

doi: 10.7541/2023.2022.0268

## 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼生长性能、体成分和血清生化指标的影响

董立学<sup>1</sup> 解绥启<sup>2</sup> 周亮<sup>3</sup> 陆星<sup>1</sup> 田娟<sup>1</sup> 喻丽娟<sup>1</sup> 文华<sup>1</sup>  
肖江蓉<sup>3</sup> 蒋明<sup>1</sup>

(1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 武汉 430073; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430064;  
3. 武昌首义学院, 武汉 430064)

**摘要:** 为探究饲料蛋白源和养殖密度对草鱼生长以及生理健康的影响, 以初始体质量为 $(5.36 \pm 0.18)$  g的草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)为试验对象, 采用双因素正交实验, 研究饲料非粮蛋白源(豆粕、乙醇梭菌蛋白、黄粉虫、棉籽浓缩蛋白和小球藻)和初始养殖密度(0.11、0.16和0.21 kg/m<sup>3</sup>; 对应为20、30和40尾/网箱)及其交互作用对草鱼生长性能、体成分和血清生化指标的影响。养殖试验在池塘网箱(1.0 m×1.0 m×1.5 m)中进行, 养殖周期为60d。结果表明: 随着养殖密度的增加, 各蛋白源组草鱼饲料系数均呈增长趋势, 特定生长率、增重率和蛋白质效率和肝体比均呈降低趋势。在不同养殖密度下, 黄粉虫组饲料系数均显著高于其他蛋白源组( $P < 0.05$ ), 特定生长率、增重率和蛋白质效率均显著低于其他蛋白源组( $P < 0.05$ )。当养殖密度为0.11和0.16 kg/m<sup>3</sup>时, 试验草鱼生长性能接近, 其特定生长率显著优于0.21 kg/m<sup>3</sup>密度组( $P < 0.05$ )。饲料蛋白源和养殖密度对草鱼全鱼水分和粗蛋白含量无显著影响( $P > 0.05$ )。不考虑饲料蛋白源, 0.21 kg/m<sup>3</sup>密度组草鱼粗脂肪含量显著低于其他密度组( $P < 0.05$ ), 血清中谷草转氨酶、谷丙转氨酶及葡萄糖水平显著高于其他密度组( $P < 0.05$ ), 养殖密度对血清中碱性磷酸酶、白蛋白、甘油三酯和总胆固醇水平影响不显著( $P > 0.05$ )。不考虑养殖密度, 小球藻组白蛋白水平显著高于乙醇梭菌蛋白组、黄粉虫组和棉籽浓缩蛋白组( $P < 0.05$ ), 黄粉虫组碱性磷酸酶水平显著高于乙醇梭菌蛋白组( $P < 0.05$ ), 饲料蛋白源对血清中谷草转氨酶、谷丙转氨酶、甘油三酯、总胆固醇和葡萄糖水平影响不显著( $P > 0.05$ )。饲料蛋白源和养殖密度对试验草鱼增重率、肝体比、谷丙转氨酶、碱性磷酸酶、甘油三酯、总胆固醇和葡萄糖的交互作用显著( $P < 0.05$ )。以蛋白质效率和增重率为评价指标, 草鱼对5种蛋白源的利用能力为乙醇梭菌蛋白=小球藻=棉籽浓缩蛋白=豆粕>黄粉虫。

**关键词:** 非粮蛋白源; 养殖密度; 生长性能; 体成分; 血清生化指标; 草鱼

中图分类号: S965.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)02-0217-10



水产养殖为我国居民提供了优质的动物性蛋白, 满足了食品多样化的需求但离膳食指南推荐差距较大<sup>[1]</sup>。联合国粮农组织FAO计算出, 17%的动物源蛋白来自水产养殖, 预计到2025年需要增加水产饲料 $3.7 \times 10^7$  kg, 到2030年水产养殖产量达 $1 \times 10^8$  kg<sup>[2, 3]</sup>。随着国家“大食物观”向江河湖海要食物战略的提出, 且水产养殖每生产1 kg干物质消耗的饲料仅为畜禽蛋奶类的1/2—1/5, 发展水产养殖可

在增加水产动物性蛋白供给的同时, 降低粮食资源的消耗<sup>[4]</sup>。我国非粮蛋白质饲料资源丰富, 种类繁多, 包括动物性蛋白源、植物性蛋白源、藻类及其加工产品、微生物蛋白资源、糟渣类产品及其副产品等<sup>[5]</sup>。加快饲料粮替代原料营养价值评价与应用, 可降低水产饲料对粮食类饲料资源的需求。

草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)是我国产量最大的淡水养殖品种, 年产量达到 $5.5 \times 10^9$  kg<sup>[6]</sup>。豆粕

收稿日期: 2022-06-29; 修订日期: 2022-09-02

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0900200); 大学生创新创业项目(X202112309013)资助 [Supported by the National Key R & D Program “Blue Granary Technology Innovation” Key Projects (2019YFD0900200); Innovation and Entrepreneurship Project for College Students (X202112309013)]

作者简介: 董立学(1996—), 男, 研究实习员; 主要从事水产营养与饲料研究。E-mail: dlx@yfi.ac.cn

通信作者: 蒋明, E-mail: jiangming@yfi.ac.cn

是草鱼饲料中的一种主要蛋白饲料原料,然而近年来,豆粕价格上涨幅度较大,且主要依赖进口,因此亟须开展替代豆粕的新型蛋白资源的开发和利用。乙醇梭菌蛋白是发酵制备乙醇过程中生产的一种绿色环保的单细胞蛋白源<sup>[7]</sup>。黄粉虫作为一种优质的昆虫蛋白源,富含蛋白质和亚油酸,在动物饲料中的应用历史悠久<sup>[8]</sup>。小球藻属普生性单细胞绿藻,其生长速度快、蛋白质含量高,在食品和饲料等方面具有广泛的应用<sup>[9]</sup>。棉籽浓缩蛋白经脱酚去除了棉酚等有害物质,在水产饲料中可替代或与鱼粉、豆粕搭配使用<sup>[10]</sup>。已有研究表明,乙醇梭菌蛋白、黄粉虫、棉籽浓缩蛋白和小球藻等可作为水产饲料蛋白源,并具有一定的应用潜力<sup>[11-14]</sup>。

