

文章编号: 1000-0615(2019)04-1080-12

DOI: 10.11964/jfc.20180511291

饲料中添加酵母培养物对黄颡鱼生长性能、非特异性免疫和肠道健康的影响

程鑫¹, 潘婷婷¹, 金敏¹, 马红娜¹, 梁超¹,
任泽林², 周文豪², 周志刚³, 周歧存^{1*}

(1. 宁波大学海洋学院, 鱼类营养研究室, 浙江宁波 315211;

2. 北京英惠尔生物技术有限公司, 生物技术研究院, 北京 100081;

3. 中国农业科学院饲料研究所, 北京 100086)

摘要: 为研究饲料中添加酵母培养物对黄颡鱼生长性能、非特异性免疫和肠道健康的影响, 在基础饲料中分别添加0、1%和2%的酵母培养物YC1(粗蛋白含量为50%)、1%和2%的酵母培养物YC2(粗蛋白含量为55%), 配制5种等氮等脂(42%粗蛋白和8%粗脂肪)的实验饲料, 分别命名为C、YC1-1、YC1-2、YC2-1和YC2-2。选择初始体质量为(4.87±0.00)g的黄颡鱼375尾, 随机分为5组(每组3个重复, 每个重复25尾), 进行为期8周的养殖实验。结果显示, YC2-1和YC2-2处理组黄颡鱼的增重率(WG)显著高于对照组, YC2-2处理组的特定生长率(SGR)显著高于对照组; YC2-1和YC2-2处理组黄颡鱼肌肉的蛋白沉积率(PPV)显著高于对照组, 蛋白质效率(PER)随着酵母培养物添加水平的上升呈先上升后下降的趋势, YC2-1处理组的PER最高; YC2-1和YC2-2处理组的饲料系数(FCR)显著低于对照组, YC2-2处理组的FCR显著低于YC2-1处理组; YC2-1和YC2-2处理组肝脏溶菌酶(LSZ)和超氧化物歧化酶(SOD)活性均显著高于对照组; YC2-1处理组的肠道皱襞高度显著高于YC1-1处理组, 皱襞宽度和上皮细胞高度显著高于YC2-2处理组。嗜水气单胞菌攻毒实验中, 酵母培养物组的平均累积死亡率(CMR)均低于对照组, YC2-1处理组的CMR显著低于对照组。研究表明, 在本实验条件下, 饲料中添加酵母培养物YC2能有效改善黄颡鱼机体非特异性免疫功能、提高抗氧化能力、维持肠道健康以及提高黄颡鱼抗嗜水气单胞菌感染的能力。

关键词: 黄颡鱼; 酵母培养物; 生长性能; 血清生化指标; 非特异性免疫; 肠道健康

中图分类号: S 963.73

文献标志码: A

酵母源生物饲料是一种健康、绿色的人造生物产品, 在加强动物免疫功能、维持胃肠道微生态平衡以及改善繁殖性能等方面都具有十分积极的作用和意义^[1]。酵母(*Saccharomyces* sp.)类产品主要包含酵母提取物、酵母水解物、酵母细胞壁和酵母培养物等, 其蛋白质含量高、营养丰富且工业化生产速率较高, 是常用的微

生物饲料蛋白源^[2-3]。酵母提取物一般用于天然调味品, 富含多肽、氨基酸、微量元素、B族维生素等^[4]。相较于酵母提取物, 酵母水解物的粗蛋白含量不低于35%, 其主要功能性物质是酵母核酸及核苷酸、酵母小肽^[5]。酵母细胞壁是将啤酒酵母培养增殖后, 收集菌种细胞, 音波震碎, 多次清洗、过滤后将其可溶物质在高温、

收稿日期: 2018-05-21 修回日期: 2018-09-21

资助项目: 国家自然科学基金(41476125); 2018年度重点研发计划项目(2018C02037); 浙江省2011协同创新项目; 浙江省重中之重一级学科建设项目

通信作者: 周歧存, E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn

酸碱处理后进行离心分离,提取的细胞壁于特定的温度和压强下进行喷雾干燥而得到的一种纯天然绿色添加剂,啤酒酵母细胞壁主要成分是葡聚糖(57.0%)、甘露寡糖(6.6%)、糖蛋白(22.0%)和几丁质,共占细胞壁干重约85%,其他成分如蛋白质、核酸、类脂和灰分约占干重的20%^[6]。相比之下酵母培养物的营养丰富,除含有人们所熟知的成分,如肽、氨基酸、维生素等,还含有人们未知的生长因子,如促生长因子和多种免疫因子等^[7]。

黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*),隶属鲇形目(Siluriformes)、鲿科(Bagridae)、黄颡鱼属(*Pelteobagrus*),在我国俗称黄蜡丁和嘎牙子等,属温水性底层鱼类,其适应性强、食性杂、养殖潜力大。黄颡鱼具有肉质细嫩、味道鲜美、营养丰富、刺少等优点,越来越受到东南亚各国消费者的青睐^[8]。由于人工养殖密度过高、水环境污染严重等问题,加之饲料营养成分不足,导致实际养殖中伴随着较多病害。而酵母培养物作为一种绿色健康的免疫增强剂,为解决这一问题提供了一个良好的突破口。同时,随着水产养殖规模的扩大,水产饲料行业使用的鱼粉数量也在增加^[9]。酵母培养物是一种粗蛋白含量较高的产物,也可作为一种优质的蛋白源,在一定程度上降低饲料鱼粉的使用。

有研究报道,酵母培养物能够提高斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)^[10]的抗病和抗应激能力。在刘立鹤等^[11]的研究中表明,酵母培养物能够改善草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)的肠道微生态结构,提高草鱼的生长性能。何远法等^[12]发现,饲料中添加0.30%的酵母培养物可显著提高凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的生长性能,添加0.30%~0.50%的酵母培养物可显著提高凡纳滨对虾的非特异性免疫力。此外,酵母培养物还可以提高花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[13]对饲料的利用率。本实验旨在研究饲料中添加酵母培养物对黄颡鱼生长性能、饲料利用、血清生化指标、肠道健康及非特异性免疫指标的影响,探讨酵母培养物对黄颡鱼生长及免疫调控的机制,以期对酵母培养物商业应用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 饲料配方与制作

以鱼粉、豆粕和大豆浓缩蛋白为蛋白源,

鱼油、豆油和大豆卵磷脂为脂肪源,酵母培养物的添加量分别为0、1%(酵母培养物YC1)、2%(酵母培养物YC1)和1%(酵母培养物YC2)、2%(酵母培养物YC2),配制5种等氮等脂(42%粗蛋白和8%粗脂肪)的实验饲料。所有固态原料过80目筛后混合均匀,维生素和矿物质等微量原料采用逐级扩大法混合,再加入鱼油、豆油和大豆卵磷脂以及水混合均匀,用双螺杆挤条机压制成药粒直径为1.5 mm和3.0 mm的饲料,90 °C烘箱中熟化30 min自然风干,饲料密封后放入-20 °C冰箱中保存备用(表1)。

