

饲料中添加发酵浒苔对黑棘鲷生长、非特异性免疫及肠道消化酶活性的影响^{*}

胡晓伟^{1,2}, 刘龙晖^{1,2}, 陈强^{1,2}, 李文静^{1,2}, 黎中宝^{1,2**}

(1. 集美大学水产学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省海洋渔业资源与生态环境重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为探究发酵浒苔(*Enteromorpha prolifera*)对黑棘鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)生长、非特异性免疫和肠道消化酶活性的影响。本实验将浒苔发酵后,按比例(0%、2.0%、3.5%、5.0%、6.5%、8.0%)梯度添加到黑棘鲷基础饲料中;将360尾鱼随机分为6组,饲喂各组对应饲料28 d后,采集相关样品并测量生长指标、非特异性免疫相关指标和肠道消化酶活性。研究显示:添加2.0%、3.5%和5.0%的发酵浒苔显著提高了黑棘鲷增重率和特定生长率($P<0.05$),其中,增重率分别提高了17.6%、20.6%和24.3%。在浒苔添加量为2.0%和5.0%时饵料系数显著降低($P<0.05$),分别降低了18.8%和16.3%;发酵浒苔的添加降低了总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量,其中,全体添加组TC含量显著降低($P<0.05$),2.0%和8.0%的添加量显著降低了TG含量($P<0.05$),2.0%、3.5%和8.0%的添加量显著降低了LDL-C含量($P<0.05$);2.0%和3.5%的添加量显著提高了高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量($P<0.05$);此外,添加2.0%发酵浒苔显著提高了血清碱性磷酸酶(AKP)活性,添加3.5%和5.0%发酵浒苔显著提高了过氧化氢酶(CAT)活性($P<0.05$),且所有添加组中超氧化物歧化酶(SOD)、肠道淀粉酶(AMS)(除添加8.0%浒苔)和脂肪酶(LPS)活性显著提高($P<0.05$)。研究结果显示,饲料中添加发酵浒苔能够提高黑棘鲷的生长性能、非特异性免疫能力及肠道消化酶活力,且能够改善黑棘鲷的血脂,推荐发酵浒苔的适宜添加量为3.5%~5.0%。

关键词: 发酵浒苔; 黑棘鲷; 生长性能; 非特异性免疫; 消化酶

中图分类号: S917.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2024)07-159-10

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxs.20230217

引用格式: 胡晓伟, 刘龙晖, 陈强, 等. 饲料中添加发酵浒苔对黑棘鲷生长、非特异性免疫及肠道消化酶活性的影响[J].

中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(7): 159-168.

Hu Xiaowei, Liu Longhui, Chen Qiang, et al. Effects of fermented *Enteromorpha prolifera* powder on growth performance, non-specific immunity and intestinal digestive enzyme activity of *Acanthopagrus schlegelii*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2024, 54(7): 159-168.

近十几年来,随着中国集约化水平的不断提高,水产品产量飞速增长,海水鱼人工养殖取得巨大成就^[1]。但随之而来的却是鱼病频发以及滥用抗生素造成的药物残留、水产品质量下降和环境污染等一系列问题^[2]。为此,农业农村部发布第194号公告,全面禁抗时代开启。绿色健康的生态养殖成为主流,而绿色环保的新型水产饲料添加剂也亟待开发。

浒苔(*Enteromorpha prolifera*)隶属绿藻门(Chlorophyta)石莼目(Ulvales)石莼科(Ulvaceae)^[3],其分布广泛、繁殖能力强、且具有较高的营养盐吸收能力和抗胁迫能力^[4]。当水体富营养化程度严重时大量繁殖形成绿潮,对海洋生态环境和中国水产养殖业构成严重

威胁^[5]。尤其在2008年,奥帆赛举办地——青岛突发浒苔灾害引起政府高度重视和社会广泛关注^[6]。无独有偶,我国黄海大规模绿潮也连续发生15 a之久;浒苔绿潮由于持续时间长、漂浮规模大、危害程度深等一系列原因,已经成为困扰沿海民生重大问题,严重威胁当地水产养殖业和旅游业的发展,引起全世界广泛关注^[7-8]。但其本身味道鲜美、营养丰富、脂肪含量低、蛋白含量高、富含多种必需氨基酸,且脂肪酸组成丰富,矿物质和维生素含量高^[9-11]。因此,浒苔在开发为新型绿色水产饲料添加剂上具有极大的潜力。而国内外也已有报道浒苔作为饲料添加剂在水产养殖业的应用。如作为饲料添加剂应用于幼年点篮子鱼(*Siganus gut-*

^{*} 基金项目:福建省科技计划项目农业引导性(重点)项目(2020N0013);福建省自然科学基金项目(2017J01638)资助

Supported by the Fujian Province Science and Technology Planning Project Agricultural Guidance (Key) Project (2020N0013); the Natural Science Foundation of Fujian Province(2017J01638)

收稿日期:2023-07-06; 修订日期:2023-09-30

作者简介:胡晓伟(1990—),男,硕士生,从事营养与饲料研究。E-mail: wyyhwx@163.com

^{**} 通信作者:黎中宝(1966—),男,教授,主要从事海洋渔业资源与生态环境研究。E-mail: lizhongbao@jmu.edu.cn

tatus)^[12]、大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)^[13]、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[14]、皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)^[15]等水生动物的研究表明,浒苔作为新型水产饲料添加剂使用,具有改善肉品质、促生长和增强免疫力等作用。

黑棘鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)隶属鲈形目(Perciformes) 鲷科(Sparidae) 棘鲷属(*Acanthopagrus*)。在中国主要分布于黄海、渤海、东海沿岸以及台湾海峡南部水域等,是中国重要的海水经济养殖鱼类^[16]。目前国内外关于黑棘鲷营养方面的研究,主要围绕脂肪水平^[17-18]、碳水化合物来源^[19-20]和鱼粉替代^[21-22]等方面。但关于浒苔用作黑棘鲷饲料添加剂方面鲜有报道。由于浒苔具有坚硬的细胞壁,影响其内营养物质的利用率。所以,本实验将浒苔进行预先发酵处理,在黑棘鲷基础饲料中梯度添加发酵浒苔,探究发酵浒苔对黑棘鲷生长、非特异性免疫和消化酶活性的影响。以期为浒苔开发为新型绿色水产饲料添加剂提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验用鱼及暂养

实验所用黑棘鲷购自福建省漳浦县锦兴育苗场。于集美大学水产学院海水实验场循环过滤桶(1 200 L)暂养 14 d。期间每天两次定时投喂饲料(8:00, 17:00),换水一次,换水量为 30%~40%,水体溶解氧维持 7 mg/L。

1.2 实验材料

浒苔采自厦门周边,清洗阴干后放入 50 ℃烘箱 24 h;浒苔碾碎过 40 目筛,用冷冻粉碎干燥机(山东三清不锈钢设备有限公司)进一步粉碎过 200 目筛,浒苔粉制作完成。将 1 kg 浒苔粉、1 g 纤维素酶、2 g 发酵剂、2 g 玉米蛋白粉和 65%的蒸馏水共同放入 12 丝发酵袋中在 37 ℃条件下密封发酵 7 d。发酵完成后 37 ℃烘干,粉碎后过 60 目筛,密封冷藏保存备用。