养殖密度是影响鱼类生长、摄食和饲料利用效率的重要因素。养殖密度过低,会导致饲料利用率和生产效益降低;养殖密度过高,鱼类竞争饲料和空间,产生应激等方面的胁迫,导致鱼类生长缓慢甚至死亡<sup>[15]</sup>。有研究表明,养殖密度和饲料蛋白质水平对鱼类的生长性能具有一定的影响<sup>[16, 17]</sup>。草鱼是典型的草食性鱼类,也是良好的鱼类营养与饲料研究对象。因此,本试验以草鱼为研究对象,分别以豆粕、乙醇梭菌蛋白、黄粉虫、棉籽浓缩蛋白和小球藻为单一蛋白源配制五种试验饲料,研究在0.11、0.16和0.21 kg/m<sup>3</sup>三种养殖密度下对草鱼生长性能、体成分和血清生化指标的影响,旨在为豆粕、乙醇梭菌蛋白、黄粉虫、棉籽浓缩蛋白和小球藻在水产饲料中的合理应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验饲料的设计与配制

分别以豆粕、乙醇梭菌蛋白、黄粉虫、棉籽浓缩蛋白和小球藻为单一蛋白源,玉米淀粉和木薯淀粉为糖源,鱼油和豆油为脂肪源,配制5种等氮等能饲料。试验饲料的配方和基本营养成分及必需氨基酸见表1。饲料原料经粉碎通过60目的试验筛,按表1配比混合均匀,少量的组分采用逐级扩大法混合,加鱼油、豆油和水后混匀,用膨化机制成直径1.0 mm的膨化颗粒饲料。试验饲料由中国农业科学院饲料研究所饲料创新团队制作。试验饲料的水分、粗蛋白、粗脂肪、灰分及氨基酸分别按照GB/T 6435-2006、GB/T 6435-2006、GB/T 6435-2006、GB/T 6435-2006及GB/T 18246-2019的方法测定。

### 1.2 试验鱼与饲养管理

试验用草鱼购买自洪湖市一草鱼苗种养殖户,试验地点为长江水产研究所山坡养殖实验基地(武

汉市江夏区山坡乡和尚桥村)。试验鱼运回后,先放入池塘网箱中暂养4周,使草鱼恢复体质适应池塘养殖环境。采用双因素实验设计,2个因素分别为饲料蛋白源和养殖密度,其中饲料蛋白源为豆粕、乙醇梭菌蛋白、黄粉虫、棉籽浓缩蛋白和小球藻,初始养殖密度为0.11、0.16和0.21 kg/m<sup>3</sup>(对应为20、30和40尾/网箱),共15个试验组,每组设3个重复。正式试验开始前,将草鱼饥饿24h,选取1350尾[初始体质量为(5.36±0.18) g]规格均一、体表健康的草鱼,随机分配到45个试验网箱(1.0 m×1.0 m×1.5 m)。每个网箱中设一圆形悬浮框,下挂圆形网盘,饲料投至浮框内,每天(8:00和17:00)投喂两次,投喂量为鱼体总质量的3%,持续60d。记录每天试验鱼摄食及死亡情况,每20天称体质量一次,根据体质量变化调整投喂量。

养殖期间,每个网箱用1个曝气头进行连续曝气。水下30 cm的温度为25—30℃,pH 6.5—7.2,溶氧大于3 mg/L,氨氮浓度小于0.05 mg/L。该池塘水面面积约为7000 m<sup>2</sup>,水深3 m,池塘中间设3 kW叶轮式增氧机一台,试验期间,晴天中午1点和凌晨4点,各开机2h。阴雨天气,定时检测溶氧,当溶氧低于3 mg/L时,开机增氧。

### 1.3 样品采集

在养殖试验结束时,所有试验鱼饥饿24h。然后称量每个网箱中试验鱼的最终体质量并计数存活的个体数。每个养殖箱中,随机挑选3尾草鱼测量其体长和体质量,然后置于-20℃冰箱中保存,测定全鱼的基本营养成分。每个网箱中另取3尾鱼用75 mg/L MS 222麻醉,尾静脉采血样4 mL,常温下保存2h后离心10min(960 g, eppendorf 5417R)分离血清。随后将此3尾鱼进行解剖,将内脏(包括肝脏)与肝脏进行分离称重,计算肝体比(Hepatosomatic index, HSI)与脏体比(Viscerosomatic index, VSI)。草鱼的饲养、处理和取样均按照中国水产科学院长江水产研究所动物福利委员会批准的动物饲养规范进行。

### 1.4 实验指标测定与计算

用真空冷冻干燥机对全鱼样品进行冷冻干燥(Christ Beta 2-4 LD plus LT; Marin Christ Corporation, 德国),测定水分。经凯氏定氮自动分析仪(Kjelflex K-360; BUCHI Labortechnik AG, 瑞士)测定粗蛋白(GB/T 5009.5-2016);采用索氏提取法(GB/T 5009.6-2016)测定粗脂肪;采用550℃马弗炉灼烧法测定灰分(GB/T 5009.4-2016)。血清生物化学参数:碱性磷酸酶(ALP)、谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、血清白蛋白(ALB)、甘油三酯(TG)、