1.2 实验管理

黄颡鱼鱼苗购自湖州南浔菱湖鱼苗厂。实验前将所需鱼苗于室内养殖系统(300 L水体的养殖桶)中暂养2周,暂养期间用商业饲料(宁波天邦股份有限公司)进行驯化。正式实验前24 h停止投料,挑选初始体质量为(4.87±0.00) g,规格一致的健康黄颡鱼进行实验。实验共设置5个处理,每个处理3个重复,每个重复25尾黄颡鱼,于宁波大学鱼类营养研究室淡水养殖基地养殖车间进行为期8周的养殖实验,玻璃钢的体积为300 L。每天投喂2次,分别为8:00和17:00,日投饵量为体质量的3%~4%,并根据当日黄颡鱼的进食情况和天气情况调整具体投喂量。实验用水为曝气后的自来水,连续充气,每天记录水温、溶解氧含量及pH。实验期间水温24~30 °C,实验后期因气温降低水温在21~24 °C, pH在8.0~8.2,溶解氧含量在6 mg/L以上。

1.3 样品采集及分析方法

生长性能和饲料利用 在8周养殖实验结束后,饥饿处理24 h,将每个养殖桶中的黄颡鱼全部捞出,用丁香酚(1:10 000)(国药集团上海化学试剂有限公司)麻醉后对每个桶的黄颡鱼进行计数和称重,计算成活率、增重率、特定生长率和饲料系数等生长指标。每个重复随机取7尾鱼的背部肌肉,保存于-20 °C冰箱,用于常规营养成分分析。参照AOAC^[14]方法,饲料、肌肉干物质含量采用105 °C常压干燥法测定,粗蛋白含量采用蛋白测定仪(LecoFB-528)测定,粗脂肪含量采用脂肪含量测定仪(OPSIS SX-360)测定。

血清生化指标及肝脏酶活性指标 每个重复取3尾黄颡鱼,每尾鱼测定体质量、体长,

表 1 实验饲料组成及营养水平(干物质)
Tab. 1 Ingredients and proximate composition of the experimental diets (dry matter) %

原料组分/% ingredients	饲料 diets				
	C	YC1-1	YC1-2	YC2-1	YC2-2
鱼粉 fish meal	20.00	19.24	18.48	19.13	18.26
豆粕 soybean meal	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
大豆浓缩蛋白 soy protein concentrate	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
面粉 wheat flour	30.10	30.10	30.10	30.10	30.10
酵母培养物 YC1 ¹	0.00	1.00	2.00	0.00	0.00
酵母培养物 YC2 ¹	0.00	0.00	0.00	1.00	2.00
鱼油 fish oil	2.36	2.41	2.46	2.41	2.45
大豆卵磷脂 soybean lecithin	2.36	2.41	2.46	2.41	2.45
维生素预混料 vitamin premix ²	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
氯化胆碱 choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
矿物质预混料 mineral premix ²	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
磷酸二氢钙 Ca (H ₂ PO ₄) ₂	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
微晶纤维素 cellulose	0.68	0.34	0.00	0.45	0.24
合计 sum	100	100	100	100	100
营养水平 nutrient levels³					
干物质/% dry matter	86.26	87.00	87.83	87.95	87.39
粗蛋白/% crude protein	43.39	43.52	43.87	43.07	43.22
粗脂肪/% crude lipid	7.24	7.12	7.25	7.14	7.27
粗灰分/% crude ash	8.36	8.35	8.27	8.24	8.29

注: 1. 酵母培养物由北京英惠尔生物技术有限公司提供, 主要成分包括氨基酸、小肽、维生素、葡聚糖、甘露聚糖、核苷酸、醛酮活性物等, 其中粗蛋白 $\geq 55\%$, 粗灰分 $\leq 8\%$, 干物质 $\geq 90\%$; 2. 维生素预混料和矿物质预混料均参照Huang等^[15]实验配制; 3. 营养水平为实测值

Notes: 1. yeast culture from Beijing Enhalar Biotechnology Co., Ltd., main components contain amino acids, small peptides, vitamins, dextran, mannan, nucleotides, and aldehyde and ketone actives etc., wherein the crude protein $\geq 55\%$, crude ash $\leq 8\%$, dry matter $\geq 90\%$; 2. mineral premix and vitamin premix were prepared according to Huang, *et al*^[15]; 3. nutrient levels were measured values

取全部肝脏称重后放入离心管, 液氮保存, 用于非特异性免疫酶活性分析。每个重复取3尾黄颡鱼, 采用尾静脉取血, 盛于1.5 mL离心管中于4 °C冰箱放置过夜后, 4 000 r/min离心10 min, 取上清液置于-80 °C冰箱用于血清以及非特异性免疫酶活性分析。黄颡鱼血清中总蛋白(total protein, TP)、白蛋白(albumin, ALB)、甘油三酯(triglyceride, TG)、总胆固醇(total cholesterol, TC)和丙氨酸转氨酶(alanine aminotransferase, ALT)含量均用Olympus600型(日本)全自动生化分析仪进行测定。超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、一氧化氮合酶(nitric oxide synthase, NOS)、溶菌酶(lysozyme, LSZ)、碱性磷酸酶(alkaline

phosphatase, ALP)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)的活性采用南京建成生物工程研究所的试剂盒经全波长酶标仪(Thermo, Multiskan GO 1510)测定。

肠道组织形态观察及分析 宋霖等^[16]研究发现, 黄颡鱼的中肠对饲料组分比较敏感, 参考其实验设计, 本实验随机从每个重复中挑选2尾鱼取其中肠, 用波恩氏液固定, 固定72 h后, 制备肠道组织切片, 用苏木精-曙红(H.E)染液染色, 中性树胶封片, 并在光学显微镜(Olympus, DP72)下观察肠道的皱襞高宽和上皮细胞高度。最后用Image J软件进一步分析电子图像以

评估不同组的肠道组织形态结构的差异。

1.4 嗜水气单胞菌感染实验

实验用嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)菌种来自宁波大学高等技术研究院水产动物病害研究室。菌种用营养肉汤琼脂培养基在37℃培养箱中摇床培养24 h,复壮2次。选取对数生长期的菌液,4 000 r/min离心60 s,收集沉淀,用灭菌生理盐水稀释。预实验确定半数致死浓度(LD₅₀),制备浓度为 7.7×10^8 CFU/mL的菌体悬液,置于4℃冰箱保存备用。养殖实验结束后,每个处理组选取规格一致、健康的黄颡鱼18尾,随机分为3个重复,每尾鱼腹腔注射50 μL的嗜水气单胞菌悬液。观察感染后黄颡鱼体的表征,并且每24 h捞出死亡个体,记录死亡尾数。实验期间持续投喂基础饲料,不间断充气,水体不循环。本实验持续7 d至无实验鱼死亡。

1.5 计算公式与统计分析方法

增重率(weight gain rate, WG, %)=(终末体质量-初始体质量)/初始体质量×100%;