1.3 实验饲料配方及制作

参照黑棘鲷营养需求及相关研究,设计粗蛋白水平约 41.47%、粗脂肪水平约 10.65%的基础饲料^[23-24]。具体饲料配方及营养水平见表 1。将发酵浒苔粉按比例分别加入基础饲料,面粉配平,共设 6 组:D1(0%)、D2(2.0%)、D3(3.5%)、D4(5.0%)、D5(6.5%)、D6(8.0%)。饲料原料充分粉碎后,按照从小到大,逐级混匀的方法完全混匀后,加入适量水充分搅拌,再过 60 目筛两次。过筛完成后用制粒机制成 2.5 mm 的配合饲料,于 55 ℃烘箱干燥后,自然冷却后于-20 ℃密封保存。

1.4 饲养管理

实验鱼暂养结束后禁食 24 h,用 150 mg/L 丁香酚将其麻醉并称重。将 360 尾初体质量为(10.43±0.06) g 规格一致的健康黑棘鲷随机分配到 18 个养殖缸中(80 cm×45 cm×45 cm),每缸 20 尾,随机分为 6 组,每组三个重复。养殖实验开始,养殖周期 28 d,每日早(8:00)晚(17:00)定时投喂各组对应饲料两次,至黑棘鲷表观饱食。喂食结束后 0.5 h 吸污换水,收集残饵干燥称重并清理粪便,换水量为 30%~40%,水体溶解氧维持 7 mg/L,温度(28±2) ℃,盐度 11±1。

表 1 基础饲料配方及营养水平(干质量)

Table 1 Feed ingredients and nutrient content of basal diet (dry mass)

项目 Items	含量 Content/%
原料 Ingredients	
鱼粉 Fish meal	40.00
豆粕 Soybean meal	26.50
面粉 Flour	23.00
鱼油 Fish oil	3.00
多矿 Mineral premix ^a	0.50
多维 Vitamin premix ^b	0.50
胆碱 Choline chloride	0.50
豆油 Soybean oil	2.00
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.00
卵磷脂 Lecithin	2.00
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	1.00
总计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels	
粗蛋白 Crude protein	41.47
粗脂肪 Crude lipid	10.65
水分 Moisture	12.09
灰分 Ash	12.45

注: a. 多矿(mg/kg): MgSO₄·H₂O 4 000; MnSO₄·4H₂O 50; KI 100; CoCl₂(1%) 100; CuSO₄·5H₂O 20; FeSO₄·H₂O 260; ZnSO₄·H₂O 150; Na₂SeO₃(1%) 50。 b. 多维(mg/kg): 硫酸素 25; 核黄素 45; 盐酸吡哆醇 20; 维生素 B₁₂ 0.1; 维生素 K₃ 10; 肌醇 800; 泛酸 60; 烟酸 200; 叶酸 20; 生物素 1.2; 维生素 A 乙酸脂 32; 维生素 D₃ 5; α-生育酚 120; 乙氧基奎琳 150。 a. Mineral premix(mg/kg): MgSO₄·H₂O 4 000, MnSO₄·4H₂O 50, KI 100, CoCl₂(1%) 100, CuSO₄·5H₂O 20, FeSO₄·H₂O 260, ZnSO₄·H₂O 150, Na₂SeO₃(1%) 50。 b. Vitamin premix(mg/kg): thiamine 25, riboflavin 45, pyridoxine hydrochloride 20, vitamin B₁₂ 0.1, vitamin K₃ 10, inositol 800, pantothenic acid 60, nicotinic acid 200, folic acid 20, biotin 1.2, vitamin A acetate 32, vitamin D₃ 5, α-tocopherol 120, ethoxyquin 150。

1.5 样品采集

养殖实验结束后,实验鱼禁食 24 h,150 mg/L 丁香酚麻醉后,称体长体质量并计数;每缸随机取 5 尾鱼人道处死,−20 ℃ 保存以待体成分分析;每缸随机取 5 尾鱼,尾静脉取血后放置冰盒,随后转移至 4 ℃ 静置一夜,3 500 r/min 条件下离心 10 min 收集血清,于−80 ℃ 冰箱保存以待血清生理生化 and 免疫指标检测,之后取背部肌肉于−80 ℃ 保存,以待测定肌肉常规营养成分;另取 5 尾鱼解剖采肠道,剔除肠道脂肪后置于冻存管并迅速放进液氮罐保存,−80 ℃ 保存以待肠道消化酶测定。

1.6 指标分析与测定

1.6.1 常规营养成分分析 全鱼体、肌肉和饲料样本在 75 ℃ 烘箱中烘 24 h 后,于 105 ℃ 烘至恒重,测定绝干状态下样品失水比例,粉碎备用。粗蛋白含量测定采用半微量凯氏定氮法($6.25 \times$ 总氮);索氏抽提法(抽提液为乙醚)测粗脂肪。

1.6.2 生长指标 实验鱼生长指标测定公式为:

特定生长率(Specific growth rate, SGR, %/d) = $100 \times (\ln W_2 - \ln W_1) / t$;

增重率(Weight gain rate, WG, %) = $100 \times (W_2 - W_1) / W_1$;

饵料系数(Feed conversion ratio, FCR) = $f / (W_2 - W_1)$;

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

肝体指数(Hepatosomatic index, HSI, %) = $100 \times W_A / W_C$;

肥满度(Condition factor, CF, g/cm³) = W_C / L^3 。

式中: W_2 为平均末质量(g); W_1 为平均初质量(g); t 为实验天数; f 为总摄食量(g); N_t 为成活尾数, N_0 为初始尾数; W_A 为肝脏湿质量(g); W_C 为实验鱼湿质量(g); L 为鱼体体长(cm)。

1.6.3 血清生化及免疫指标 试剂盒检测血清总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、碱性磷酸酶(AKP)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、溶菌酶(LZM);溶菌酶试剂盒购自上海晶抗生物工程有限公司,其他试剂盒均购于南京建成生物研究所。

1.6.4 肠道消化酶指标 肠道称重后,按 1:9 (W/V)加入 4 ℃ 生理盐水,冰水浴中匀浆 5 min,低温高速离心机(4 ℃,3 000 r/min,15 min)进行离心,取上清液待测淀粉酶(AMS)、脂肪酶(LPS)、胰蛋白酶(TRS)。测定所用试剂盒均由南京建成生物研究所生产。

1.6.5 数据分析 实验数据采用 Microsoft Excel (2010)统计,在 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。 $P < 0.05$ 时认为具有显著性差异。若 $P < 0.05$,采用 Duncan 多重比较法检验。实验数据用平均值±标准差(Mean±SD)表示。

2 结果

2.1 发酵浒苔对黑棘鲷全体和肌肉营养成分的影响

黑棘鲷全体和肌肉营养成分相关数据见表 2。饲料中添加发酵浒苔对黑棘鲷肌肉和全体粗蛋白、粗脂肪和水分均无显著影响($P > 0.05$)。

表 2 发酵浒苔对黑棘鲷全体和肌肉营养成分的影响(干质量)

Table 2 Effects of dietary fermented *E. prolifera* on whole body and muscle nutrient content of *A. schlegeli* (dry mass)

