	38.29
粗脂肪 crude fat	8.31	7.87	7.96	8.41	7.93	7.71
水分 moisture	7.15	6.74	6.84	7.26	6.42	6.97

注: 1) 1 kg 维生素预混料含有维生素 A 300 000 IU, 维生素 D₃ 170 000 IU, 维生素 E 2 000 IU, 维生素 K₃ 500 mg, 维生素 B₁ 1 200 mg, 维生素 B₂ 2 000 mg, 维生素 B₆ 1 500 mg, 叶酸 150 mg, 烟酸 2 700 mg, 泛酸 2 500 mg; 2) 1 kg 矿物质预混料含有铜 1 000 mg, 铁 18 000 mg, 锰 2 500 mg, 锌 3 500 mg, 硒 16 mg, 碘 430 mg, 钴 50 mg。原料组成: 无水硫酸铜, 一水硫酸亚铁, 一水硫酸锰, 一水硫酸锌, 亚硒酸钠, 无水碘酸钾, 氯化钴; 3) 其他: 花生粕 12%、鱿鱼膏 6%、啤酒酵母 4%、大豆磷脂 1.5%、大豆浓缩蛋白 5%、玉米蛋白粉 5%、三氧化二钽 0.05%、膨润土 2%、磷酸二氢钙 2%

Notes: 1) One kilogram of vitamin premix contained: vitamin A 300 000 IU, vitamin D₃ 170 000 IU, vitamin E 2 000 IU, vitamin K₃ 500 mg, vitamin B₁ 1 200 mg, vitamin B₂ 2 000 mg, vitamin B₆ 1 500 mg, folic acid 150 mg, nicotinic acid 2 700 mg, pantothenic acid 2 500 mg; 2) One kilogram of mineral premix contained: cuprum 1 000 mg, iron 18 000 mg, manganese 2 500 mg, zinc 3 500 mg, selenium 16 mg, iodine 430 mg, cobalt 50 mg. Composition of raw materials: anhydrous copper sulfate, ferrous sulfate monohydrate, manganese sulfate monohydrate, zinc sulfate monohydrate, sodium selenite, anhydrous potassium iodate, cobalt chloride; 3) others: peanut meal 12%, squid visceral meal 6%, brewers dried yeast 4%, soybean lecithin 1.5%, soyprotein concentrate 5%, cornprotein powder 5%, Y₂O₃ 0.05%, bentonite 2%, monocalcium phosphate 2%

温度为(85±5) °C], 95 °C烘箱内后熟化 20 min, 风干至水分含量低于 10%, 密封保存备用。

1.2 实验虾及饲养管理

凡纳滨对虾虾苗购于上海市浦东新区某育苗种场, 购回后在水泥池中暂养, 并投喂商品饲料(苏州通威特种饲料有限公司生产, 粗蛋白含量≥42%)。在正式开始实验前 24 h 停止投喂饲料, 挑选个体大小均匀的健康对虾 1 200 尾(初始体质量约为 3.00 g), 随机分配至 24 个网箱(1.5 m×1.0 m×1.2 m)中, 分置于 3 个水泥池(5.0 m×3.0 m×1.2 m)中, 每个水泥池中放置 8 个网箱, 每个网箱 50 尾, 实验共设置 6 个处理组, 每个处理组 4 个平行(网箱)。

在养殖实验过程中, 每日的投喂量约为对虾体质量的 3%~8%(前期投喂率高, 后期投喂率低), 分 4 次投喂(6:00、12:00、17:00 和 23:00), 根据对虾食性, 早晚投喂量约占总量的 70%。根据对虾的进食情况和天气情况等作出投喂量的调整, 使各网箱饲料投喂量基本一致, 并确保饲料在投喂后 2 h 内被采食完; 昼夜充气, 采用虹吸法吸走池底粪便, 前期每周吸污 1 次, 后期每周吸污 2 次, 吸污后换水 1/3。在养殖实验期间, 水温 29~32 °C、盐度 1~2、溶解氧≥5.6 mg/L、pH 7.8~8.5、氨氮≤0.2 mg/L、亚硝酸盐≤0.1 mg/L。饲养实验共持续 8 周。养殖实验于上海海洋大学滨海特种养殖场进行。