成活率(survival rate, SR, %)=终末尾数/初始尾数×100%;

特定生长率(specific growth rate, SGR, %/d)=[ln(终末体质量)-ln(初始体质量)]/实验天数×100%;

饲料系数(feed conversion ratio, FCR)=摄入干饲料的量/(终末鱼体质量-初始鱼体质量);

蛋白质效率(protein efficiency rate, PER)=(终末体质量-初始体质量)/摄入饲料蛋白总量;

肝体比(hepatosomatic indices, HSI, %)=肝脏质量/体质量×100%;

肥满度(condition factor, CF, g/cm³)=体质量/体长³×100%;

脏体比(viscerosomatic index, VSI, %)=内脏团重量/体质量×100%;

累积死亡率(cumulative mortality rate, CMR, %)=累积死亡尾数/初始尾数×100%;

蛋白沉积率(productive protein value, PPV, %)=(终末体质量×终末粗蛋白含量-初始体质量×初始粗蛋白含量)/摄入饲料蛋白总量×100%;

实验数据采用SPSS 19.0统计软件进行分析,用平均值±标准误(mean±SE)表示,对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),并结合Duncan氏法进行多重比较, $P < 0.05$ 表示处理间差

异显著。

2 结果

2.1 酵母培养物对黄颡鱼生长性能和饲料利用的影响

饲料中添加酵母培养物YC2,显著提高了黄颡鱼的WG,其中YC2-1和YC2-2处理组的WG显著高于对照组($P < 0.05$),YC1-1和YC1-2处理组与对照组之间无显著性差异($P > 0.05$)。YC2-2处理组的SGR显著高于YC1-1和YC1-2处理组和对照组($P < 0.05$),YC1-2处理组的SGR显著低于YC2-1和YC2-2处理组($P < 0.05$)。YC2-1和YC2-2处理组FCR显著低于对照组($P < 0.05$),且YC2-2处理组的FCR要显著低于YC2-1处理组($P < 0.05$),YC1-1和YC1-2处理组与对照组之间无显著性差异($P > 0.05$)。饲料中添加酵母培养物对PER的影响不显著($P > 0.05$),但实验组的PER均高于对照组,其中YC2-1处理组的PER最高。YC2-1和YC2-2处理组的PPV显著高于对照组($P < 0.05$),其余各组之间没有显著性差异($P > 0.05$)。各处理组之间SR没有显著性差异($P > 0.05$),但均高于对照组,其中YC2-2处理组的SR高达100%。饲料中添加酵母培养物对黄颡鱼的CF、VSI和HSI均无显著性影响($P > 0.05$)(表2)。

2.2 酵母培养物对黄颡鱼体成分的影响

酵母培养物水平对黄颡鱼肌肉的干物质、粗脂肪、粗蛋白含量无显著影响($P > 0.05$),4个实验组的肌肉粗蛋白含量均高于对照组,YC2-2处理组的肌肉粗蛋白含量最高(表3)。

2.3 酵母培养物对黄颡鱼血清生化指标的影响

各处理组之间血清中ALB含量无显著性差异($P > 0.05$),YC1-2处理组略高于对照组。TG含量随着饲料中酵母培养物添加量的增加呈现先上升后下降的趋势,YC1-2处理组最高,YC2-2处理组最低。饲料中添加酵母培养物对黄颡鱼血清中TP、TC含量均无显著性影响($P > 0.05$)(表4)。

2.4 酵母培养物对黄颡鱼血清抗氧化酶和非特异性免疫酶活性的影响

饲料中添加酵母培养物对黄颡鱼血清中LSZ的活性影响不显著($P > 0.05$),但4个实验组LSZ的活性均高于对照组,其中YC2-1处理组的活性最高。在酵母培养物作用下,YC1-2、YC2-1和YC2-2

表 2 酵母培养物对黄颡鱼生长性能和饲料利用的影响

Tab. 2 Effects of dietary yeast culture supplementation on growth performance and feed utilization of *P. fulvidraco* (n=3)

项目 items	饲料 diets					P
	C	YC1-1	YC1-2	YC2-1	YC2-2	
初始体质量/g IBW	4.87±0.01	4.87±0.00	4.88±0.00	4.87±0.01	4.87±0.00	0.690
增重率/% WG	112.51±1.71 ^a	103.36±5.32 ^a	107.59±7.43 ^a	130.08±2.43 ^b	133.26±4.03 ^b	0.003
成活率/% SR	94.67±3.53	98.67±1.33	98.67±1.33	97.33±1.33	100±0.00	0.388
特定生长率/(%/d) SGR	1.32±0.05 ^{ab}	1.37±0.04 ^b	1.24±0.06 ^a	1.44±0.00 ^{bc}	1.47±0.03 ^c	0.015
饲料系数 FCR	2.25±0.06 ^a	2.33±0.06 ^a	2.39±0.15 ^a	2.03±0.05 ^b	1.42±0.03 ^c	0.001
蛋白质效率 PER	0.86±0.03	0.96±0.01	1.01±0.09	1.05±0.49	1.02±0.03	0.146
蛋白沉积率/% PPV	20.70±0.81 ^a	22.03±1.10 ^{ab}	23.04±0.57 ^{ab}	23.98±0.51 ^b	24.55±0.07 ^b	0.020
肝体比/% HSI	1.60±0.25	1.75±0.18	1.68±0.51	2.01±0.37	1.82±0.42	0.340
肥满度/(g/cm ³) CF	1.74±0.64	1.62±0.85	1.73±0.39	1.69±0.97	1.69±0.29	0.714
脏体比/% VSI	7.21±0.22	6.62±0.10	7.08±0.11	7.29±0.26	6.87±0.32	0.271

注: 同行数据上标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 下同

Notes: values in the same line with different superscripts are significantly different ($P<0.05$); the same below

表 3 酵母培养物对黄颡鱼肌肉养分含量的影响

Tab. 3 Effects of dietary yeast culture supplementation on proximate composition in muscle of *P. fulvidraco* (n=3)

项目 items	饲料 diets					P
	C	YC1-1	YC1-2	YC2-1	YC2-2	
干物质/% dry matter	20.42±0.75	20.24±0.11	20.69±0.21	20.13±0.23	20.97±0.62	0.335
粗脂肪/% crude lipid	1.15±0.03	1.18±0.10	1.27±0.13	1.14±0.10	1.13±0.04	0.804
粗蛋白/% crude protein	17.20±0.04	17.79±0.08	18.05±0.14	17.68±0.04	18.55±0.48	0.142

表 4 酵母培养物对黄颡鱼血清生化指标的影响

Tab. 4 Effects of dietary yeast culture supplementation on haematological characteristics of *P. fulvidraco*