指标 Index		D1	D2	D3	D4	D5	D6
肌肉 Muscle	粗蛋白 Crude protein	81.09±0.32	80.37±0.30	81.52±0.39	79.84±0.72	80.36±1.23	81.60±0.85
	粗脂肪 Crude lipid	21.13±1.20	21.80±1.53	20.28±0.26	21.36±1.22	21.42±1.24	20.98±1.63
	水分 Moisture	75.88±0.71	76.02±0.67	75.91±0.68	76.11±0.76	76.03±0.81	76.27±0.92
全体 Whole body	粗蛋白 Crude protein	52.57±0.17	51.88±0.22	53.01±1.59	51.29±0.29	52.27±0.29	52.00±0.51
	粗脂肪 Crude lipid	38.66±1.04	39.59±0.55	38.69±0.54	40.17±1.39	39.36±0.38	40.21±0.32
	水分 Moisture	69.89±0.55	70.38±1.26	69.92±0.70	70.75±0.54	69.89±1.07	68.45±1.34

2.2 发酵浒苔对黑棘鲷生长性能的影响

黑棘鲷生长性能相关数据见表 3。表 3 显示, WG 和 FCR 随着添加量的增加具有先增加再减少的趋势,其中, D2、D3、D4 组显著大于 D1 组($P < 0.05$),发酵浒苔添加量为 2.0%、3.5% 和 5.0% (D2、D3、D4 组)时, WG 分别提高 17.6%、20.6% 和 24.3%。相比于 D1 组, D2 和 D4 组 FCR 显著降低($P < 0.05$),发酵浒苔添加量在

2.0% 和 5.0% 时, FCR 分别降低 18.8% 和 16.3%, D3、D5 和 D6 组有下降趋势,但并不显著($P > 0.05$)。各组间 HSI、SR 和 CF 均无显著差异($P > 0.05$)。

对 WG、SGR 和 FCR 进行二次回归分析,回归曲线及方程见图 1。回归分析结果表明,最大(或最小) WG、SGR 和 FCR 对应的发酵浒苔添加量分别为 3.26%、3.26% 和 3.60%。

表 3 发酵浒苔对黑棘鲷生长性能的影响

Table 3 Effects of dietary fermented *E. prolifera* on the growth performance of *A. schlegeli*

指标 Index	D1	D2	D3	D4	D5	D6
初质量 ^① /g	10.48±0.08	10.39±0.04	10.42±0.02	10.43±0.05	10.46±0.08	10.41±0.05
末质量 ^② /g	24.19±3.98	26.29±3.18	25.21±3.61	27.07±1.65	24.64±2.02	22.59±2.68
增重率 ^③ /%	130.87±13.54 ^a	152.92±4.59 ^{bc}	157.95±15.02 ^c	162.79±10.22 ^c	135.71±12.48 ^{ab}	126.56±9.16 ^a
特定生长率 ^④ /(%/d)	2.98±0.21 ^a	3.31±0.06 ^{bc}	3.38±0.21 ^c	3.45±0.14 ^c	3.06±0.19 ^{ab}	2.92±0.15 ^a
肝体指数 ^⑤ /%	0.93±0.13	0.87±0.09	0.95±0.03	0.98±0.09	0.92±0.15	1.07±0.09
存活率 ^⑥ /%	94.67±6.11	100.00±0.00	100.00±0.00	98.67±2.31	94.67±6.11	97.33±2.31
饵料系数 ^⑦	2.02±0.20 ^b	1.64±0.14 ^a	1.86±0.22 ^{ab}	1.69±0.10 ^a	1.84±0.08 ^{ab}	1.93±0.11 ^{ab}
肥满度 ^⑧ /(g/cm ³)	2.96±0.06	2.81±0.14	2.81±0.10	2.93±0.19	2.85±0.08	2.96±0.06

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。Different letters indicate significant difference ($P<0.05$). The following table is the same. ①Initial weight; ②Last weight; ③Weight gain rate; ④Specific growth rate; ⑤Hepatosomatic index; ⑥Survival rate; ⑦Feed conversion ratio; ⑧Condition factor.

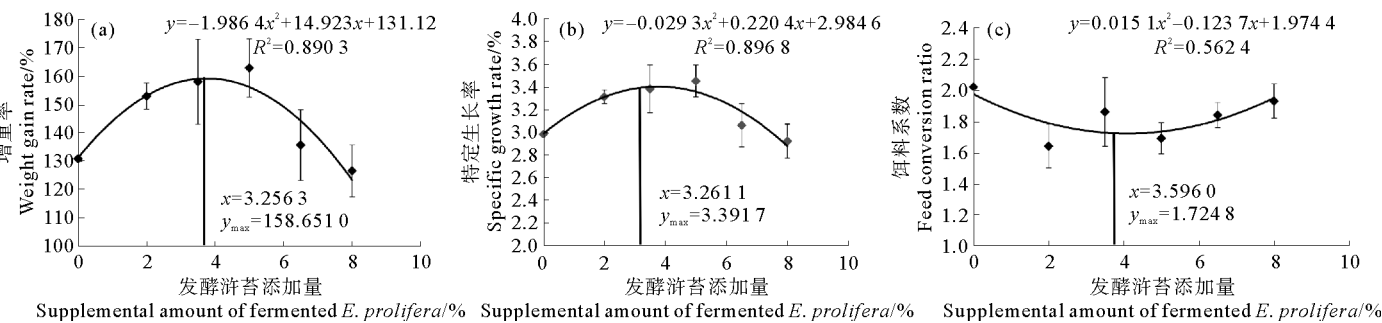


图 1 增重率(a)、特定生长率(b)、饵料系数(c)的回归分析曲线及公式

Fig. 1 The regression analysis curves and formulas of weight gain rate (a), specific growth rate (b) and feed conversion ratio (c)

2.3 发酵浒苔对黑棘鲷血清生化指标的影响

黑棘鲷血清生化指标数据见表 4。表 4 显示,饲料中添加发酵浒苔显著($P<0.05$)降低了 TG、TC 和 LDL-C 含量。其中,相比于 D1 组,D2、D4、D5 和 D6 组 TC 显著下降($P<0.05$);D2 和 D6 组 TG 显著下降($P<0.05$);D2、D3 和 D6 组 LDL-C 显著降低($P<$

0.05)。饲料中添加发酵浒苔显著增加血清 TP 和 HDL-C 含量($P<0.05$),其中,相比于 D1 组,D2、D3、D4 和 D5 组血清 TP 含量显著升高($P<0.05$),D6 组有升高趋势,但并不显著($P>0.05$);D2、D3 和 D6 组 HDL-C 含量显著升高($P<0.05$),D4、D5 组有升高趋势,但并不显著($P>0.05$)。

表 4 发酵浒苔对黑棘鲷血清生化指标的影响

Table 4 Effects of dietary fermented *E. prolifera* on serum biochemical indices of *A. schlegeli*