1.3 粪便收集

实验开始 4 周后, 在每次投喂后 2 h, 用镊子轻取食台上包膜完整的粪便, 保存于-20 °C 冰箱中。待收集足量粪便样品后, 105 °C 干燥、密封存放于-20 °C 冰箱中, 用于营养物质消化率的分析。

1.4 样品采集

养殖实验开始时, 随机选取 60 尾对虾于-20 °C 冰箱中保存, 其中 10 尾虾合并为一个样本, 用于初始样本成分分析。实验结束前 24 h 停止投喂。每个网箱随机挑选 3 尾对虾, 保存于-20 °C 的冰箱中用于全虾体成分分析, 另取 3 尾虾, 取其肌肉立即用于煮失水率和冷冻失水率的测定; 取 3 尾对虾用于肌肉质构和肌肉胶原蛋白含量的测定。

1.5 测定指标和方法

生长性能 实验结束前 24 h 停止投喂。

每个网箱进行称重并记录尾数, 计算生长性能指标, 包括存活率(SR)、增重率(WGR)、饲料系数(FCR)、蛋白质效率(PER)、蛋白质沉积率(PRE)和脂肪沉积率(LRE):

$$\text{存活率 (survival rate, SR, \%)} = N_t/N_0 \times 100\%$$

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

$$\text{饲料系数 (feed conversion ratio, FCR)} = W_f/(W_t - W_0)$$

$$\text{蛋白质效率 (protein efficiency ratio, PER)} = (W_t - W_0)/(W_f \times W_p)$$

$$\text{蛋白质沉积率 (protein retention efficiency, PRE, \%)} = (W_t - W_0)/M \times 100\%$$

$$\text{脂肪沉积率 (lipid retention efficiency, LRE, \%)} = (W_t \times W_{2CL} - W_0 \times W_{1CL})/(W_f \times F_{CL}) \times 100\%$$

式中, N_t 为终末尾数(尾), N_0 为初始尾数(尾), W_t 为终末体质量(g), W_0 为初始体质量(g), W_f 为摄入饲料量(g), W_p 为饲料中的粗蛋白含量(%), M 为摄食蛋白质含量(%), W_{2CL} 为终末全虾粗脂肪含量(%), W_{1CL} 为初始全虾粗脂肪含量(%), F_{CL} 饲料粗脂肪含量(%)。

饲料、粪便、全虾组成和钇元素含量 凡纳滨对虾及饲料样品的常规成分分析采用国际标准方法。水分含量在 105 °C 下烘干至恒重测定; 粗蛋白质含量采用自动凯氏定氮仪(2300-Auto-analyzer, Foss Tecator, Sweden)测定; 粗脂肪含量采用氯仿—甲醇提取法测定; 粗灰分含量在 550 °C 中灼烧 4 h 后测得。饲料和粪便中钇元素的分析采用等离子体原子发射光谱法(ICP)(Vista MPX, Varian, Alo Alto, California, America)。在此基础上, 计算蛋白质表观消化率(ADCCP), 如下:

$$\text{蛋白质表观消化率 (ADCCP, \%)} = [1 - (D_Y \times F_{CP})]/(F_Y \times D_{CP}) \times 100\%$$

式中, D_Y 为饲料钇含量(%), F_{CP} 为粪便粗蛋白含量(%), F_Y 为粪便钇含量(%), D_{CP} 为饲料中粗蛋白含量(%)。

胶原蛋白 参照 AOAC 方法 990.26(AOAC, 2000), 先测定样品总羟脯氨酸(Hyp)含量, 胶原蛋白含量可用所测羟脯氨酸含量乘以换算系数 8 得到。总羟脯氨酸含量的测定采用碱水解法, 按试剂盒(A030-2, 南京建成生物工程有限公司)说明操作, 用紫外分光光度计(UV759, 上海精密科学仪器公司)在 560 nm 波长下测定。

肌肉系水力 煮失水率: 取虾肉 3~4 g

(W_1), 置于沸水锅中煮 3 min, 用吸水纸吸干表面水分, 称重 (W_2)。

冷冻失水率: 取虾肉 3~4 g (W_1), 于 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 冻存 24 h, 取出后在室温解冻 15 min, 用吸水纸吸干表面水分, 称重 (W_2)。