项目 items	饲料 diets					P
	C	YC1-1	YC1-2	YC2-1	YC2-2	
总蛋白/(g/L) TP	30.94±0.61	32.33±1.01	32.91±1.37	30.87±0.46	31.24±0.60	0.395
白蛋白/(g/L) ALB	9.66±0.11	9.97±0.44	10.21±0.47	9.91±0.27	9.40±0.20	0.498
总胆固醇/(mmol/L) TC	4.35±0.08	4.65±0.16	4.66±0.33	4.16±0.06	4.33±0.05	0.249
甘油三酯/(mmol/L) TG	2.75±0.16	2.93±0.20	3.00±0.31	2.98±0.14	2.73±0.21	0.832

处理组黄颡鱼血清CAT活性显著高于对照组($P<0.05$)(表5)。

2.5 酵母培养物对黄颡鱼肝脏抗氧化酶和非特异性免疫酶活性的影响

YC2-1和YC2-2处理组黄颡鱼肝脏中LSZ活

性显著高于对照组($P<0.05$), YC1-1和YC1-2处理组与对照组之间无显著性差异($P>0.05$)。YC1-2处理组NOS活性最高, 其余各组之间无显著性差异($P>0.05$)。各处理组的ALT和ALP的活性在不同酵母培养物水平下同样无显著差异($P>0.05$)。YC1-2、YC2-1和YC2-2处理组的SOD活性显著高

表 5 酵母培养物对黄颡鱼血清溶菌酶和过氧化氢酶活性的影响

Tab. 5 Effects of dietary yeast culture supplementation on lysozyme and catalase in serum of *P. fulvidraco*

项目 items	饲料 diets					P
	C	YC1-1	YC1-2	YC2-1	YC2-2	
溶菌酶/(U/mL) LSZ	178.53±3.93	184.58±4.33	180.65±2.57	200.45±6.00	191.08±9.23	0.116
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	13.46±1.36 ^a	11.21±0.16 ^a	18.03±1.21 ^b	17.43±0.51 ^b	19.19±0.06 ^b	0.001

于对照组($P < 0.05$), YC1-1处理组与对照组之间无显著性差异($P > 0.05$)。GSH-Px活性随着饲料中酵母培养物添加量的增加呈现先上升后下降的趋势, YC2-1处理组的GSH-Px活性最高。饲料中添加酵母培养物对CAT活性无显著性影响($P >$

0.05), 但除YC1-1处理组外其余3个实验组均高于对照组, 其中YC2-1处理组的CAT活性最高。4个实验组黄颡鱼肝脏中丙二醛(MDA)含量均低于对照组, 其中YC1-2处理组最低, 但各处理组之间无显著性差异($P > 0.05$)(表6)。

表 6 酵母培养物对黄颡鱼肝脏抗氧化酶和非特异性免疫酶活性的影响

Tab. 6 Effects of dietary yeast culture supplementation on antioxidant enzymes and non-specific immune enzymes activity in *P. fulvidraco*

项目 items	饲料 diets					P
	C	YC1-1	YC1-2	YC2-1	YC2-2	
溶菌酶/(U/mg prot) LSZ	64.40±0.85 ^a	71.55±1.01 ^a	69.55±2.17 ^a	85.11±3.50 ^b	82.91±3.13 ^b	0.001
一氧化氮合酶/(U/mg prot) NOS	0.35±0.03	0.34±0.01	0.39±0.02	0.35±0.01	0.35±0.04	0.768
超氧化物歧化酶/(U/mg prot) SOD	20.22±2.87 ^a	21.22±6.95 ^{ab}	22.00±2.76 ^c	21.27±1.52 ^{bc}	21.05±3.42 ^{bc}	0.006
过氧化氢酶/(U/mg prot) CAT	6.94±0.22	6.82±0.47	7.10±0.05	7.27±0.18	7.03±0.21	0.772
谷胱甘肽过氧化物酶/(U/g prot) GSH-Px	38.87±1.15	38.55±3.14	40.10±2.79	41.51±0.68	39.49±2.42	0.890
丙二醛/(nmol/mg prot) MDA	0.67±0.04	0.61±0.07	0.58±0.03	0.60±0.01	0.62±0.08	0.814
碱性磷酸酶/(U/g prot) ALP	124.10±3.17	120.51±2.30	128.78±3.24	133.40±3.42	122.88±5.56	0.072
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	2 296.2±453.0	2 186.5±179.4	2 040.6±435.2	2 327.6±176.4	2 029.6±432.1	0.955

2.6 嗜水气单胞菌对黄颡鱼平均累积死亡率的影响

对照组的平均累积死亡率(CMR)在实验前3天呈急剧上升的趋势, 第4天后趋于平缓, 饲料中添加酵母培养物的处理组死亡趋势相比于对照组更为平缓。6 d后开始各处理组无死亡情况出现。第7天时, YC2-1处理组的CMR显著低于对照组($P < 0.05$), YC1-1、YC1-2和YC2-2处理组与对照组之间无显著性差异($P > 0.05$)(表7)。

2.7 酵母培养物对黄颡鱼中肠肠道形态的影响

YC1-1处理组的皱襞高度显著低于YC2-1和YC2-2处理组和对照组($P < 0.05$), YC2-1和YC2-2处理组和对照组之间差异不显著($P > 0.05$)。YC1-1和YC2-2处理组的皱襞宽度显著低于YC1-2处理组($P < 0.05$), YC1-1和YC2-1处理组与对照组之间

差异不显著($P > 0.05$)。YC2-2处理组的上皮细胞高度显著低于对照组以及YC1和YC2-1处理组($P < 0.05$), 其余各处理组之间无显著性差异($P > 0.05$)(表8)。

3 讨论

3.1 酵母培养物对黄颡鱼生长性能和饲料利用的影响

酵母培养物是一种微生态制品, 是指特制谷物培养基经酵母菌在特定工艺条件下发酵后干燥而得的混合物, 富含蛋白质、小肽、氨基酸、维生素、寡糖、消化酶和芳香类物质, 具备良好的适口性和促生长作用^[1]。已有大量的科学实验对酵母培养物提高动物生产性能的机制进行了研究, 一般认为, 酵母培养物通过向动

表 7 酵母培养物对黄颡鱼嗜水气单胞菌活菌液感染后累积死亡率的影响
 Tab. 7 Effects of dietary yeast culture supplementation on average cumulative mortality rates of *P. fulvidraco* after being challenged by *A. hydrophila* %

组别 group	暴露时间/d exposure time						
	1	2	3	4	5	6	7
C	16.60±9.62	55.55±14.70 ^b	72.22±14.70 ^b	72.22±14.70	77.78±14.70 ^b	77.78±14.70 ^b	77.78±14.70 ^b
YC1-1	11.11±5.56	33.33±9.62 ^{ab}	50.00±9.62 ^{ab}	55.55±14.70	55.55±14.70 ^{ab}	55.55±14.70 ^{ab}	55.55±14.70 ^{ab}
YC1-2	0.00±0.00	27.78±11.11 ^{ab}	44.44±5.56 ^{ab}	44.44±5.56	44.44±5.56 ^{ab}	50.00±0.00 ^{ab}	50.00±0.00 ^{ab}
YC2-1	5.56±5.56	22.22±5.55 ^{ab}	33.33±0.00 ^a	38.89±5.56	38.89±5.56 ^a	38.89±5.56 ^a	38.89±5.56 ^a
YC2-2	0.00±0.00	16.66±9.62 ^a	38.89±5.56 ^a	50.00±0.00	50.00±0.00 ^{ab}	50.00±0.00 ^{ab}	50.00±0.00 ^{ab}