指标 Index	D1	D2	D3	D4	D5	D6
总胆固醇 TC/(mmol/L)	10.70±0.35 ^c	6.92±0.88 ^a	9.80±1.01 ^{bc}	8.92±0.93 ^b	6.36±0.47 ^a	6.74±0.49 ^a
甘油三酯 TG/(mmol/L)	1.52±0.09 ^b	1.20±0.16 ^a	1.43±0.06 ^b	1.60±0.09 ^b	1.53±0.12 ^b	1.12±0.08 ^a
血清蛋白 TP/(μg/mL)	46.06±1.72 ^a	51.88±1.80 ^c	51.51±1.73 ^{bc}	50.25±2.82 ^{bc}	50.31±2.79 ^{bc}	47.47±1.95 ^{ab}
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C/(mmol/L)	3.50±0.46 ^a	4.87±0.55 ^{bc}	4.65±0.42 ^{bc}	4.34±0.38 ^{ab}	4.12±0.60 ^{ab}	5.26±0.35 ^c
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C/(mmol/L)	4.69±0.20 ^c	1.88±0.14 ^a	2.56±0.10 ^b	4.70±0.40 ^c	5.93±0.49 ^d	1.52±0.34 ^a

2.4 发酵浒苔对黑棘鲷血清非特异性免疫的影响

黑棘鲷血清非特异性免疫指标数据见表 5。饲料中

添加发酵浒苔显著增加了 SOD 活性($P<0.05$),其中,实验浒苔组 SOD 活性均显著增加($P<0.05$);AKP 和

CAT 有先升高再降低的趋势,其中,D2 组 AKP 显著大于 D1 组($P<0.05$),D3、D5 组与 D1 组无显著差异($P>0.05$);D3、D4 组 CAT 显著大于 D1 组($P<0.05$),D1、D2、D5 和 D6 组之间无显著差异($P>0.05$)。D2、D4 和

D6 组 ALB 含量相比于 D1 组显著升高($P<0.05$)。

对 SOD 和 CAT 进行二次回归分析,回归曲线及方程见图 2。回归分析结果表明,最大 SOD 和 CAT 对应的超微粉碎浒苔添加量为 5.05%和 3.52%。

表 5 发酵浒苔对黑棘鲷血清非特异性免疫指标的影响

Table 5 Effects of dietary fermented *E. prolifera* on non-specific immune indicators in serum of *A. schlegeli*

指标 Index	D1	D2	D3	D4	D5	D6
超氧化物歧化酶 SOD/(U/mL)	368.59±17.38 ^a	841.48±58.70 ^c	853.33±17.78 ^c	726.52±13.19 ^b	902.89±38.72 ^d	829.63±48.64 ^c
碱性磷酸酶 AKP/(U/L)	28.20±3.57 ^b	32.13±2.78 ^c	25.78±0.50 ^{ab}	22.42±1.50 ^a	25.28±1.43 ^{ab}	23.85±0.71 ^a
白蛋白 ALB/(g/mL)	1.52±0.10 ^a	1.97±0.05 ^c	1.65±0.14 ^{ab}	1.84±0.18 ^{bc}	1.73±0.06 ^{ab}	2.00±0.14 ^c
溶菌酶 LZM/(U/L)	1.04±0.21 ^b	1.33±0.25 ^b	1.12±0.14 ^b	0.67±0.10 ^a	0.43±0.12 ^a	0.46±0.09 ^a
过氧化氢酶 CAT/(U/mL)	13.55±1.07 ^{ab}	14.98±1.81 ^{ab}	23.28±0.37 ^c	20.73±1.76 ^c	16.23±1.86 ^b	12.87±1.46 ^a

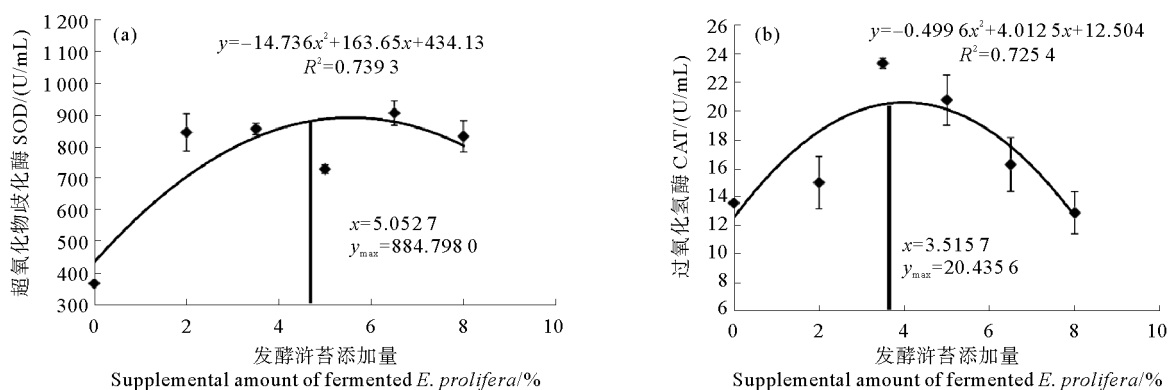


图 2 超氧化物歧化酶(a)、过氧化氢酶(b)回归分析曲线及公式

Fig. 2 The regression analysis curves and formulas of SOD (a), CAT (b)

2.5 发酵浒苔对黑棘鲷肠道消化酶活性的影响

黑棘鲷肠道消化酶指标数据见表 6。表 6 显示,饲料中添加发酵浒苔显著提高了 AMS 和 LPS 活性($P<0.05$);其中与 D1 组相比,AMS 活性除 D6 组无显著差异外($P>0.05$),其余组均显著升高($P<0.05$);LPS

活性添加发酵浒苔组均显著升高($P<0.05$),TRS 活性均显著降低($P<0.05$)。

对 AMS 和 LPS 进行二次回归分析,回归曲线及方程见图 3。回归分析结果表明,最大 AMS 和 LPS 对应的超微粉碎浒苔添加量为 3.80%和 4.05%。

表 6 发酵浒苔对黑棘鲷肠道消化酶活性的影响

Table 6 Effects of dietary fermented *E. prolifera* on digestive activities in gut of *A. schlegeli*

指标 Index	D1	D2	D3	D4	D5	D6
淀粉酶 AMS/(U/mg)	11.08±0.79 ^a	20.46±0.69 ^{bc}	19.72±1.03 ^b	21.88±0.88 ^c	22.34±1.31 ^c	12.73±1.24 ^a
脂肪酶 LPS/(U/g)	0.11±0.01 ^a	0.75±0.12 ^c	0.46±0.03 ^b	0.65±0.05 ^c	0.69±0.08 ^c	0.36±0.08 ^b
胰蛋白酶 TRS/(U/mg)	218.35±0.66 ^c	214.17±0.65 ^b	208.67±1.07 ^a	211.94±1.08 ^b	207.48±0.80 ^a	207.88±1.87 ^a

3 讨论

3.1 发酵浒苔对黑棘鲷全体和肌肉营养成分的影响

浒苔富含蛋白质、氨基酸和纤维素等营养成分,尤其浒苔中呈味氨基酸占氨基酸总量 65%以上,因此其

具有浓郁的海藻香味^[25];闫杰等^[26]报道饲料中添加 10%~20%浒苔粉对于梭鱼(*Liza haematocheila*)具有良好的诱食效果;宋超等^[27]报道点蓝子鱼(*Siganus guttatus*)食用浒苔鲜样后其肌肉粗蛋白含量显著增加,这可能与浒苔的诱食效果有关;但本实验结果显示