失水率 (water loss, WL, %) 的计算公式: $(W_1 - W_2) / W_1 \times 100\%$

肌肉质构 (TPA) 带壳虾煮熟后 (沸水中 3 min), 取第二腹节的肌肉, 长宽高分别约为 1.5、1.0 和 1.0 cm, 采用 Universal TA 质构分析仪 (上海腾跋仪器科技有限公司), 进行全质构分析 (包括硬度、咀嚼性、黏聚性、弹性及回复性等)。选用 25 mm×25 mm 柱形探头接触感应 5 gf, 测试速度 1 mm/s, 目标模式为形变, 形变量 40%, 时间 2 s。

1.6 数据处理

本实验数据以平均数±标准差 (mean±SD) 表示, 采用 SPSS 22.0 分析软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和双因素方差分析 (Two-Way ANOVA), 多重比较用 Duncan 氏多重比较法进行检验, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 生长性能

A0 组有最高增重率和最低饲料系数, 随浒

苔添加量增加, 虾体增重率降低, 饲料系数升高, 其中 A6、B6 组的增重率分别较 A0、B0 组显著降低 ($P < 0.05$), 而饲料系数显著升高 ($P < 0.05$)。在同等的浒苔添加量下, 15% 鱼粉组 (B 组) 的增重率在数值上低于 18% 鱼粉组 (A 组), 各实验组的凡纳滨对虾成活率均在 92% 以上, 且无显著性差异 ($P \geq 0.05$)。双因素方差分析表明, 饲料中鱼粉和浒苔水平对凡纳滨对虾的终末均质量、增重率和饲料系数均有显著影响 ($P < 0.05$), 但 2 个因素间无显著交互影响 ($P \geq 0.05$) (表 2)。

2.2 全虾成分

各组的全虾水分和粗灰分含量均无显著性差异 ($P \geq 0.05$), 在 18% 鱼粉饲料中添加 6% 浒苔, 显著降低了粗蛋白含量 ($P < 0.05$), 15% 鱼粉各组的粗蛋白含量也较 18% 鱼粉组 (A0) 显著降低 ($P < 0.05$)。虾体脂肪含量随浒苔添加量的增加而降低, 其中 A6、B6 组显著低于 A0、B0 组 ($P < 0.05$)。双因素方差分析表明, 饲料浒苔水平显著影响了全虾的粗蛋白和粗脂肪含量 ($P < 0.05$), 饲料鱼粉水平和交互作用对全虾的粗蛋白和粗脂肪含量无显著影响 ($P \geq 0.05$) (表 3)。

2.3 营养物质利用率

在 18%、15% 鱼粉饲料中添加 3%、6% 浒苔, 均显著降低了凡纳滨对虾的蛋白质效率、蛋白质沉积率、脂肪沉积率和蛋白质表观消化率 ($P < 0.05$)。双因素方差分析表明, 饲料中鱼粉和浒苔

表 2 饲料中添加浒苔对凡纳滨对虾生长性能的影响

Tab. 2 Effect of *E. prolifera* supplementation on growth performance of *L. vannamei*

组别 groups	初始均质量/g W_0	终末均质量/g W_t	增重率/% WGR	饲料系数 FCR	存活率/% SR
A0	3.0 ± 0.1	22.6 ± 0.7 ^a	654.2 ± 24.3 ^a	1.61 ± 0.06 ^c	95.5 ± 5.2
A3	3.0 ± 0.1	22.2 ± 0.3 ^{ab}	641.6 ± 12.6 ^{ab}	1.72 ± 0.11 ^{abc}	93.5 ± 1.0
A6	3.0 ± 0.1	21.9 ± 0.2 ^b	630.4 ± 23.1 ^b	1.75 ± 0.09 ^{ab}	93.5 ± 5.9
B0	3.0 ± 0.1	22.5 ± 0.8 ^{ab}	651.3 ± 26.3 ^{ab}	1.65 ± 0.06 ^c	92.0 ± 2.8
B3	3.0 ± 0.1	21.1 ± 0.8 ^{bc}	615.4 ± 27.5 ^{bc}	1.78 ± 0.06 ^a	94.0 ± 2.8
B6	3.0 ± 0.1	20.8 ± 0.6 ^c	595.7 ± 21.2 ^c	1.81 ± 0.06 ^a	93.5 ± 3.0
双因素方差分析 Two-Way ANOVA					
鱼粉 fishmeal		0.006	0.033	0.028	0.534
浒苔 <i>E. prolifera</i>		0.004	0.004	0.000	0.989
交互 interaction		0.214	0.552	0.544	0.540