表 8 酵母培养物对黄颡鱼中肠肠道形态的影响

Tab. 8 Effects of dietary yeast culture supplementation on midgut morphology of *P. fulvidraco* (n=3)

项目 items	饲料 diets					P
	对照 control	YC1-1	YC1-2	YC2-1	YC2-2	
皱襞高度/mm fold height	0.45±0.01 ^c	0.35±0.00 ^b	0.29±0.01 ^a	0.43±0.01 ^c	0.44±0.00 ^c	0.001
皱襞宽度/mm fold width	0.12±0.00 ^{bc}	0.10±0.00 ^{ab}	0.13±0.01 ^c	0.11±0.00 ^{bc}	0.09±0.01 ^a	0.008
上皮细胞高度/ μm epithelial cell height	27.68±0.84 ^{bc}	25.63±0.01 ^b	29.34±0.12 ^c	28.99±0.29 ^c	22.65±1.61 ^a	0.001

物体内的微生物菌群提供营养底物来改善胃肠道环境, 加速微生物的新陈代谢, 调整菌群结构, 刺激乳酸菌活性, 提高其乳酸利用能力, 减少乳酸盐的产生, 提高pH值的稳定性。稳定的pH值又能增加酵母菌、乳酸菌、纤维菌等有益菌的有效浓度, 特别是对纤维消化菌的生长有明显的促进作用^[17]。酵母培养物中含有丰富的氨基酸、维生素、有机酸及寡糖等营养物质, 通过调整胃肠道菌群结构、改善肠道形态结构、促进消化酶活性等, 促进饲料营养物质的消化、吸收和利用, 从而提高水产动物的生长性能^[18]。酵母培养物最先应用于反刍动物的蛋白质补充, 有研究报道, 酵母培养物可提高反刍动物对饲料中干物质、蛋白质和粗纤维等营养物质的利用率^[19]。此外, 酵母培养物还可以改善畜禽类的生长性能。在武书庚等^[20]的研究中, 添加0.2%酵母培养物的实验组在改善平均蛋重、料蛋比和平均日采食量方面表现优异。酵母培养物在水产饲料中的研究也越来越多, 有大量研究报道, 在水产饲料中添加适量的酵母培养物能够显著提高建鲤(*Cyprinus carpio* var. *jian*)^[21]、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)^[22]、草鱼^[23]、异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)^[24]、凡纳滨对虾^[12]等水产动物的特定生长率和增重率, 显著降低饲料

系数。在本实验中也有类似的效果, 饲料中添加酵母培养物YC2的处理组, 其增重率、特定生长率和饲料系数均显著优于对照组。在饲料中添加适量的酵母培养物能够使鱼体达到较好的蛋白利用率。本实验中, 随着酵母培养物添加水平的提高, 黄颡鱼肌肉粗蛋白含量呈现上升的趋势, 这一结果在曾本和等^[25]的草鱼实验研究中得到证实。本实验表明, 酵母培养物能够降低饲料中鱼粉的使用量, 并且能够提高黄颡鱼的生长性能和饲料利用率。

3.2 酵母培养物对黄颡鱼血清生化指标的影响

ALT广泛存在于动物体内, 是机体内中间代谢的重要反应酶, 在机体蛋白质代谢中起重要作用, 其活性也是反映肝细胞受损伤的重要指标。在健康情况下血清中正常ALT活性较小, 当肝脏受到损伤或者病变时, 可造成动物血清中ALT突然持续性增强^[26]。血清中总蛋白、胆固醇、甘油三酯和白蛋白含量与动物机体健康有关^[27]。在本实验条件下, 饲料中添加酵母培养物对血清中总蛋白、白蛋白、甘油三酯、总胆固醇和谷丙转氨酶均无显著性影响, 其原因可能与实验中各处理组之间饲料原料和营养水平基本一致有关。因此, 饲料中添加适宜水平的酵

母培养物不会对黄颡鱼肝脏造成损伤,并能使鱼体维持在健康的水平。

3.3 酵母培养物对黄颡鱼抗氧化和非特异性免疫力的影响

酵母培养物对动物的机体免疫具有正面的影响,饲料中添加适宜比例的酵母培养物能够提高机体的非特异性免疫力和抗病力^[10,12]。动物源LSZ是一种动物体内广泛存在的酶类,可以水解细菌细胞壁肽聚糖中的 β -1,4糖苷键,具有消化分解细菌、抑制外源微生物生长和加强机体免疫力的作用^[28]。在本研究中,添加酵母培养物处理组黄颡鱼血清的LSZ活性均高于实验组,且添加酵母培养物YC2处理组黄颡鱼肝脏的LSZ活性显著高于对照组。这一结果与何远法等^[12]和王广军等^[29]在凡纳滨对虾的研究中得到证实,这可能是因为酵母培养物中富含B族维生素。NO是多功能的生物活性分子,免疫系统中巨噬细胞产生的NO与超氧阴离子自由基(O_2^-)可生成过氧亚硝酸阴离子(ONOO⁻),过氧亚硝酸阴离子是防御病毒感染的最主要的氮氧自由基^[30],NO的生物合成依赖于NOS^[31],酵母培养物可以通过提高机体NOS的活性来增强非特异性免疫力。柳茜等^[32]在大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)幼鱼的实验中发现酵母培养物可以提高大菱鲂幼鱼肝脏中NOS的活性,相似的结果也在徐磊等^[24]的研究中被报道。在本实验中,YC1-2处理组NOS活性高于对照组,其余各实验组NOS活性与对照组几乎没有差异。与已有研究相比,可能与不同饲料之间营养水平不一致,以及不同处理组之间酵母培养物的比例不同有关。

SOD是抗氧化酶系统中十分重要的酶,免疫细胞呼吸爆发和过氧化物酶系统的激活均能产生超氧阴离子自由基并排除抗原物质^[33-34],而SOD能够催化氧自由基对分子氧和过氧化氢的歧化反应,并且增强吞噬细胞防御能力^[35]。在本实验条件下,饲料中添加酵母培养物能够提高黄颡鱼肝脏SOD和CAT活性。这可能与酵母培养物中含有丰富 β -葡聚糖和甘露寡糖(MOS)相关^[36-37]。在本实验中,添加酵母培养物可以提高黄颡鱼的抗氧化能力,这与姜柯君等^[38]、何远法等^[12]、徐磊等^[24]的研究结果基本一致。另外,研究发现酵母培养物水溶物能够改善因MDA损伤的离体草鱼肠道黏膜细胞的生长状态,提高细胞抗氧化