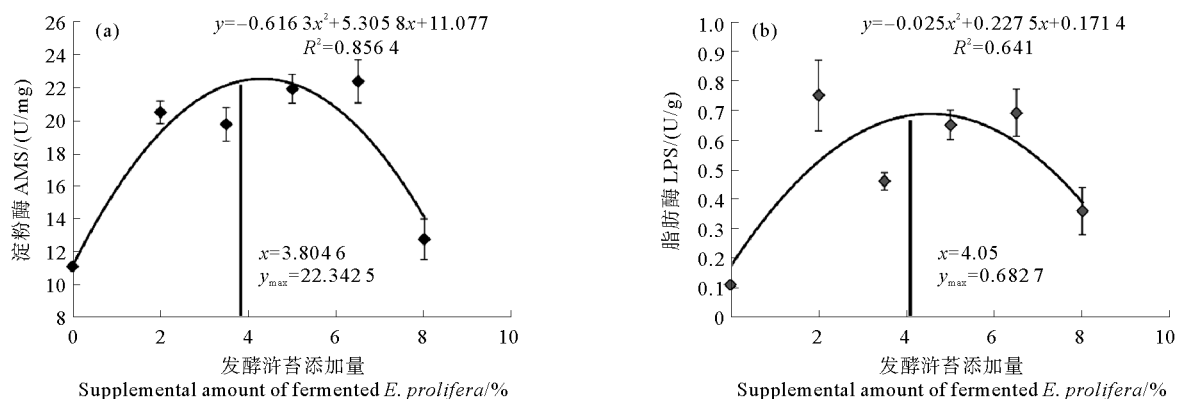


图3 淀粉酶(a)、脂肪酶(b)回归分析曲线及公式

Fig. 3 The regression analysis curves and formulas of AMS (a), LPS (b)

黑棘鲷全体及肌肉营养成分没有显著变化,这可能由于黑棘鲷属于典型肉食性鱼类,浒苔的诱食效果可能对于黑棘鲷并不明显,周胜强等^[28]报道浒苔对黄斑蓝子鱼(*Siganus canaliculatus*)各项体成分含量均无显著影响,与本实验结果相似;另一方面也可能由于经过发酵处理后,浒苔本身含有的蛋白质和氨基酸发生变化,这可能是黑棘鲷全体和肌肉的营养成分未发生显著变化的原因之一。

3.2 发酵浒苔对黑棘鲷生长性能的影响

本实验中,将浒苔粉充分发酵后加入到黑棘鲷饲料中。在添加量为2.0%~5.0%时WG和SGR均相比于对照组显著升高,且在3.5%~5.0%时达到最大值;这与高瞻等^[29]研究发酵浒苔作用于花鲈(*Lateolabrax maculatus*)和徐安乐等^[30]研究发酵浒苔作用于珍珠龙胆石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀)的结果相似。同样地,Yang等^[31]报道饲料中添加3.0%~5.0%浓度的发酵浒苔显著升高了红罗非鱼(*Oreochromis mossambicus* × *Oreochromis niloticus*)的WG和SGR。另有报道^[14]在凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)15%鱼粉饲料中添加3%、6%浒苔显著降低了虾体的生长性能;周胜强等^[28]在黄斑蓝子鱼(*Siganus canaliculatus*)饲料中添加10%和15%浒苔,显著降低了其生长性能。上述报道在饲料中添加浒苔或提高了鱼体生长性能或降低了鱼体生长性能,其区别在于处理浒苔的方式不同。浒苔具有坚硬的细胞壁,阻碍了其丰富的营养物质溶出,从而影响其利用率^[32]。所以,直接在饲料中添加浒苔可能导致浒苔中营养物质无法充分流出,不能被鱼体充分消化吸收;另一方面,浒苔壁中含有的大量纤维素可能导致肉食性鱼类无法消化或消化不良。而本实验中采用发酵的方式处理浒苔,可以使浒苔中丰富的营养物质被鱼体充分利用,所以显著提高了黑棘鲷的生长性能。而本实验中添加发酵浒苔可以显著降低FCR,也进一步说明浒苔中营养物质被黑棘鲷充分地

吸收利用,进而促进其生长。这与秦搏等^[33]将浒苔用纤维素酶酶解后投喂刺参(*Stichopus japonicus*),显著提高了刺参的SGR和降低FCR的结果相符。但本实验中当浒苔添加量大于5.0%时WG和SGR显著降低,有抑制黑棘鲷生长的效果。发酵浒苔对黑棘鲷生长性能的影响可能存在饱和阈值,当超过时可能会有抑制作用,这与Yildirim等^[34]的研究结果相似。作者推测其原因可能为发酵浒苔中纤维素未全部破坏,当浓度升高时,纤维素进入鱼体肠道也相应增多,而黑棘鲷中纤维素酶含量较低,对较高数量的纤维素无法分解,所以造成利用率降低,影响其生长。

3.3 发酵浒苔对黑棘鲷血清生化指标和非特异性免疫的影响

总胆固醇和甘油三酯水平的升高与降低与鱼类血脂水平息息相关。通常情况下,当血液中总胆固醇和甘油三酯水平较高时,认为血脂较高。而在低密度脂蛋白胆固醇水平升高时其会沉积在动脉壁中,逐渐形成动脉粥样硬化性斑块,诱导多种疾病,高密度脂蛋白胆固醇效果与其恰恰相反,能够转运磷脂和胆固醇,是一种抗动脉粥样硬化的脂蛋白,其水平升高有助于保护机体。本实验中,在饲料中添加发酵浒苔显著降低了总胆固醇、甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇含量,显著升高了高密度脂蛋白胆固醇含量,具有很好改善血脂的效果。Zhao等^[35]报道浒苔多糖可以通过活化腺苷酸活化蛋白激酶(AMPK)信号通路依赖途径改善肥胖小鼠中脂质代谢紊乱;Tang等^[36]从浒苔粗多糖分离出多糖组分(EPF2),并验证其具有很高的降血脂活性;Ren等^[37]报道浒苔多糖可以减轻高脂饮食大鼠的非酒精性脂肪肝;浒苔多糖改善血脂效果显著,浒苔多糖是浒苔中最主要的活性成分^[38]。本实验中将浒苔进行发酵处理,很大程度上破坏了浒苔坚韧的细胞壁,使浒苔多糖充分释放,进一步被鱼体消化吸收利用,发挥降血脂功能。