注: 同列数据上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Notes: In the same column, values with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$), the same below

表 3 饲料中添加浒苔对凡纳滨对虾体组成的影响 (湿重)
Tab. 3 Effect of *E. prolifera* supplementation on body composition of *L.vannamei* (wet weight) %

组别 groups	水分 moisture	粗蛋白 crude protein	粗脂肪 crude lipid	粗灰分 crude ash
A0	74.11 ± 0.66	19.30 ± 0.48 ^a	2.23 ± 0.32 ^a	2.80 ± 0.08
A3	75.12 ± 0.80	18.65 ± 0.68 ^{ab}	1.84 ± 0.27 ^{ab}	2.70 ± 0.36
A6	76.81 ± 0.82	17.23 ± 0.59 ^b	1.60 ± 0.14 ^b	2.50 ± 0.25
B0	76.06 ± 1.24	17.76 ± 0.98 ^b	2.09 ± 0.17 ^a	2.60 ± 0.22
B3	76.54 ± 1.33	17.56 ± 0.93 ^b	1.92 ± 0.19 ^{ab}	2.80 ± 0.24
B6	76.29 ± 1.86	17.31 ± 0.43 ^b	1.67 ± 0.35 ^b	2.90 ± 0.35
双因素分析 Two-Way ANOVA				
鱼粉 fishmeal	0.225	0.061	1.000	0.457
浒苔 <i>E. prolifera</i>	0.057	0.016	0.001	0.908
交互 interaction	0.148	0.202	0.533	0.103

水平均显著影响蛋白质效率和蛋白质沉积率 ($P < 0.05$), 饲料浒苔水平还显著影响脂肪沉积率和蛋白质表观消化率 ($P < 0.05$)。但二者无显著交互作用 ($P \geq 0.05$) (表 4)。

2.4 肌肉系水力和胶原蛋白含量

在饲料中添加 6% 浒苔, 显著降低了肌肉煮失水率、冷冻失水率, 提高了胶原蛋白含量 ($P < 0.05$)。双因素方差分析表明, 浒苔水平显著影响着肌肉的煮失水率、冷冻失水率和肌肉胶原蛋白含量 ($P < 0.05$), 但鱼粉水平和鱼粉、浒苔的交互作用对上述指标均无显著影响 ($P \geq 0.05$) (表 5)。

2.5 肌肉质构 (TPA)

在 18%、15% 鱼粉饲料中添加 3%、6% 浒苔,

除 B3 组的硬度外, 肌肉硬度和咀嚼性均显著增加 ($P < 0.05$); 各组在肌肉黏聚性、弹性、回复性上均无显著性差异 ($P \geq 0.05$)。双因素方差分析表明, 浒苔水平和鱼粉、浒苔交互作用显著影响了肌肉硬度和咀嚼性 ($P < 0.05$)。 (表 6)

3 讨论

3.1 浒苔对凡纳滨对虾生长性能和营养物质利用的影响

本实验在含 18% 鱼粉的饲料中添加 6% 浒苔, 在含 15% 鱼粉的饲料中添加 3%、6% 浒苔, 均显著降低了虾体的生长性能 ($P < 0.05$), 并且浒苔添加组的蛋白质效率、蛋白质沉积率、脂

表 4 饲料中添加浒苔对凡纳滨对虾营养物质利用率的影响
Tab. 4 Effect of *E. prolifera* supplementation on nutrient utilization of *L.vannamei*

组别 groups	蛋白质效率 PER	蛋白质沉积率/% PRE	脂肪沉积率/% LRE	蛋白质表观消化率/% ADCCP
A0	1.97 ± 0.09 ^a	30.99 ± 0.97 ^a	18.48 ± 0.32 ^a	89.01 ± 1.62 ^a
A3	1.87 ± 0.03 ^b	28.20 ± 1.49 ^b	14.97 ± 0.24 ^{bc}	87.27 ± 1.36 ^b
A6	1.81 ± 0.02 ^b	25.86 ± 1.27 ^b	12.34 ± 0.21 ^c	84.56 ± 1.59 ^{bc}
B0	1.96 ± 0.08 ^a	29.36 ± 0.88 ^a	17.20 ± 0.23 ^{ab}	87.92 ± 1.33 ^a
B3	1.74 ± 0.07 ^{bc}	26.38 ± 2.35 ^b	14.32 ± 0.14 ^c	85.40 ± 1.54 ^{bc}
B6	1.71 ± 0.06 ^c	24.35 ± 2.92 ^b	11.97 ± 0.28 ^c	83.33 ± 1.26 ^c
双因素方差分析 Two-Way ANOVA				
鱼粉 fishmeal	0.008	0.015	0.413	0.614
浒苔 <i>E. prolifera</i>	0.000	0.000	0.000	0.000
交互 interaction	0.320	0.727	0.916	0.857