总蛋白(TP)、总胆固醇(T-CHO)和葡萄糖(GLU)用全自动生化分析仪(BX-3010, SYSMEX, 日本)测定。

根据以下公式, 计算增重率(Weight gain rate, WGR)、特定生长率(Specific growth rate, SGR)、饲料系数(Feed conversion ratio, FCR)、蛋白质效率

(Protein efficiency rate, PER)、成活率(Survival rate, SR)、肥满度(Condition factor, CF)、肝体比(Hepatosomatic index, HSI)和脏体比(Viscerosomatic index, VSI)。

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

表 1 试验饲料组成及营养成分

Tab. 1 Composition and nutritional composition of experimental feed (%)

| 原料Ingredient                                                            | 豆粕SM  | 乙醇梭菌蛋白CAP | 黄粉虫TM | 棉籽浓缩蛋白CPC | 小球藻CH |
|-------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| 豆粕SM                                                                    | 65.10 | 0         | 0     | 0         | 0     |
| 乙醇梭菌蛋白CPA                                                               | 0     | 35.70     | 0     | 0         | 0     |
| 黄粉虫TM                                                                   | 0     | 0         | 46.20 | 0         | 0     |
| 棉籽浓缩蛋白CPC                                                               | 0     | 0         | 0     | 48.80     | 0     |
| 小球藻CH                                                                   | 0     | 0         | 0     | 0         | 52.20 |
| 木薯淀粉Cassava starch                                                      | 7.40  | 21.80     | 17.50 | 15.80     | 16.30 |
| 玉米淀粉Corn starch                                                         | 7.40  | 21.80     | 17.50 | 15.80     | 16.20 |
| 鱼油Fish oil                                                              | 2.20  | 2.40      | 1.90  | 1.90      | 0.20  |
| 豆油Soybean oil                                                           | 3.20  | 3.60      | 2.40  | 3.00      | 0.40  |
| 预混料 Premix                                                              | 1.00  | 1.00      | 1.00  | 1.00      | 1.00  |
| 维生素C Vitamin C                                                          | 0.20  | 0.20      | 0.20  | 0.20      | 0.20  |
| 氯化胆碱Choline chloride                                                    | 0.50  | 0.50      | 0.50  | 0.50      | 0.50  |
| 磷酸二氢钙Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O | 3.00  | 3.00      | 3.00  | 3.00      | 3.00  |
| 微晶纤维素Microcrystalline cellulose                                         | 8.00  | 8.00      | 8.00  | 8.00      | 8.00  |
| 羧基纤维素钠Sodium carboxycellulose                                           | 2.00  | 2.00      | 2.00  | 2.00      | 2.00  |
| 营养成分Nutrient                                                            |       |           |       |           |       |
| 粗蛋白Crude protein                                                        | 29.37 | 30.34     | 30.89 | 29.96     | 29.55 |
| 粗脂肪Crude lipid                                                          | 5.59  | 5.72      | 5.69  | 5.51      | 5.45  |
| 水分Moisture                                                              | 6.61  | 6.62      | 7.52  | 6.90      | 6.32  |
| 灰分Ash                                                                   | 9.40  | 4.25      | 5.75  | 6.45      | 5.45  |
| 必需氨基酸 Essential amino acid                                              |       |           |       |           |       |
| 精氨酸Arg                                                                  | 1.64  | 0.91      | 1.29  | 3.61      | 1.26  |
| 组氨酸His                                                                  | 0.59  | 0.36      | 0.24  | 0.61      | 0.41  |
| 异亮氨酸Ile                                                                 | 1.00  | 1.55      | 0.90  | 0.65      | 0.83  |
| 亮氨酸Leu                                                                  | 1.69  | 1.87      | 1.74  | 1.19      | 2.06  |
| 赖氨酸Lys                                                                  | 2.45  | 3.41      | 2.81  | 1.48      | 1.86  |
| 蛋氨酸Met                                                                  | 0.19  | 0.49      | 0.33  | 0.17      | 0.42  |
| 苯丙氨酸Phe                                                                 | 1.25  | 1.01      | 1.14  | 1.34      | 1.22  |
| 苏氨酸Thr                                                                  | 1.06  | 2.03      | 1.02  | 0.81      | 1.35  |
| 缬氨酸Val                                                                  | 1.45  | 2.37      | 2.31  | 1.32      | 2.02  |
| 必需氨基酸总量Total essential amino acids                                      | 11.32 | 14.00     | 11.78 | 11.18     | 11.43 |

注: 预混料: 1. 每千克预混料中含有150 g维生素预混料: VC磷酸酯60 g; VE 30 g; 肌醇15 g; 烟酰胺8 g; 泛酸钙4 g; VA 2 g; VK<sub>3</sub> 2 g; VB<sub>2</sub> 1.5 g; VB<sub>6</sub> 1.5 g; VD<sub>3</sub> 1 g; VB<sub>1</sub> 1 g; 叶酸1 g; VB<sub>12</sub> 0.8 g; 生物素0.2 g; 次粉22 g。2. 每千克预混料中含有每100 g矿物质预混料: 沸石粉36.2 g; FeSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 30 g; ZeSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 20 g; NaCl 10 g; MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 2.5 g; CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O(10%Co)0.5 g; Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>(10%Se)0.5 g; 碘酸钾(2.9%)0.3 g; 3. 每千克预混料中含有硫酸镁90 g; 复合抗氧化剂5 g; 防霉剂20 g; 氧化胆碱400 g; 沸石粉235 g。SM. 豆粕; CAP. 乙醇梭菌蛋白; TM. 黄粉虫; CPC. 棉籽浓缩蛋白; CH. 小球藻