能力^[39]。在本实验中,酵母培养物也在一定程度上降低了肝脏的MDA含量。

夏季,随着水温升高,水体中的病原体也开始滋生,同时是黄颡鱼疾病的高发期。特别是在高密度养殖的条件下,极易引起黄颡鱼感染疾病,造成大面积的死亡,给养殖户带来严重的经济损失。嗜水气单胞菌是黄颡鱼夏季暴发病害的病因之一^[40],因此,提高黄颡鱼对其的抗性具有很大的经济意义。在本实验条件下,各处理组注射嗜水气单胞菌活菌液后,添加酵母培养物的实验组死亡率均低于对照组。在粟雄高等^[41]的研究中报道,酵母培养物能够降低弧菌感染后凡纳滨对虾的死亡率。可能由于在本实验中酵母培养物提高了黄颡鱼的LSZ活性,而LSZ具有消化分解细菌、抑制外源微生物生长、加强机体免疫力的作用。

3.4 酵母培养物对黄颡鱼肠道健康的影响

肠道作为动物消化和吸收的主要器官,其健康程度是动物正常生长发育的基础。肠道的褶皱面积和高度通常被视为评价肠道消化和吸收能力的主要标志^[42],可以通过测定皱襞高度和宽度来评估肠皱襞面积大小。在反刍动物和禽畜中已有研究报道,饲料中添加酵母培养物会影响早期断奶仔猪(*Sus scrofa*)^[43]和肉鸡(*Gallus gallus*)^[44]的肠道黏膜形态,能够促进其肠道的健康发育。此外已有研究表明,在饲料中添加酵母培养物能够显著提高草鱼^[11,23]等水产动物肠道黏膜高度和微绒毛密度。饲料中添加酵母培养物能够改善肠道形态的原因可能在于酵母培养物的营养成分中含有核苷酸,研究表明核苷酸添加剂能够显著提高雏鸡^[45]和刚断奶小鼠(*Mus musculus*)^[46]肠绒毛高度和肠壁厚度。在Burrells等^[47]的研究中也表明,大西洋鲑(*Salmo salar*)饲料中添加0.3%核苷酸混合物,可明显增加小肠的肠皱褶高度。本实验中饲料添加酵母培养物并没有得到相似的结果,处理组黄颡鱼中肠的肠道形态与对照组相比无显著性差异,且没有呈现出一定的规律性。这可能是因为酵母培养物中核苷酸添加水平较低,不能够满足肠道所需,或是由于饲料加工过程中破坏了酵母培养物中的部分核苷酸从而导致本实验结果与别的研究产生差异。酵母培养物对黄颡鱼肠道形态的影响还需要进一步探索。

4 结论

本实验表明, 添加酵母培养物YC2(粗蛋白含量为55%)能够降低饲料中鱼粉的使用, 提高黄颡鱼的生长性能和饲料利用率, 有效改善黄颡鱼机体非特异性免疫功能、提高抗氧化能力、维持肠道健康以及提高黄颡鱼抗嗜水气单胞菌感染的功能。

参考文献:

- [1] 刘源, 李文辉, 刘明, 等. 酵母源生物饲料的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(9): 16-20.
Liu Y, Li W W, Liu M, *et al.* Research progress on application of yeast derived biological feed products[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2017, 53(9): 16-20(in Chinese).
- [2] Ferreira I M P L V O, Pinho O, Vieira E, *et al.* Brewer's *Saccharomyces* yeast biomass: characteristics and potential applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(2): 77-84.
- [3] Welker T L, Lim C, Yildirim - Aksoy M, *et al.* Immune response and resistance to stress and *Edwardsiella ictaluri* challenge in channel catfish, *Ictalurus punctatus*, fed diets containing commercial whole-cell yeast or yeast subcomponents[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2007, 38(1): 24-35.
- [4] 尹子煜, 薛敏, 郑银桦, 等. 酵母提取物在异育银鲫饲料中促摄食作用的研究[J]. 饲料工业, 2017(8): 4-8.
Yin Z Y, XUE M, Zheng Y H, *et al.* Effect of yeast extract as feeding stimulants on diet preference of gibel carp[J]. Feed Industry, 2017(8): 4-8(in Chinese).
- [5] 贺淼, 黄鑫, 陈中平, 等. 酵母水解物的消化吸收及营养作用[J]. 中国饲料, 2014(9): 38-41.
He M, Huang X, Chen Z P, *et al.* The digestion and absorption of yeast hydrolyzate and its nutritional value[J]. China Feed, 2014(9): 38-41(in Chinese).
- [6] 赵芳芳, 张日俊. 酵母细胞壁生理功能及其应用[J]. 中国饲料, 2003(17): 17-18.
Zhao F F, Zhang R J. The application and physiological function of the cell wall of yeast[J]. China Feed, 2003(17): 17-18(in Chinese).
- [7] 孙喆, 甄玉国, 鲍男, 等. 酵母培养物在动物生产中营养及保健作用的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2014, 50(24): 65-68, 73.
Sun Z, Zhen Y G, Bao N, *et al.* Progress in the research of yeast culture on nutrition and health care function in animal production[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2014, 50(24): 65-68, 73(in Chinese).
- [8] 文远红, 曹俊明, 黄燕华, 等. 黄颡鱼营养需求研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, 38(18): 108-111.
Wen Y H, Cao J M, Huang Y H, *et al.* Research advancement in nutrition requirement of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(18): 108-111(in Chinese).
- [9] Hardy R W. Utilization of plant proteins in fish diets: effects of global demand and supplies of fishmeal[J]. Aquaculture Research, 2010, 41(5): 770-776.
- [10] 罗璋, 姚鹃, 陈昌福, 等. 酵母免疫多糖对受免斑点叉尾鲷免疫应答的增强作用[J]. 淡水渔业, 2007, 37(3): 22-25, 33.
Luo Z, Yao J, Chen C F, *et al.* Influence of dietary yeast immunopolysacchride resistance of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) against *Aeromonas hydrophila*[J]. Freshwater Fisheries, 2007, 37(3): 22-25, 33(in Chinese).
- [11] 刘立鹤, 张恒, 聂伟, 等. 草鱼配合饲料添加酵母培养物对草鱼生长性能、肝肠功能的影响[J]. 武汉轻工大学学报, 2014, 33(1): 34-39.
Liu L H, Zhang H, Nie W, *et al.* Effects of grass carp feed added yeast culture on growth performance, the function of liver and bowel of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2014, 33(1): 34-39(in Chinese).
- [12] 何远法, 郁欢欢, 迟淑艳, 等. 酵母培养物对凡纳滨对虾生长性能、非特异性免疫力和抗病力的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(12): 4063-4072.
He Y F, Yu H H, Chi S Y, *et al.* Effects of yeast culture on growth performance, nonspecific immunity and disease resistance of *Litopenaeus vannamei*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(12): 4063-4072(in Chinese).
- [13] Yu H H, Han F, Xue M, *et al.* Efficacy and tolerance of yeast cell wall as an immunostimulant in the diet of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*)[J]. Aquaculture, 2014, 432: 217-224.
- [14] AOAC. Official methods of analysis[M] 18th ed. Arlington, VA: Association of Official Analytical Chemists, 2006.
- [15] Huang X L, Xia M H, Wang H L, *et al.* Dietary thiamin could improve growth performance, feed utilization and