表 5 饲料中添加浒苔对凡纳滨对虾肌肉系水力和胶原蛋白的影响

Tab. 5 Effect of *E. prolifera* supplementation on water-holding capacity and collagen content of *L.vannamei* flesh

组别 groups	煮失水率/% cooking loss	冷冻失水率/% thawing loss	胶原蛋白含量/(g/kg) collagen content
A0	16.80 ± 1.12 ^a	2.25 ± 0.19 ^a	2.82 ± 0.34 ^b
A3	15.05 ± 0.95 ^{ab}	1.98 ± 0.30 ^{ab}	3.00 ± 0.26 ^{ab}
A6	14.71 ± 0.94 ^b	1.86 ± 0.42 ^b	3.14 ± 0.38 ^a
B0	15.82 ± 0.88 ^a	2.19 ± 0.18 ^a	2.73 ± 0.21 ^b
B3	14.98 ± 0.95 ^{ab}	1.95 ± 0.26 ^{ab}	3.02 ± 0.08 ^{ab}
B6	14.68 ± 0.86 ^b	1.83 ± 0.23 ^b	3.13 ± 0.13 ^a
双因素方差分析 Two-Way ANOVA			
鱼粉 fishmeal	0.623	0.089	0.165
浒苔 <i>E. prolifera</i>	0.042	0.033	0.028
交互 interaction	0.123	0.421	0.244

表 6 饲料中添加浒苔对凡纳滨对虾肌肉质构的影响

Tab. 6 Effect of *E. prolifera* supplementation on flesh TPA of *L.vannamei*

组别 groups	硬度/gf hardness	咀嚼性/gf chewiness	黏聚性 cohesiveness	弹性 springiness	回复性 resilience
A0	1 012.5 ± 84.2 ^b	420.2 ± 33.4 ^c	0.67 ± 0.03	0.62 ± 0.02	0.61 ± 0.04
A3	1 188.5 ± 67.9 ^a	502.8 ± 59.9 ^a	0.65 ± 0.03	0.63 ± 0.04	0.58 ± 0.02
A6	1 242.0 ± 25.4 ^a	510.2 ± 11.1 ^a	0.65 ± 0.01	0.63 ± 0.02	0.57 ± 0.02
B0	1 009.4 ± 63.4 ^b	450.3 ± 37.4 ^b	0.65 ± 0.02	0.61 ± 0.01	0.57 ± 0.03
B3	1 063.3 ± 77.3 ^{ab}	497.4 ± 35.4 ^a	0.64 ± 0.01	0.62 ± 0.02	0.57 ± 0.03
B6	1 156.5 ± 91.2 ^a	501.5 ± 10.5 ^a	0.64 ± 0.02	0.66 ± 0.05	0.55 ± 0.02
双因素方差分析 Two-Way ANOVA					
鱼粉 fishmeal	0.650	0.257	0.138	0.551	0.136
浒苔 <i>E. prolifera</i>	0.042	0.007	0.123	0.432	0.217
交互 interaction	0.001	0.025	0.405	0.312	0.482

肪沉积率和蛋白质表观消化率均显著性下降 ($P < 0.05$)。周胜强等^[8]在黄斑篮子鱼的饲料中添加 10%、15% 的浒苔, 显著降低了鱼体的生长性能, 同样在 Yousif 等^[12]对黄斑篮子鱼的研究中, 当饲料中添加 30% 浒苔, 也显著减低了其生长性能。其原因可能是浒苔具有坚韧的纤维素细胞壁, 影响了动物对细胞内营养物质的吸收利用^[7]。徐安乐等^[7]在对花鲈 (*Lateolabrax maculatus*) 的研究中发现, 浒苔中丰富的多糖及其复合物对消化酶的活性有负反馈调节机制, 饲料中添加过量的浒苔会起到一定抑制生长的作用, 如果在浒苔饲料中添加非淀粉多糖酶, 则有助于营养物