Note: Premix (g/kg): 1. Each kilogram of premix contains 150 g vitamin premix: VC phosphate 60 g; VE 30 g; Inositol 15 g; Ammonium nicotinate 8 g; Calcium pantothenate 4 g; VA 2 g; VK<sub>3</sub> 2 g; VB<sub>2</sub> 1.5 g; VB<sub>6</sub> 1.5 g; VD<sub>3</sub> 1 g; VB<sub>1</sub> 1 g; Folic acid 1 g; VB<sub>12</sub> 0.8 g; Biotin 0.2 g; Wheat flour 22 g; Wheat flour 22 g. 2. Each kilogram of premix contains 100 g mineral premix: Zeolite powder 36.2 g; FeSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 30 g; ZeSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 20 g; NaCl 10 g; MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 2.5 g; CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O (10%Co) 0.5 g; Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> (10%Se) 0.5 g; Potassium iodate (2.9%) 0.3 g; 3. Each kilogram of premix contains Magnesium sulfate 90 g; Compound antioxidant 5 g; Fungicide 20 g; Choline oxide 400 g; Zeolite powder 235 g. SM. Soybean meal; CAP. *Clostridium autoethanogenum* protein; TM. *Tenebrio molito*; CPC. Cottonseed protein concentrated; CH. *Chlorella*

特定增长率(SGR, %/d)=[ $\ln(W_t/N_t)-\ln(W_0/N_0)$ ] $\times$  100/ $t$

饲料系数(FCR)= $F/(W_t-W_0)\times 100$

蛋白质效率(PER, %)=( $W_t-W_0$ )/ $F\times P$

成活率(SR, %)= $N_t/N_0\times 100$

肥满度(CF, g/cm<sup>3</sup>)= $W/L^3\times 100$

肝体比(HSI)= $W_h/W\times 100$

脏体比(VSI)= $W_v/W\times 100$

式中,  $N_0$ 为初始鱼尾数,  $N_t$ 为终末鱼尾数;  $W_0$ 为初始鱼平均体质量(g),  $W_t$ 为终末鱼平均体质量(g);  $W$ 为每尾鱼个体质量(g);  $t$ 为养殖时间(d);  $F$ 为饲料摄入总质量(g);  $P$ 为饲料中粗蛋白质含量(%),  $W_h$ 为肝脏质量(g),  $W_v$ 为内脏质量(g),  $L$ 为体长(cm)。

### 1.5 数据分析

采用SPSS 19.0进行统计分析(SPSS, Chicago IL USA)。数据以3次重复的平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ SD,  $n=3$ )表示。采用双因素方差分析(Two-way ANOVA), 当差异显著时( $P<0.05$ )采用 Tukey检验进行多重比较, 当两个因素有交互作用时, 则固定一个因素, 对另一个因素进行Tukey多重比较。

## 2 结果

### 2.1 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼生长性能的影响

如表2所示, 草鱼成活率为85.00%—92.50%, 各组之间无显著差异( $P>0.05$ )。随着养殖密度的增加, 饲料系数(FCR)呈增加趋势, 特定增长率(SGR)、增重率(WGR)和蛋白质效率(PER)呈降低趋势。在3种养殖密度下, 黄粉虫组FCR均显著高于其他蛋白源组( $P<0.05$ ), FBW、SGR、WGR和PER均显著低于其他蛋白源组( $P<0.05$ )。当养殖密度为0.11 kg/m<sup>3</sup>时, 乙醇梭菌蛋白组SGR和WGR最高, 棉籽浓缩蛋白组PER最高; 当养殖密度为0.16 kg/m<sup>3</sup>时, 乙醇梭菌蛋白组SGR和WGR最高, 豆粕组PER最高; 当养殖密度为0.21 kg/m<sup>3</sup>时, 黄粉虫组SGR和PER均最低, WGR显著低于其他试验组( $P<0.05$ )。不考虑养殖密度, 黄粉虫组FCR最高, SGR、WGR和PER效率均为最低, 而其他四组蛋白源之间差异不显著( $P>0.05$ )。不考虑蛋白源, 0.21 kg/m<sup>3</sup>密度组FCR最高, SGR、WGR和PER均为最低; 0.11 kg/m<sup>3</sup>密度组WGR显著高于其他密度组( $P<0.05$ )。饲料蛋白源和养殖密度对草鱼WGR的交互作用显著( $P<0.05$ )。

饲料蛋白源对草鱼的肝体比(HSI)和脏体比(VSI)无显著影响( $P>0.05$ ), 黄粉虫组草鱼末体质量(FBW)低于其他蛋白源组; 黄粉虫组草鱼肥满度(CF)与棉籽浓缩蛋白组无显著差异( $P>0.05$ ), 均显著低于豆粕组、乙醇梭菌蛋白组和小球藻组( $P<$

0.05)。养殖密度对草鱼的VSI和CF无显著影响( $P>0.05$ ), 0.21 kg/m<sup>3</sup>组草鱼FBW和HSI显著低于其他密度组, 0.11 kg/m<sup>3</sup>草鱼HSI显著高于其他密度组( $P<0.05$ )。饲料蛋白源和养殖密度对草鱼HSI的交互作用显著( $P<0.05$ )。养殖密度为0.21 kg/m<sup>3</sup>时, 黄粉虫组草鱼FBW和HSI最低; 养殖密度为0.16 kg/m<sup>3</sup>时, 棉籽浓缩蛋白组草鱼CF最低。