鱼类特异性免疫较简单,所以在病原入侵时更依

赖非特异性免疫^[39]。超氧化物歧化酶(SOD)能清除生物体内的天然自由基;过氧化氢酶(CAT)是一种酶类清除剂,清除体内的过氧化氢,是机体防御体系的关键酶之一;碱性磷酸酶(AKP)能将底物去磷酸化;白蛋白主要维持血液渗透压,清除自由基;这些酶类在促进机体代谢,提高抗氧化能力和免疫力有重要作用。本实验中发酵浒苔显著提高了 SOD、AKP、CAT 活性及白蛋白含量,有增强非特异性免疫的作用。徐安乐等^[40]报道添加 4%粉碎浒苔可以显著提高珍珠龙胆石斑鱼的 SOD 和 AKP 活性,而本实验结果显示 2.0%发酵浒苔的添加显著提高了黑棘鲷的 SOD 和 AKP 活性,添加量差异的原因可能是因为超微粉碎方式破壁效果不如发酵,无法使浒苔细胞中营养物质完全释放;同样的,徐安乐等^[30]报道 2%发酵浒苔显著提高了珍珠龙胆石斑鱼的 SOD 和 AKP 活性,高瞻等^[29]报道 2%发酵浒苔显著提高了花鲈的 SOD 和 AKP 活性,与本实验结果相似。浒苔经充分发酵后,其主要活性物质浒苔多糖被充分释放,更易被鱼体消化吸收。浒苔多糖主要由鼠李糖、葡萄糖、木糖等单糖组成,具有促进非特异性免疫的作用。Wei 等^[41]报道浒苔多糖通过增强海参(*Apostichopus japonicus*)非特异性免疫抵御灿烂弧菌(*Vibrio splendidus*)感染;Kim 等^[42]通过分离浒苔多糖,测定其体内外免疫调节活性,结果证明浒苔多糖具有较强的免疫刺激作用;Wei 等^[43]通过评估浒苔多糖对小鼠细胞免疫、体液免疫,证明浒苔多糖具有强大的免疫调节特性;Zhou 等^[44]报道鲫鱼(*Carassius auratus*)饲料中添加浒苔多糖可以降低血清 TG 和 TC 含量,提高 SOD、AKP 和 CAT 活性;浒苔中活性成分浒苔多糖被鱼体利用率越高,其改善血脂和提高非特异性免疫能力也就越强。所以本实验采用发酵的方式可以较好地提高浒苔的利用率,促进鱼体对浒苔多糖的利用。

3.4 发酵浒苔对黑棘鲷肠道消化酶活性的影响

发酵会影响 α -淀粉酶、蛋白酶及其他酶类从而对机体消化产生影响^[45]。对鱼类而言,胰腺分泌消化酶后进入肠道后再发挥作用,鱼类肠道消化酶活力可以反应其消化能力^[46]。本实验添加发酵浒苔显著提高了淀粉酶和脂肪酶活性,但胰蛋白酶活性反而降低。可能因为浒苔中纤维素经发酵后成为小分子物质,为了更好的消化,肠道分泌出更多的淀粉酶;但同时肠道内纤维素含量更多,可能抑制胰蛋白酶分泌。徐安乐等^[30]用发酵浒苔投喂珍珠龙胆石斑鱼,发现显著提高了脂肪酶和胰蛋白酶活性,与本实验结果略有差异;而高瞻等^[29]报道添加 2%~3%发酵浒苔时显著提高了花鲈的淀粉酶、胰蛋白酶和脂肪酶活性,其结果又不同。这可能是由于发酵工艺不同和鱼种不同造成。但

都证明了浒苔能够提高消化酶活性、增强鱼体消化能力。浒苔发酵后,浒苔多糖更易被鱼体吸收利用。Xu 等^[47]报道浒苔多糖改变了黄斑蓝子鱼(*Siganus oramin*)肠道优势菌群,增加了优势菌数量;

Zou 等^[48]报道浒苔多糖能修复断奶仔猪肠道屏障损伤,并增加盲肠丁酸和乙酸的含量;Kong 等^[49]研究发现浒苔多糖发酵人类粪便产生了更多的短链脂肪酸。更多种类和数量的有益菌能促进肠道对营养物质的消化吸收,维持肠道健康^[50];而短链脂肪酸作为肠道菌群与宿主相互作用的媒介^[51],其种类和数量增多更有利于维持肠道稳态。浒苔发酵产物具有浒苔多糖,其通过上述方式改善肠道健康,使得肠道消化能力变强,提高了肠道消化酶活性。

4 结语

在黑棘鲷的饲料中,发酵浒苔的适宜添加量为 3.5%~5.0%。在添加量为 3.5%和 5.0%时,黑棘鲷的增重率分别提高了 20.6%和 24.3%,饵料系数分别降低了 7.9%和 16.3%;超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、淀粉酶和脂肪酶活性均显著上升;此外,血清总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇含量显著降低,高密度脂蛋白胆固醇含量显著增加。在黑棘鲷饲料中添加发酵浒苔能够显著提高其生长性能、非特异性免疫能力和肠道消化酶活性,并有效改善其血脂。

参考文献:

- [1] Cao L, Naylor R, Henriksson P, et al. China's aquaculture and the world's wild fisheries[J]. Science, 2015, 347(6218): 133-135.
- [2] 肖倩. 水产养殖中抗生素滥用问题研究[J]. 养殖与饲料, 2020, 19(10): 46-48.
- [3] Xiao Q. Study on the abuse of antibiotics in aquaculture[J]. Breeding and Feed, 2020, 19(10): 46-48.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [4] 吴玲娟, 曹丛华, 高松, 等. 我国绿潮发生发展机理研究进展[J]. 海洋科学, 2013, 37(12): 118-121.
- [4] Wu L J, Cao C H, Gao S, et al. A review on the development mechanism of Green Tide in China[J]. Marine Sciences, 2013, 37(12): 118-121.
- [5] 罗民波, 刘峰. 南黄海浒苔绿潮的发生过程及关键要素研究进展[J]. 海洋渔业, 2015, 37(6): 570-574.
- [5] Luo M B, Liu F. Research progress in the key process and main factors of occurrence and development of green tide(*Ulva prolifera*) in the South Yellow Sea[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(6): 570-574.
- [6] 陈小艳, 代桂云. 青岛全市战浒苔确保奥帆赛如期举行[N]. 人民政协报, 2008-07-02(A04).