质消化吸收率的提高, 这也从另一个方面表明了浒苔非淀粉多糖的抗营养作用。也有研究表明, 在饲料中添加适宜水平的浒苔能够促进鱼类生长或不影响生长。徐安乐等^[13]在珍珠龙胆石斑鱼 (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *E. fuscoguttatus* ♀) 的饲料中添加 1%、4% 浒苔, 增重率分别提高了 15.8%、10.9% ($P < 0.05$); 在黄斑篮子鱼饲料中添加 5% 浒苔, 对鱼体生长无显著影响 ($P \geq 0.05$)^[8]。在这 2 项研究中, 饲料中鱼粉含量分别为 42%、29%, 而本实验中鱼粉含量较低 (18%、15%), 这可能是产生不同结果的重要原因。这表明在较低鱼粉含量的饲料中即使添加

富含多种游离氨基酸、甜菜碱、多糖的浒苔^[14],也难以提升凡纳滨对虾的生长性能。

3.2 饲料中添加浒苔对凡纳滨对虾肌肉品质的影响

一般来说,对虾肌肉中较低的粗脂肪含量会使得肌束间存在较大的摩擦力,肌肉就会具有较高的剪切力,即意味着肌肉有较高的咀嚼性^[15]。本实验在18%、15%鱼粉饲料中分别添加6%浒苔(A6、B6),虾体粗脂肪含量显著下降($P < 0.05$),同时,肌肉咀嚼性、硬度(B3除外)显著增加($P < 0.05$),这可能与肌肉脂肪含量的下降有关。

肌肉品质与肌肉中的胶原蛋白含量密切相关^[16]。肌肉组织结构、质地和柔韧性也与胶原蛋白紧密联系,硬度、弹性、黏聚性、咀嚼性和回复性是肌肉的主要质构特征^[17]。常海军等^[18]发现,肌肉中胶原蛋白含量增加,使肌肉具有了更高的机械强度,在对凡纳滨对虾的研究中,也有随着肌肉中胶原蛋白含量的增加,肌肉的硬度也随之增加的报道^[19]。本实验中,随饲料浒苔水平的增加,肌肉中胶原蛋白含量显著上升($P < 0.05$),这可能是肌肉硬度、咀嚼性提高的另一个原因。

衡量肌肉品质另外一个重要特性是系水力(或保水能力)^[20]。失水率可以反映肌肉所含液态以及可溶性的物质在不同条件下的损失情况。失水率低,表明肌肉的营养和风味能得到更好的保留。本实验中,饲料中添加6%浒苔显著降低了凡纳滨对虾肌肉的煮失水率和冷冻失水率($P < 0.05$),其原因可能与肌肉胶原蛋白含量的增加有关,是否与肌肉的抗氧化性增加有关,尚有待于进一步研究。

总体来看,浒苔在水产饲料中的应用还有待于进一步开发。在对浒苔资源的利用中,非淀粉多糖是需要考虑的一个重要限制因素,非淀粉多糖酶的使用可以在一定程度上加以解决;此外,如何发挥浒苔所含有的一些生物活性物质的功效,也是今后值得深入研究的领域。

4 结论

在本实验条件下,在含18%、15%鱼粉饲料中添加3%浒苔,对凡纳滨对虾的生长性能没有显著影响,添加6%浒苔显著降低了虾体的增

重率和饲料利用,但可提高肌肉硬度、咀嚼性和胶原蛋白含量,在一定程度上改善肌肉品质。

参考文献(References):