### 2.2 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼体成分的影响

如表3所示, 饲料蛋白源对草鱼全鱼水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量无显著影响( $P>0.05$ )。养殖密度对草鱼全鱼水分、粗蛋白和灰分含量无显著影响( $P>0.05$ ), 而0.21 kg/m<sup>3</sup>组粗脂肪含量显著低于0.11和0.16 kg/m<sup>3</sup>组( $P<0.05$ )。养殖密度为0.16 kg/m<sup>3</sup>时, 乙醇梭菌蛋白组灰分含量最高, 黄粉虫组灰分含量最低, 乙醇梭菌蛋白组粗脂肪含量最高; 养殖密度为0.11 kg/m<sup>3</sup>时, 黄粉虫组粗蛋白含量最低; 养殖密度为0.21 kg/m<sup>3</sup>时, 黄粉虫组粗脂肪最低, 豆粕组粗蛋白含量最高。饲料蛋白源和养殖密度对草鱼全鱼水分、粗蛋白和粗脂肪含量交互作用不显著( $P>0.05$ ), 对灰分含量交互作用显著( $P<0.05$ )。

### 2.3 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼血清生化指标的影响

如表4所示, 经过8周的生长试验, 饲料蛋白源对草鱼血清中谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、总蛋白(TP)、甘油三酯(TG)、总胆固醇(T-CHO)和葡萄糖(GLU)的水平无显著影响( $P>0.05$ ), 小球藻组血清白蛋白(ALB)的水平显著高于乙醇梭菌蛋白组、黄粉虫组和棉籽浓缩蛋白组( $P<0.05$ ); 黄粉虫组碱性磷酸酶(ALP)的水平显著高于乙醇梭菌蛋白组( $P<0.05$ ), 与豆粕组、乙醇梭菌蛋白组和小球藻组无显著差异( $P>0.05$ )。养殖密度为对草鱼血清中TP、ALB、ALP、TG、T-CHO和GLU的水平无显著影响( $P>0.05$ ), 0.21 kg/m<sup>3</sup>组AST、ALT和GLU水平显著高于其他两组( $P<0.05$ ), 0.11 kg/m<sup>3</sup>组ALT的水平显著低于其它两组( $P<0.05$ )。随着养殖密度的增加, 黄粉虫组草鱼血清AST、ALT和TG的水平呈增加趋势, 而TP、ALP和T-CHO的水平呈降低趋势; 豆粕组TP、ALB、AST、ALT和ALP的水平均呈增加趋势; 乙醇梭菌蛋白组、棉籽浓缩蛋白组和小球藻组AST的水平均呈增加趋势。饲料蛋白源和养殖密度对草鱼血清中ALT、ALP、TG、T-CHO和GLU水平的交互作用显著( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼生长性能的影响

养殖鱼类的特定增长率和增重率是评价其生



长性能的重要指标<sup>[16]</sup>。有研究指出, 鱼类养殖密度存在一定的阈值, 当养殖密度超过阈值时, 鱼类的生长性能开始下降<sup>[18]</sup>。在团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)<sup>[19]</sup>、红罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*×*O. niloticus*)<sup>[20]</sup>、中华鲟幼鱼(*Acipenser sinensis*)<sup>[21]</sup>、黄鳢(*Monopterus albus*)<sup>[22]</sup>等的研究中发现鱼类生长性能随着养殖密度增加而下降。在本研究中, 不考虑饲料蛋白源, 高密度组(0.21 kg/m<sup>3</sup>)草鱼的特定生长率、增重率和肝体比显著低于低密度组(0.11 kg/m<sup>3</sup>)和中密度组(0.16 kg/m<sup>3</sup>), 在高养

殖密度条件下, 草鱼的生长受到了抑制, 可能是因为草鱼摄食与活动空间受到了限制, 密度造成的拥挤胁迫影响了鱼体的生长<sup>[23]</sup>。肝体比、脏体比和肥满度可以反映鱼类对饲料中营养物质的吸收状态, 营养素和能量摄入的增加通常会导致鱼类肝体比的上升, 养殖密度与鱼体肝体比呈负相关<sup>[24]</sup>。随着养殖密度的增加, 鱼体脂肪可能被消耗以供能, 导致肝脏中脂肪蓄积量下降, 肝体比降低。

饲料中必需氨基酸的组成平衡性越好, 鱼类对蛋白质的利用效率越高<sup>[25]</sup>。本研究中, 5种蛋白源

表 2 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼生长性能的影响

Tab. 2 Effects of different dietary protein source and stocking density on growth performance of grass carp (mean±SD, n=3)