- Chen X Y, Dai G Y. Qingdao city's battle against *Enteromorpha* ensures the Olympic sailing race to be held as scheduled[N]. Journal of the Chinese People's Political Consultative Conference, 2008-07-02(A04).
- [7] 王津果, 陈泽宇, 倪嘉璇, 等. 光照强度和盐度对浒苔幼苗生长和光合生理的影响[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2022, 31(4): 1-10.
- Wang J G, Chen Z Y, Ni J X, et al. Effects of light intensity and salinity on the growth and photophysiology of *Ulva prolifera* seedlings[J]. Journal of Jiangsu Ocean University(Natural Science Edition), 2022, 31(4): 1-10.
- [8] Zhang J, Liu C, Yang L, et al. The source of the *Ulva blooms* in the East China Sea by the combination of morphological, molecular and numerical analysis[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2015, 164: 418-424.
- [9] 蔡子豪, 杜晶, 孙彬, 等. 南黄海绿潮藻的分子鉴定及营养价值初探[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(7): 1206-1215.
- Cai Z H, Du J, Sun B, et al. Molecular identification of green tide algae in the South Yellow Sea and preliminary study on its nutritive value[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(7): 1206-1215.
- [10] 何清, 胡晓波, 周峙苗, 等. 东海绿藻缘管浒苔营养成分分析及评价[J]. 海洋科学, 2006(1): 34-38.
- He Q, Hu X B, Zhou Z M, et al. Evaluation on nutrition components of *Enteromorpha linza*[J]. Marine Sciences, 2006(1): 34-38.
- [11] 张敏, 李瑞霞, 伊纪峰, 等. 4种经济海藻脂肪酸组成分析[J]. 海洋科学, 2012, 36(4): 7-12.
- Zhang M, Li R X, Yi J F, et al. Analysis of the fatty acid composition of four economic sea weeds[J]. Marine Sciences, 2012, 36(4): 7-12.
- [12] Song C, Zhao F, Liu J Y, et al. Proximate composition and fatty acid profile in different tissues of juvenile *Siganus guttatus* fed with *Enteromorpha prolifera*[J]. Indian Journal of Animal Research, 2018, 54: 1358-1362.
- [13] Asino H, Ai Q, Mai K. 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.
- [14] 王靖, 姚文祥, 李小勤, 等. 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[J]. 水产学报, 2021, 45(2): 246-254.
- Wang J, Yao W X, Li X Q, et al. Dietary effects of *Enteromorpha prolifera* on growth performance and flesh quality of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(2): 246-254.
- [15] 王珊珊. 饲料中添加浒苔对皱纹盘鲍幼鲍生长、存活及体成分的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(2): 91-98.
- Wang S S. Effects of *Enteromorpha prolifera* supplementation on growth, survival and body composition of juvenile abalone, *Haliotis discus hannai*[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(2): 91-98.
- [16] 王裕玉, 徐钢春, 张志伟, 等. 黑鲷营养需求与饲料研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(3): 56-63.
- Wang Y Y, Xu G C, Zhang Z W, et al. Research progress on nutritional requirement and feed of black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*)[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(3): 56-63.
- [17] Zhu T T, Shen Y D, Li X J, et al. Effects of an alternating linseed oil-fish oil feeding strategy on growth, fatty acid restoration and expression of lipid related genes in black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*)[J]. Aquaculture, 2022, 547: 737456.
- [18] Shen Y D, Li X J, Bao Y G, et al. Differential regulatory effects of optimal or excessive dietary lipid levels on growth, lipid metabolism and physiological response in black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*)[J]. Aquaculture, 2022, 560: 738532.
- [19] Ta J S, Li X J, Zhou Q C, et al. Insulin-mediated glycemic responses and glucose homeostasis in black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*) fed different carbohydrate sources[J]. Aquaculture, 2021, 540: 736726.
- [20] 华颖. 黑鲷幼鱼对饲料中碳水化合物利用及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- Hua Y. Utilization and Mechanism of Carbohydrate in Diet of Juvenile Black Sea Bream, *Acanthopagrus schlegelii*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [21] 成艳波, 张月星, 董智勇, 等. 小麦蛋白替代鱼粉及大豆蛋白对日本黄姑鱼(*Nibea japonica*)和黑鲷(*Sparus macrocephalus*)血清生化指标及肝脏抗氧化指标的影响[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(3): 106-114.
- Cheng Y B, Zhang Y X, Dong Z Y, et al. Effects of dietary replacement of fish meal and soy protein by wheat gluten on plasma biochemical indices and liver anti-oxidative indices of *Nibea japonica* and *Sparus macrocephalus*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(3): 106-114.
- [22] 杨彬彬, 华颖, 肖金星, 等. 棉粕替代部分鱼粉对黑鲷幼鱼消化酶活性及肠道组织结构的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2015, 36(4): 45-51. DOI:10.16872/j.cnki.1671-4652.2015.04.011.
- Yang B B, Hua Y, Xiao J X, et al. Effects of partial replacement of fish meal by cottonseed meal on digestive enzymes activity and intestine histology of juvenile black sea bream, *Acanthopagrus schlegelii*[J]. Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition), 2015, 36(4): 45-51. DOI:10.16872/j.cnki.1671-4652.2015.04.011.
- [23] Pan T T, Qiu H, Zhu T T, et al. Dietary lipid level affects growth performance, antioxidant capacity, hematological characteristics and lipid metabolism in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*)[J]. Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh, 2018, 70: 1521-1530.
- [24] Wang L, Sagada G, Wang B, et al. Transcriptomic analysis and histological alteration of black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*) liver fed different protein/energy ratio diets[J/OL]. Aquaculture Nutrition, (2022-07-07) [2023-07-01]. <https://www.hindawi.com/journals/anu/2022/6857698/>.
- [25] 胡洁, 殷会聪, 类成通, 等. 浒苔营养价值及其在水产饲料中应用研究[J]. 饲料工业, 2023, 44(16): 84-91.
- Hu J, Yin H C, Lei C T, et al. Nutritional characteristics of *Enteromorpha prolifera* and its application in aquatic feed[J]. Feed Industry, 2023, 44(16): 84-91.
- [26] 闫杰, 张欣, 孔晓静, 等. 饵料中浒苔添加量对梭鱼生长影响效果研究[J]. 饲料研究, 2012(3): 64-65, 71.
- Yan J, Zhang X, Kong X J, et al. Study on the effect of the