- [1] 李响,周锡红,赵玉蓉. 浒苔提取物成分分析及其生理功能研究进展[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(12): 5468-5475.
Li X, Zhou X H, Zhao Y R. Research progress on constituents of *Ulva prolifera* extract and their biological function[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(12): 5468-5475(in Chinese).
- [2] 丁兰平,栾日孝. 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)的分类鉴定、生境习性及其分布[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(1): 68-71.
Ding L P, Luan R X. The taxonomy, habit, and distribution of a green alga *Enteromorpha prolifera* (Ulvales, Chlorophyta)[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(1): 68-71(in Chinese).
- [3] 王春忠,孙富林,侯代云,等. 基于浒苔暴发海水池塘的微生物生态特征研究[J]. *海洋学报*, 2017, 39(4): 107-116.
Wang C Z, Sun F L, Hou D Y, et al. Study on the microbial characteristics of seawater pond based on *Enteromorpha* bloom[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(4): 107-116(in Chinese).
- [4] 黄志俊. 浒苔固体快速发酵过程研究及产品开发[D]. 青岛:中国海洋大学,2015.
Huang Z J. Study on the rapid solid fermentation of *Enteromorpha prolifera* and its product development[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015 (in Chinese).
- [5] 杨欢,黎中宝,李元跃,等. 厦门海域浒苔种类鉴定及其营养成分分析[J]. *中国渔业质量与标准*, 2013, 3(4): 70-75.
Yang H, Li Z B, Li Y Y, et al. Species identification and nutritional composition analysis of *Enteromorpha* in Xiamen coastal waters[J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2013, 3(4): 70-75(in Chinese).
- [6] 徐大伦,黄晓春,杨文鸽,等. 浒苔营养成分分析[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2003, 22(4): 318-320.
Xu D L, Huang X C, Yang W G, et al. Analysis of nutrition composition of *Enteromorpha prolifera*[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2003, 22(4): 318-320(in Chinese).

- [7] 徐安乐, 蒋鹏达, 黎中宝, 等. 超微粉碎浒苔(*Enteromorpha prolifera*)对花鲈生长、非特异性免疫及消化酶活性的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(6): 1494-1501. Xu A L, Jiang P D, Li Z B, et al. Effects of *Enteromorpha prolifera* ultrafine powders on growth performance, non-specific immunity and digestive enzyme activity of *Lateolabrax japonicus*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(6): 1494-1501(in Chinese).
- [8] 周胜强, 游翠红, 王树启, 等. 饲料中添加浒苔对黄斑蓝子鱼生长性能与生理生化指标的影响[J]. 中国水产科学, 2013, 20(6): 1257-1265. Zhou S Q, You C H, Wang S Q, et al. Effects of dietary seaweed *Enteromorpha prolifera* on growth performance, physiological and biochemical characteristics of rabbitfish *Siiganus canaliculatus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(6): 1257-1265(in Chinese).
- [9] 卢青, 杨宁, 王正丽, 等. 饲料中添加浒苔对大菱鲆生长和非特异性免疫力的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2015, 32(1): 62-66. Lu Q, Yang N, Wang Z L, et al. The effects of dietary *Enteromorpha prolifera* on the growth and non-specific immunity of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2015, 32(1): 62-66(in Chinese).
- [10] Asino H, Ai Q H, Mai K S. Evaluation of *Enteromorpha prolifera* as a feed component in large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*, Richardson, 1846) diets[J]. Aquaculture Research, 2011, 42(4): 525-533.
- [11] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The state of world fisheries and aquaculture[R]. Rome, Italy: FAO, 2018.
- [12] Yousif O M, Osman M F, Anwahi A R, et al. Growth response and carcass composition of rabbitfish, *Siiganus canaliculatus* (Park) fed diets supplemented with dehydrated seaweed, *Enteromorpha* sp.[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2004, 16(2): 18-26.
- [13] 徐安乐, 胡晓伟, 黎中宝, 等. 饲料中添加超微粉碎浒苔对珍珠龙胆石斑鱼生长、非特异性免疫及消化酶活性的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(12): 37-45. Xu A L, Hu X W, Li Z B, et al. Effects of *Enteromorpha prolifera* ultrafine powder on growth performance, non-specific immunity and digestive enzyme activity of pearl gentian grouper[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(12): 37-45(in Chinese).
- [14] 林建云, 陈维芬, 贺青, 等. 福建沿岸海域浒苔藻类的营养成分含量与食用安全[J]. 台湾海峡, 2011, 30(4): 570-576. Lin J Y, Chen W F, He Q, et al. Nutritional composition contents and food safety for *Enteromorpha* in Fujian coast waters[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(4): 570-576(in Chinese).
- [15] Grigorakis K, Alexis M N. Effects of fasting on the meat quality and fat deposition of commercial-size farmed gilthead sea bream (*Sparus aurata*, L.) fed different dietary regimes[J]. Aquaculture Nutrition, 2005, 11(5): 341-344.
- [16] Sato K, Yoshinaka R, Sato M, et al. Collagen content in the muscle of fishes in association with their swimming movement and meat texture[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1986, 52(9): 1595-1600.
- [17] Bourne M C. Basic principles of food texture measurement[M]//Faridi H, Faubion J M. Dough Rheology and Baked Product Texture. Boston: Springer, 1990: 331-341.
- [18] 常海军, 王强, 徐幸莲, 等. 肌内胶原蛋白与肉品质关系研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(1): 286-290. Chang H J, Wang Q, Xu X L, et al. Research progress of relationship between intramuscular collagen and meat quality[J]. Food Science, 2011, 32(1): 286-290.
- [19] 王士稳. 海水养殖和淡水养殖凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 肌肉成分、尝味及质地的比较研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006. Wang S W. Comparison of muscle composition, gustation and texture between maricultured and freshwater-cultured shrimp *Litopenaeus vannamei*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006 (in Chinese).
- [20] Brinker A, Reiter R. Fish meal replacement by plant protein substitution and guar gum addition in trout feed, Part I: effects on feed utilization and fish quality[J]. Aquaculture, 2011, 310(3-4): 350-360.