| 养殖密度<br>Density<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 蛋白源<br>Protein source | 初体质量<br>IBW (g) | 末体质量<br>FBW (g)            | 成活率<br>SR (%) | 饲料系数<br>FCR              | 特定生长率<br>SGR (%/d)        | 增重率<br>WGR (%)               | 蛋白质效率<br>PER (%)         | 肝体比<br>HSI                | 脏体比<br>VSI | 肥满度<br>CF (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|---------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------|--------------------------------|
| 0.11                                    | 豆粕SM                  | 5.32±0.13       | 18.44±0.83 <sup>def</sup>  | 86.67±5.77    | 1.09±0.06 <sup>a</sup>   | 2.22±0.05 <sup>bcd</sup>  | 246.60±9.56 <sup>efgh</sup>  | 3.06±0.17 <sup>d</sup>   | 9.66±0.10 <sup>gh</sup>   | 2.05±0.16  | 2.05±0.04 <sup>b</sup>         |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 5.19±0.09       | 18.57±0.26 <sup>ef</sup>   | 85.00±5.00    | 1.11±0.09 <sup>a</sup>   | 2.28±0.06 <sup>cd</sup>   | 257.63±11.04 <sup>efgh</sup> | 3.01±0.24 <sup>d</sup>   | 9.20±0.49 <sup>efgh</sup> | 2.00±0.09  | 2.02±0.04 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 5.21±0.24       | 15.27±0.86 <sup>bc</sup>   | 91.67±5.77    | 1.48±0.13 <sup>cd</sup>  | 1.96±0.21 <sup>abcd</sup> | 208.47±6.32 <sup>bcde</sup>  | 2.27±0.19 <sup>ab</sup>  | 9.73±0.49 <sup>h</sup>    | 2.08±0.10  | 1.99±0.03 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 5.31±0.07       | 19.02±1.32 <sup>ef</sup>   | 86.67±2.89    | 1.05±0.08 <sup>a</sup>   | 2.28±0.13 <sup>cd</sup>   | 273.54±2.03 <sup>gh</sup>    | 3.18±0.23 <sup>d</sup>   | 9.65±0.06 <sup>gh</sup>   | 2.01±0.08  | 2.03±0.02 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 小球藻CH                 | 5.31±0.14       | 19.59±1.07 <sup>f</sup>    | 88.33±5.77    | 1.04±0.11 <sup>a</sup>   | 2.33±0.14 <sup>d</sup>    | 284.80±17.24 <sup>h</sup>    | 3.04±0.18 <sup>d</sup>   | 9.29±0.31 <sup>fgh</sup>  | 2.06±0.12  | 2.05±0.02 <sup>b</sup>         |
|                                         | 豆粕SM                  | 5.39±0.20       | 18.49±0.79 <sup>ef</sup>   | 90.00±5.77    | 1.10±0.09 <sup>a</sup>   | 2.20±0.14 <sup>bcd</sup>  | 229.16±12.17 <sup>def</sup>  | 3.05±0.25 <sup>d</sup>   | 8.31±0.54 <sup>bcd</sup>  | 2.03±0.10  | 2.03±0.05 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 5.56±0.19       | 18.73±0.12 <sup>ef</sup>   | 90.00±6.67    | 1.10±0.07 <sup>a</sup>   | 2.33±0.27 <sup>d</sup>    | 239.55±17.97 <sup>efg</sup>  | 3.03±0.19 <sup>d</sup>   | 8.54±0.26 <sup>cdef</sup> | 1.94±0.14  | 1.98±0.04 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 5.31±0.25       | 14.42±0.52 <sup>ab</sup>   | 92.22±3.85    | 1.41±0.07 <sup>bc</sup>  | 1.79±0.10 <sup>ab</sup>   | 172.20±15.64 <sup>b</sup>    | 2.36±0.12 <sup>abc</sup> | 8.53±0.04 <sup>bcd</sup>  | 1.99±0.11  | 1.92±0.02 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 5.30±0.31       | 15.40±2.42 <sup>bcd</sup>  | 93.33±3.33    | 1.15±0.09 <sup>ab</sup>  | 1.89±0.38 <sup>abcd</sup> | 225.86±10.80 <sup>def</sup>  | 2.91±0.22 <sup>cd</sup>  | 8.74±0.47 <sup>defg</sup> | 2.09±0.14  | 1.92±0.01 <sup>a</sup>         |
|                                         | 小球藻CH                 | 5.58±0.12       | 17.83±0.26 <sup>cdef</sup> | 86.68±3.33    | 1.15±0.05 <sup>ab</sup>  | 2.07±0.04 <sup>bcd</sup>  | 219.50±6.62 <sup>cdef</sup>  | 2.91±0.11 <sup>cd</sup>  | 8.28±0.17 <sup>bcd</sup>  | 2.09±0.04  | 2.05±0.08 <sup>ab</sup>        |
| 0.21                                    | 豆粕SM                  | 5.49±0.10       | 16.11±0.40 <sup>bcd</sup>  | 92.50±6.61    | 1.27±0.08 <sup>abc</sup> | 1.92±0.07 <sup>abcd</sup> | 193.63±12.21 <sup>bcd</sup>  | 2.64±0.15 <sup>bcd</sup> | 7.60±0.03 <sup>ab</sup>   | 1.95±0.13  | 2.03±0.06 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 5.48±0.12       | 15.17±1.22 <sup>bc</sup>   | 89.17±1.44    | 1.26±0.14 <sup>abc</sup> | 1.82±0.18 <sup>abc</sup>  | 192.78±10.67 <sup>bcd</sup>  | 2.66±0.30 <sup>bcd</sup> | 7.74±0.16 <sup>abc</sup>  | 1.98±0.16  | 2.04±0.04 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 5.27±0.08       | 11.99±0.56 <sup>a</sup>    | 87.50±2.50    | 1.72±0.15 <sup>d</sup>   | 1.47±0.08 <sup>a</sup>    | 127.60±9.92 <sup>a</sup>     | 1.95±0.17 <sup>a</sup>   | 7.07±0.25 <sup>a</sup>    | 1.93±0.05  | 1.96±0.05 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 5.33±0.07       | 15.43±1.03 <sup>bc</sup>   | 93.33±2.89    | 1.20±0.01 <sup>abc</sup> | 1.83±0.10 <sup>abcd</sup> | 189.11±16.18 <sup>bc</sup>   | 2.79±0.03 <sup>bcd</sup> | 7.63±0.06 <sup>abc</sup>  | 2.00±0.26  | 2.02±0.03 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 小球藻CH                 | 5.35±0.11       | 16.44±0.15 <sup>bcd</sup>  | 92.50±0.00    | 1.13±0.03 <sup>ab</sup>  | 2.00±0.03 <sup>bcd</sup>  | 207.30±4.50 <sup>bcd</sup>   | 2.94±0.08 <sup>cd</sup>  | 7.94±0.40 <sup>abcd</sup> | 2.09±0.18  | 2.06±0.02 <sup>b</sup>         |