- non-specific immune response for juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2015, 21(3): 364-372.
- [16] 宋霖, 蔡春芳, 叶元士, 等. 四种植物蛋白对黄颡鱼肠道形态结构的影响[J]. *淡水渔业*, 2012, 42(6): 54-60.
Song L, Cai C F, Ye Y T, *et al.* Effects of four kinds of plant protein on intestinal morphology of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Freshwater Fisheries*, 2012, 42(6): 54-60(in Chinese).
- [17] Nisbet D J, Martin S A. Effect of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on lactate utilization by the ruminal bacterium *Selenomonas ruminantium*[J]. *Journal of Animal Science*, 1991, 69(11): 4628-4633.
- [18] 郁欢欢, 周文豪, 曾虹, 等. 酵母培养物在水产动物中的应用及作用机理研究进展[J]. *饲料工业*, 2015, 36(18): 25-29.
Yu H H, Zhou W H, Zeng H, *et al.* Application and action mechanism of yeast culture in aquatic animals[J]. *Feed Industry*, 2015, 36(18): 25-29(in Chinese).
- [19] Lei X, Stahl C. Biotechnological development of effective phytases for mineral nutrition and environmental protection[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, 57(4): 471-481.
- [20] 武书庚, 刘质彬, 齐广海, 等. 酵母培养物对产蛋鸡生产性能和蛋品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2010, 22(2): 365-371.
Wu S G, Liu Z B, Qi G H, *et al.* Effects of yeast culture on performance and egg quality of laying hens[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(2): 365-371(in Chinese).
- [21] 刘哲, 魏时来. 酵母培养物对建鲤生长性能影响的研究[J]. *饲料工业*, 2003, 24(4): 52-53.
Liu Z, Wei S L. Effect of yeast cultivation for *Cyprinus carpio* var. *jian* growth performance[J]. *Feed Industry*, 2003, 24(4): 52-53(in Chinese).
- [22] 温俊. 复合益生菌与酵母培养物对牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)生长、免疫及抗病力的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
Wen J. Effects of dietary probiotics and yeast culture on growth, immune response and disease resistance of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007(in Chinese).
- [23] 邱燕. 三种微生态制剂对草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)生长性能、生理机能及肠道黏膜的影响[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
Qiu Y. Effects of three microecological agents on growth performance, physiological function and intestinal mucosa of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[D]. Suzhou: Suzhou University, 2010(in Chinese).
- [24] 徐磊, 刘波, 谢骏, 等. 酵母培养物对异育银鲫生长、血液生化及免疫的影响[J]. *江苏农业科学*, 2010(6): 371-374.
Xu L, Liu B, Xie J, *et al.* Effects of yeast culture on growth, factors associated with immunity and antioxidant of Allogynogenetic crucian carp[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010(6): 371-374(in Chinese).
- [25] 曾本和, 向泉, 杨文娇, 等. 酵母水解物对草鱼生长性能和体成分的影响[J]. *饲料工业*, 2015, 36(16): 16-19.
Zeng B H, Xiang X, Yang W J, *et al.* Effects of yeast hydrolyzate on growth and body composition of juvenile *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Feed Industry*, 2015, 36(16): 16-19(in Chinese).
- [26] 惠天朝, 施明华, 朱荫媚. 硒对罗非鱼慢性镉中毒肝抗氧化酶及转氨酶的影响[J]. *中国兽医学报*, 2000, 20(3): 264-266.
Hui T C, Shi M H, Zhu Y M. Effects of selenium on antioxidant enzymes and transaminases of liver in cadmium chronic toxic tilapia[J]. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 2000, 20(3): 264-266(in Chinese).
- [27] Zhou Q C, Wu Z H, Tan B P, *et al.* Optimal dietary methionine requirement for juvenile cobia (*Rachycentron canadum*)[J]. *Aquaculture*, 2006, 258(1-4): 551-557.
- [28] 张鹏, 江明锋, 王永. 动物源溶菌酶研究进展[J]. *中国生物工程杂志*, 2012, 32(8): 87-93.
Zhang P, Jiang M F, Wang Y. Advance in studies of animal-borne lysozyme[J]. *China Biotechnology*, 2012, 32(8): 87-93(in Chinese).
- [29] 王广军, 朱旺明, 谭永刚, 等. 酵母核苷酸对凡纳滨对虾生长、免疫以及抗应激影响的研究[J]. *饲料工业*, 2006, 27(8): 29-32.
Wang G J, Zhu W M, Tan Y G, *et al.* Effect of dietary yeast nucleotides on the growth performance, non-specific immunity and resistance stress of *Litopenaeus vanamei*[J]. *Feed Industry*, 2006, 27(8): 29-32(in Chinese).
- [30] Matés J M, Pérez-Gómez C, Blanca M. Chemical and biological activity of free radical 'scavengers' in allergic diseases[J]. *Clinica Chimica Acta*, 2000, 296(1-2): 1-15.
- [31] 苏岭, 刘红柏, 王荻, 等. 四种复方中药和黄芪多糖对鲫鱼生长、组织中NO含量与NOS活性的影响[J]. *水*