Dietary effects of *Enteromorpha prolifera* on growth performance and flesh quality of *Litopenaeus vannamei*

WANG Jing¹, YAO Wenxiang¹, LI Xiaoqin¹, LENG Xiangjun^{1,2,3*}

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Fish Nutrition and Environmental Ecology Research Center, Ministry of Agriculture and
Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This trial was conducted to evaluate the effects of dietary *Enteromorpha prolifera* (EP) with different fishmeal inclusion on growth and flesh quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). This trial was designed with 2×3 factors, and two basal diets were designed to contain 18% (A) and 15% (B) fishmeal. Then the EP was added in both basal diets at the levels of 0, 3%, 6% to form six isonitrogenous and isoenergetic diets with crude protein content of 38.5%, referred to as A0, A3, A6, and B0, B3, B6, respectively. A total of 6 treatments was conducted with 4 replicates per treatment and 50 *L. vannamei* per replicate. After 8 weeks of feeding, the growth performance, body composition, nutrient utilization, flesh water-holding capacity and texture property of the *L. vannamei* were measured. The results showed that both fishmeal and EP levels in diets significantly affected the final body weight, weight gain rate (WGR) and feed conversion ratio (FCR) of shrimp. The A0 group had a final weight of 22.6 g with the highest WGR (654.2%) and the lowest FCR (1.61), while the B6 group had a final weight of 20.8 g with the lowest WGR (595.7%) and the highest FCR (1.81) among the six groups. The supplementation of 3% EP in both basal diets did not significantly affect the growth performance, while the supplementation of 6% EP significantly decreased the WGR, increased the FCR. At the same supplementation level of EP, the WGR of 15% fishmeal groups (B groups) was numerically lower than that of 18% fishmeal groups (A groups). The EP level significantly affected the crude protein and crude lipid content of whole shrimp. The crude protein content of A6, B0, B3 and B6 groups was significantly lower than that of A0 group, and the crude fat content of A6 and B6 groups was significantly lower than that of A0 and B0 groups. The fishmeal and EP levels in diets significantly affected the protein efficiency ratio (PER) and protein retention efficiency (PRE), and the EP level also significantly affected the lipid retention efficiency (LRE) and apparent digestibility coefficient of crude protein (ADCCP). The PER, PRE, LRE and ADCCP of A3, A6 and B3, B6 groups were significantly lower than those of A0 and B0 groups respectively. In terms of flesh quality, the supplementation of 6% EP significantly reduced the cooking loss and thawing loss, and increased the flesh collagen content. The flesh hardness and chewiness of A3, A6 and B6 groups were also significantly higher than those of A0 and B0 groups, respectively. In conclusion, the supplementation of 3% EP in diet did not significantly affect the growth of *L. vannamei*, and 6% EP supplementation improved the flesh quality, although this supplementation reduced the weight gain and feed utilization.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; *Enteromorpha prolifera*; growth performance; flesh quality

Corresponding author: LENG Xiangjun. E-mail: xjleng@shou.edu.cn

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900203)