|                                         | 豆粕SM                  | 5.27±0.13       | 18.18±1.75 <sup>b</sup>    | 87.67±4.95    | 1.13±0.17 <sup>a</sup>   | 2.20±0.18 <sup>b</sup>    | 253.86±26.59 <sup>a</sup>    | 2.95±0.35 <sup>b</sup>   | 9.51±0.37 <sup>c</sup>    | 2.04±0.10  | 2.03±0.04                      |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 5.43±0.23       | 16.85±2.07 <sup>b</sup>    | 90.44±4.69    | 1.19±0.14 <sup>ab</sup>  | 2.06±0.28 <sup>b</sup>    | 213.69±27.87 <sup>b</sup>    | 2.83±0.31 <sup>ab</sup>  | 8.48±0.34 <sup>b</sup>    | 2.03±0.11  | 1.99±0.06                      |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 5.38±0.12       | 15.03±1.77 <sup>a</sup>    | 91.00±3.76    | 1.33±0.24 <sup>b</sup>   | 1.82±0.21 <sup>a</sup>    | 181.32±31.32 <sup>c</sup>    | 2.58±0.40 <sup>a</sup>   | 7.60±0.35 <sup>a</sup>    | 1.99±0.16  | 2.02±0.05                      |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 5.40±0.15       | 17.68±1.32 <sup>b</sup>    | 89.72±5.83    | 1.15±0.11 <sup>a</sup>   | 2.11±0.17 <sup>b</sup>    | 222.38±26.62 <sup>b</sup>    | 2.92±0.27 <sup>b</sup>   | 8.52±0.95                 | 2.01±0.12  | 2.04±0.05 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 小球藻CH                 | 5.41±0.21       | 17.33±1.91 <sup>b</sup>    | 88.06±4.82    | 1.15±0.11 <sup>a</sup>   | 2.14±0.30 <sup>b</sup>    | 233.93±31.13 <sup>b</sup>    | 2.91±0.27 <sup>b</sup>   | 8.49±0.69                 | 1.97±0.12  | 2.01±0.04 <sup>ab</sup>        |
| 0.16                                    | 豆粕SM                  | 5.26±0.18       | 13.90±1.58 <sup>a</sup>    | 90.46±4.31    | 1.54±0.18 <sup>b</sup>   | 1.72±0.23 <sup>a</sup>    | 164.54±35.57 <sup>a</sup>    | 2.18±0.24 <sup>a</sup>   | 8.44±1.19                 | 2.00±0.10  | 1.98±0.03 <sup>a</sup>         |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 5.31±0.16       | 16.62±2.33 <sup>b</sup>    | 91.11±4.25    | 1.12±0.09 <sup>a</sup>   | 2.02±0.28 <sup>ab</sup>   | 223.73±39.18 <sup>b</sup>    | 2.99±0.24 <sup>b</sup>   | 8.67±0.91                 | 2.03±0.16  | 1.99±0.05 <sup>a</sup>         |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 5.41±0.17       | 17.95±1.48 <sup>b</sup>    | 89.17±4.23    | 1.11±0.08 <sup>a</sup>   | 2.14±0.17 <sup>b</sup>    | 231.25±34.42 <sup>b</sup>    | 2.96±0.11 <sup>b</sup>   | 8.50±0.66                 | 2.08±0.11  | 2.05±0.04 <sup>b</sup>         |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 5.40±0.15       | 17.68±1.32 <sup>b</sup>    | 89.72±5.83    | 1.15±0.11 <sup>a</sup>   | 2.11±0.17 <sup>b</sup>    | 222.38±26.62 <sup>b</sup>    | 2.92±0.27 <sup>b</sup>   | 8.52±0.95                 | 2.01±0.12  | 2.04±0.05 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 小球藻CH                 | 5.41±0.21       | 17.33±1.91 <sup>b</sup>    | 88.06±4.82    | 1.15±0.11 <sup>a</sup>   | 2.14±0.30 <sup>b</sup>    | 233.93±31.13 <sup>b</sup>    | 2.91±0.27 <sup>b</sup>   | 8.49±0.69                 | 1.97±0.12  | 2.01±0.04 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 豆粕SM                  | 5.26±0.18       | 13.90±1.58 <sup>a</sup>    | 90.46±4.31    | 1.54±0.18 <sup>b</sup>   | 1.72±0.23 <sup>a</sup>    | 164.54±35.57 <sup>a</sup>    | 2.18±0.24 <sup>a</sup>   | 8.44±1.19                 | 2.00±0.10  | 1.98±0.03 <sup>a</sup>         |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 5.31±0.16       | 16.62±2.33 <sup>b</sup>    | 91.11±4.25    | 1.12±0.09 <sup>a</sup>   | 2.02±0.28 <sup>ab</sup>   | 223.73±39.18 <sup>b</sup>    | 2.99±0.24 <sup>b</sup>   | 8.67±0.91                 | 2.03±0.16  | 1.99±0.05 <sup>a</sup>         |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 5.41±0.17       | 17.95±1.48 <sup>b</sup>    | 89.17±4.23    | 1.11±0.08 <sup>a</sup>   | 2.14±0.17 <sup>b</sup>    | 231.25±34.42 <sup>b</sup>    | 2.96±0.11 <sup>b</sup>   | 8.50±0.66                 | 2.08±0.11  | 2.05±0.04 <sup>b</sup>         |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 5.40±0.15       | 17.68±1.32 <sup>b</sup>    | 89.72±5.83    | 1.15±0.11 <sup>a</sup>   | 2.11±0.17 <sup>b</sup>    | 222.38±26.62 <sup>b</sup>    | 2.92±0.27 <sup>b</sup>   | 8.52±0.95                 | 2.01±0.12  | 2.04±0.05 <sup>ab</sup>        |
|                                         | 小球藻CH                 | 5.41±0.21       | 17.33±1.91 <sup>b</sup>    | 88.06±4.82    | 1.15±0.11 <sup>a</sup>   | 2.14±0.30 <sup>b</sup>    | 233.93±31.13 <sup>b</sup>    | 2.91±0.27 <sup>b</sup>   | 8.49±0.69                 | 1.97±0.12  | 2.01±0.04 <sup>ab</sup>        |
| 双因素方差分析P值                               |                       |                 |                            |               |                          |                           |                              |                          |                           |            |                                |
| 养殖密度Density                             |                       |                 | 0.000                      | 0.106         | 0.031                    | 0.000                     | 0.000                        | 0.033                    | 0.000                     | 0.567      | 0.091                          |
| 蛋白源Protein source                       |                       |                 | 0.000                      | 0.693         | 0.000                    | 0.002                     | 0.001                        | 0.000                    | 0.987                     | 0.469      | 0.008                          |
| 交互作用 Interaction                        |                       |                 | 0.067                      | 0.388         | 0.257                    | 0.157                     | 0.042                        | 0.462                    | 0.022                     | 0.925      | 0.252                          |