- 产学杂志, 2010, 23(3): 11-15.
- Su L, Liu H B, Wang D, *et al.* The effect of four kinds of Chinese herbal compound and APS on Growth and the contents of NO and NOS in organization of *Carassius auratus*[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2010, 23(3): 11-15(in Chinese).
- [32] 柳茜, 杨文娇, 吴振, 等. 酵母水解物对大菱鲆幼鱼非特异性免疫及抗应激能力的影响[J]. 饲料工业, 2015, 36(18): 33-37.
- Liu X, Yang W J, Wu Z, *et al.* Effects of yeast hydrolysate on non-specific immunity and anti-stress abilities of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. *Feed Industry*, 2015, 36(18): 33-37(in Chinese).
- [33] Vidal M L, Bassères A, Narbonne J F. Influence of temperature, pH, oxygenation, water-type and substrate on biomarker responses in the freshwater clam *Corbicula fluminea* (Müller)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2002, 132(1): 93-104.
- [34] Avaletto M, Ghezzi A, Burlando B, *et al.* Effect of hydrogen peroxide on antioxidant enzymes and metallothionein level in the digestive gland of *Mytilus galloprovincialis*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2002, 131(4): 447-455.
- [35] Yang S P, Wu Z H, Jian J C, *et al.* Effect of marine red yeast *Rhodospiridium paludigenum* on growth and antioxidant competence of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Aquaculture*, 2010, 309(1-4): 62-65.
- [36] Jensen G S, Patterson K M, Yoon I. Yeast culture has anti-inflammatory effects and specifically activates NK cells[J]. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*, 2008, 31(6): 487-500.
- [37] Mourão J L, Pinheiro V, Alves A, *et al.* Effect of mannan oligosaccharides on the performance, intestinal morphology and cecal fermentation of fattening rabbits[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2006, 126(1-2): 107-120.
- [38] 姜柯君, 王际英, 张利民, 等. 饲料中添加小肽对星斑川鲷幼鱼生长性能、体组成及血清生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2013, 25(1): 222-230.
- Jiang K J, Wang J Y, Zhang L M, *et al.* Effects of small peptides supplementation on growth performance, body composition and serum biochemical indices of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, 25(1): 222-230(in Chinese).
- [39] Xu L, Ran C, He S X, *et al.* Effects of dietary yeast nucleotides on growth, non-specific immunity, intestine growth and intestinal microbiota of juvenile hybrid tilapia *Oreochromis niloticus* ♀×*Oreochromis aureus* ♂[J]. *Animal Nutrition*, 2015, 1(3): 244-251.
- [40] 王卫民. 黄颡鱼的规模人工繁殖试验[J]. 水产科学, 1999(3): 9-12.
- Wang W M. Studies on Artificial Breeding of *Pelteobagrus fulvidraco* (Richardson) in Large-scale[J]. *Fisheries Science*, 1999(3): 9-12(in Chinese).
- [41] 粟雄高, 李小勤, 冷向军, 等. 酵母培养物和芽孢杆菌对凡纳滨对虾生长、蛋白酶活性和免疫性能的影响[J]. *海洋渔业*, 2012, 34(2): 168-176.
- Li X G, Li X Q, Leng X J, *et al.* Effects of yeast culture and *Bacillus* on growth, protease activity and immunity of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Marine Fisheries*, 2012, 34(2): 168-176(in Chinese).
- [42] 黄路. 酿酒酵母在鱼类中的益生效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- Huang L. Probiotic effects of dietary *Saccharomyces cerevisiae* on fish[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015(in Chinese).
- [43] Frankič T, Pajk T, Rezar V, *et al.* The role of dietary nucleotides in reduction of DNA damage induced by T-2 toxin and deoxynivalenol in chicken leukocytes[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2006, 44(11): 1838-1844.
- [44] 朱邦科, 曹文宣. 鲢早期发育阶段鱼体脂肪酸组成变化[J]. *水生生物学报*, 2002, 26(2): 130-135.
- Zhu B K, Cao W X. Fatty acid composition and their changes during early life stage of silver carp *Hypophthalmichthys molitrix*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(2): 130-135(in Chinese).
- [45] 邬小兵, 乐国伟, 施用晖. 肉仔鸡日粮外源核苷酸营养作用初探[J]. *中国畜牧杂志*, 2001, 37(5): 15-17.
- Wu X B, Le G W, Shi Y H. Preliminary study on the nutritive role of dietary nucleotides to young chicken[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2001, 37(5): 15-17(in Chinese).
- [46] 王兰芳, 乐国伟, 施用晖, 等. 日粮核苷酸对早期断奶小鼠生长发育的影响[J]. *无锡轻工大学学报*, 2003, 22(4): 18-22.
- Wang L F, Le G W, Shi Y H, *et al.* Effect of dietary nucleotides on development of early weaned mice[J]. *Journal of Wuxi University of Light Industry*, 2003,

- 22(4): 18-22(in Chinese).
[47] Burrells C, Williams P D, Southgate P J, *et al.* Dietary nucleotides: a novel supplement in fish feeds: 2. Effects on vaccination, salt water transfer, growth rates and physiology of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J]. *Aquaculture*, 2001, 199(1-2): 171-184.

Effects of dietary yeast culture supplementation on growth performance, nonspecific immunity and intestinal health of *Pelteobagrus fulvidraco*

CHENG Xin¹, PAN Tingting¹, JIN Min¹, MA Hongna¹, LIANG Chao¹,
REN Zelin², ZHOU Wenhao², ZHOU Zhigang³, ZHOU Qicun^{1*}

(1. Laboratory of Fish Nutrition, School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Beijing Enhalar Biotech Co., Ltd., Institute of Biotechnology, Beijing 100081, China;

3. Feed Research Institute, China Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100086, China)

Abstract: An 8-week feeding trial was conducted to evaluate the effects of dietary yeast culture supplementation on growth performance, nonspecific immunity and intestinal health of *Pelteobagrus fulvidraco*. Yeast culture YC1 (50% crude protein), yeast culture YC2 (55% crude protein) with 0, 1% and 2%, respectively were added to basic diet, and five practical diets with iso-nitrogenous and iso-lipidic (42% crude protein and 8% crude lipid) were prepared, named C, YC1-1, YC1-2, YC2-1 and YC2-2, respectively. A total of 375 *P. fulvidraco* with an average initial body weight about (4.87±0.00) g were randomly allocated into five groups with three replicates per group and 25 fish per replicate. The results indicated that fish fed the diets containing YC2-1 and YC2-2 had higher weight gain rate (WGR) than that fed the control diet of *P. fulvidraco*, and the highest specific growth rate (SGR) was observed at YC2-2 treatment among all treatments. Fish fed the diets containing YC2-1 and YC2-2 had higher productive protein value (PPV) than that fed the control diet of *P. fulvidraco*. Protein efficiency rate (PER) increased at first and then decreased with the increase of yeast culture addition level, and YC2-1 treatment had the highest PER among all treatments. Fish fed the diets containing YC2-1 and YC2-2 had lower feed coefficient rate (FCR) than that fed the control diet of *P. fulvidraco*, and YC2-2 treatment had lower FCR than that the YC2-1 treatment. Fish fed the diets containing YC2-1 and YC2-2 had higher activity of lysozyme (LSZ) and superoxide dismutase (SOD) than that fed the control diet in the liver of *P. fulvidraco*. Fish fed the diets containing YC2-1 had higher height of intestinal folds than that fed the YC1-1 diet of *P. fulvidraco*, and fish fed the diets containing YC2-1 had greater width of folds and height of epithelial cells than that the YC2-2 treatment of *P. fulvidraco*. In the experiment of *Aeromonas hydrophila* challenge, fish fed the diets containing yeast culture had lower average cumulative mortality rates (CMR) than that fed the control diet of *P. fulvidraco*, and the lowest CMR was observed at YC2-1 treatment among all treatments. In conclusion, under the experimental conditions, adding yeast culture YC2 to diet can effectively improve the nonspecific immune function of *P. fulvidraco*, improve its antioxidant capacity, maintain intestinal health and improve its ability to resist *A. hydrophila* infection.

Key words: *Pelteobagrus fulvidraco*; yeast culture; growth performance; serum biochemical indicators; non-specific immunity; intestinal health

Corresponding author: ZHOU Qicun. E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41476125); 2018 Key Research and Development Projects (2018C02037); Zhejiang 2011 Collaborative Innovation Project; Zhejiang Province's Top Priority Discipline Construction Project