- amount of moss added in bait on the growth of barracuda (*Liza haematocheila*)[J]. Feed Research, 2012(3): 64-65, 71.
- [27] 宋超, 赵峰, 刘鉴毅, 等. 摄食浒苔和人工饵料的点篮子鱼幼鱼肌肉营养成分比较[J]. 动物营养学报, 2017, 29(6): 2047-2056.
- Song C, Zhao F, Liu J Y, et al. Comparison of nutritive components in muscle of juvenile *Siganus guttatus* fed with *Enteromorpha prolifera* and artificial feed[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(6): 2047-2056.
- [28] 周胜强, 游翠红, 王树启, 等. 饲料中添加浒苔对黄斑篮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 *Siganus canaliculatus* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(6): 1257-1265.
- [29] 高瞻, 陈强, 黎中宝, 等. 饲料添加发酵浒苔对花鲈 (*Lateolabrax japonicus*) 生长性能、消化酶活性和免疫的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(6): 1549-1556.
- Gao Z, Chen Q, Li Z B, et al. Effects of fermented *Enteromorpha prolifera* on growth performance, digestive enzyme activities and serum non-specific immunity of *Lateolabrax japonicus* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(6): 1549-1556.
- [30] 徐安乐, 黎中宝, 上官静波, 等. 发酵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]. 海洋学报, 2018, 40(4): 96-105.
- Xu A L, Li Z B, Shangguang J B, et al. Effects of fermented *Enteromorpha prolifera* on growth performance, non-specific immunity and digestive enzyme activity of pearl gentian grouper[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(4): 96-105.
- [31] Yang H, Li Z B, Chen Q, et al. Effect of fermented *Enteromorpha prolifera* on the growth performance, digestive enzyme activities and serum non-specific immunity of red tilapia (*Oreochromis mossambicus* × *Oreochromis niloticus*)[J]. Aquaculture Research, 2016, 47(12): 4024-4031.
- [32] Kim D, Vijayan D, Praveenkumar R, et al. Cell-wall disruption and lipid/astaxanthin extraction from microalgae: *Chlorella* and *Haematococcus*[J]. Bioresource Technology, 2016, 199: 300-310.
- [33] 秦搏, 常青, 陈四清, 等. 饲料中浒苔添加量以及处理方法对幼刺参生长、消化率、消化酶和非特异性免疫酶的影响[J]. 水产学报, 2015, 39(4): 547-556.
- Qin B, Chang Q, Chen S Q, et al. Effects of dosage and treatments of *Enteromorpha prolifera* on growth, digestibility, digestive enzymes and non-specific immunity enzymes of juvenile sea cucumber (*Apostichopus japonicus* Selenka)[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(4): 547-556.
- [34] Yildirim O, Ergun S, Yaman S, et al. Effects of two seaweeds (*Ulva lactuca* and *Enteromorpha linza*) as a feed additive in diets on growth performance, feed utilization, and body composition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi, 2009, 15(3): 455-460.
- [35] Zhao A L, Chen Y Q, Li Y X, et al. Sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* attenuate lipid metabolism disorders in mice with obesity induced by a high-fat diet via a pathway dependent on amp-activated protein kinase[J]. Journal of Nutrition, 2022, 152(4): 939-949.
- [36] Tang Z, Gao H, Wang S, et al. Hypolipidemic and antioxidant properties of a polysaccharide fraction from *Enteromorpha prolifera* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 58: 186-189.
- [37] Ren R D, Yang Z, Zhao A L, et al. Sulfated polysaccharide from *Enteromorpha prolifera* increases hydrogen sulfide production and attenuates non-alcoholic fatty liver disease in high-fat diet rats [J]. Food & Function, 2018, 9(8): 4376-4383.
- [38] 邹田德, 谌俊, 游金明. 浒苔多糖的营养生理功能及其饲用化前景研究进展[J]. 动物营养学报, 2022, 34(10): 6343-6351.
- Zou T D, Chen J, You J M. Research progress of nutritional physiology function and feeding prospects of *Enteromorpha prolifera* polysaccharide[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(10): 6343-6351.
- [39] 李莉, 李春梅. 鱼类非特异性免疫研究进展[J]. 河南农业科学, 2012, 41(2): 26-32.
- Li L, Li C M. Research progress on non-specific immune of fish[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(2): 26-32.
- [40] 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(自然科学版), 2017, 47(12): 37-45.
- Xu A L, Hu X W, Li Z B, et al. Effects of *Enteromorpha prolifera* ultrafine powders 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.
- [41] Wei J T, Wang S X, Pei D, et al. Polysaccharide from *Enteromorpha prolifera* enhances non-specific immune responses and protection against *Vibrio splendidus* infection of sea cucumber [J]. Aquaculture International, 2015, 23(2): 661-670.
- [42] Kim J K, Cho M L, Karnjanapratum S, et al. In vitro and in vivo immunomodulatory activity of sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2011, 49(5): 1051-1058.
- [43] Wei J T, Wang S X, Liu G, et al. Polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* enhance the immunity of normal mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 64: 1-5.
- [44] Zhou Z, Pan S K, Wu S J. Modulation of the growth performance, body composition and nonspecific immunity of crucian carp *Carassius auratus* upon *Enteromorpha prolifera* polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 147: 29-33.
- [45] Hur S J, Lee S Y, Kim Y C, et al. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods[J]. Food Chemistry, 2014, 160: 346-356.
- [46] Cahu C, Ronnestad I, Grangier V, et al. Expression and activities of pancreatic enzymes in developing sea bass larvae (*Dicentrarchus labrax*) in relation to intact and hydrolyzed dietary protein; involvement of cholecystokinin[J]. Aquaculture, 2004, 238(1-4): 295-308.
- [47] Xu Y, Li J, Han X F, et al. *Enteromorpha prolifera* diet drives intestinal microbiome composition in *Siganus oramin* [J]. Current Microbiology, 2021, 78(1): 229-237.
- [48] Zou T D, Yang J, Guo X B. Dietary seaweed-derived polysaccharides improve growth performance of weaned pigs through main-

- taining intestinal barrier function and modulating gut microbial populations[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2021, 12(3): 1184-1195.
- [49] Kong Q, Dong S Y, Gao J, et al. In vitro fermentation of sulfated polysaccharides from *E. proliferans* and *L. japonica* by human fecal microbiota[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 91: 867-871.
- [50] 崔艳, 张亚伟, 肖林, 等. 肠道有益菌及代谢产物对肠道和人体的影响[J]. *生物产业技术*, 2017(1): 91-94.
- Cui Y, Zhang Y W, Xiao L, et al. Effect of intestinal beneficial bacteria and their metabolites on the intestinal and human body[J]. *Biotechnology & Business*, 2017(1): 91-94.
- [51] 王春敏, 韩桂华, 马淑霞. 短链脂肪酸对肠黏膜屏障的影响[J]. *中国微生态学杂志*, 2022, 34(12): 1471-1475.
- Wang C M, Han G H, Ma S X. Effects of short-chain fatty acids on intestinal mucosal barrier[J]. *Chinese Journal of Microecology*, 2022, 34(12): 1471-1475.

Effects of Fermented *Enteromorpha prolifera* Powder on Growth Performance, Non-Specific Immunity and Intestinal Digestive Enzyme Activity of *Acanthopagrus schlegelii*

Hu Xiaowei^{1,2}, Liu Longhui^{1,2}, Chen Qiang^{1,2}, Li Wenjing^{1,2}, Li Zhongbao^{1,2}

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Fishery Resources and Eco-Environment, Xiamen 361021, China)

Abstract: In this study, we intended to explore the effects of fermentation *Enteromorpha prolifera* on the growth, non-specific immunity and intestinal digestive enzyme activity of *Acanthopagrus schlegelii*. *E. prolifera* was fermented and added to the basal diet of *A. schlegelii* in a gradient ratio of 0%, 2.0%, 3.5%, 5.0%, 6.5% and 8.0%, respectively. A total of 360 fish individuals were randomly divided into 6 groups. After feeding the corresponding diets for 28 days, the samples were collected and growth indexes, non-specific immune-related indexes and intestinal digestive enzyme activities were measured. The results showed that supplementation of 2.0%, 3.5% and 5.0% *E. prolifera* significantly increased the weight gain rate (WG) and specific growth rate (SGR) ($P < 0.05$) while supplementation of 2.0% and 5.0% *E. prolifera* significantly decreased the feed conversion ratio (FCR) ($P < 0.05$). Specifically, the WG increased by 17.6%, 20.6% and 24.3% and the FCR decreased by 18.8% and 16.3%, respectively. The addition of fermented *E. prolifera* decreased the contents of total cholesterol (TC) ($P < 0.05$), triglyceride (TG) and low density lipoprotein cholesterol (LDL-C), and decreased the contents of TC in all addition groups ($P < 0.05$). The TG content was significantly decreased by 2.0% and 8.0% *E. prolifera* supplementation ($P < 0.05$). LDL-C content was significantly decreased by 2.0%, 3.5% and 8.0% *E. prolifera* supplementation ($P < 0.05$). Supplementation of 2.0% and 3.5% significantly increased the content of high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C) ($P < 0.05$). In addition, the activity of superoxide dismutase (SOD) was significantly increased in all addition group ($P < 0.05$). The activities of alkaline phosphatase (AKP) and catalase (CAT) in serum and the activities of intestinal amylase and lipase were significantly increased by fermented *E. prolifera* supplementation ($P < 0.05$). In conclusion, fermented *E. prolifera* can improve the growth performance, non-specific immune capacity and intestinal digestive enzyme activity of *A. schlegelii*, and has the effect of improving blood lipid. The appropriate addition amount between 3.5% and 5.0%.

Key words: fermented *Enteromorpha prolifera*; *Acanthopagrus schlegelii*; growth performance; non-specific immunity; digestive enzyme