饲料氨基酸组成具有一定的差异,精氨酸、异亮氨酸和蛋氨酸含量普遍较低,且含有抗营养因子,这可能是导致试验组草增重率普遍不高的原因。将蛋白源组与组之间进行比较,黄粉虫组草鱼生长性能最差,蛋白质效率最低。除去氨基酸组成不平衡

表 3 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼基本营养成分的影响

Tab. 3 Effects of different dietary protein source and stocking density on basic nutrients of grass carp (% , mean $\pm$ SD,  $n=3$ )

| 养殖密度<br>Density<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 蛋白源<br>Protein<br>source | 水分<br>Moisture      | 粗蛋白<br>Crude<br>protein | 粗脂肪<br>Crude<br>lipid           | 灰分<br>Crude<br>ash               |
|-----------------------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 0.11                                    | 豆粕SM                     | 77.97 $\pm$<br>0.65 | 15.39 $\pm$<br>0.85     | 3.54 $\pm$<br>0.15              | 3.39 $\pm$<br>0.13 <sup>ab</sup> |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP                | 77.21 $\pm$<br>0.94 | 15.21 $\pm$<br>0.56     | 3.45 $\pm$<br>0.42              | 3.45 $\pm$<br>0.16 <sup>ab</sup> |
|                                         | 黄粉虫TM                    | 78.62 $\pm$<br>0.69 | 14.38 $\pm$<br>0.29     | 3.36 $\pm$<br>0.05              | 3.33 $\pm$<br>0.16 <sup>b</sup>  |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC                | 76.05 $\pm$<br>1.84 | 15.36 $\pm$<br>0.87     | 3.63 $\pm$<br>0.30              | 3.31 $\pm$<br>0.09 <sup>b</sup>  |
|                                         | 小球藻CH                    | 77.53 $\pm$<br>0.94 | 15.67 $\pm$<br>0.15     | 3.27 $\pm$<br>0.17              | 3.50 $\pm$<br>0.07 <sup>ab</sup> |
|                                         | 豆粕SM                     | 76.49 $\pm$<br>3.37 | 15.98 $\pm$<br>1.94     | 3.50 $\pm$<br>0.33              | 3.48 $\pm$<br>0.39 <sup>ab</sup> |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP                | 74.39 $\pm$<br>1.64 | 16.36 $\pm$<br>1.64     | 3.72 $\pm$<br>0.36              | 4.06 $\pm$<br>0.32 <sup>a</sup>  |
|                                         | 黄粉虫TM                    | 77.80 $\pm$<br>0.90 | 16.22 $\pm$<br>1.59     | 3.35 $\pm$<br>0.19              | 3.26 $\pm$<br>0.12 <sup>ab</sup> |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC                | 75.71 $\pm$<br>1.31 | 15.94 $\pm$<br>1.33     | 3.42 $\pm$<br>0.27              | 3.43 $\pm$<br>0.20 <sup>ab</sup> |
|                                         | 小球藻CH                    | 76.50 $\pm$<br>3.20 | 16.02 $\pm$<br>1.30     | 3.22 $\pm$<br>0.18              | 3.29 $\pm$<br>0.21 <sup>b</sup>  |
| 0.16                                    | 豆粕SM                     | 74.73 $\pm$<br>1.99 | 16.79 $\pm$<br>1.77     | 3.11 $\pm$<br>0.16              | 3.49 $\pm$<br>0.17 <sup>ab</sup> |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP                | 75.99 $\pm$<br>0.81 | 16.17 $\pm$<br>1.38     | 3.17 $\pm$<br>0.32              | 3.28 $\pm$<br>0.28 <sup>b</sup>  |
|                                         | 黄粉虫TM                    | 76.06 $\pm$<br>2.26 | 15.07 $\pm$<br>0.57     | 3.04 $\pm$<br>0.50              | 3.47 $\pm$<br>0.18 <sup>ab</sup> |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC                | 75.78 $\pm$<br>1.26 | 16.16 $\pm$<br>1.19     | 3.22 $\pm$<br>0.27              | 3.53 $\pm$<br>0.43 <sup>ab</sup> |
|                                         | 小球藻CH                    | 77.87 $\pm$<br>0.93 | 15.22 $\pm$<br>0.31     | 3.16 $\pm$<br>0.10              | 3.39 $\pm$<br>0.26 <sup>ab</sup> |
|                                         | 豆粕SM                     | 77.47 $\pm$<br>1.28 | 15.20 $\pm$<br>0.90     | 3.45 $\pm$<br>0.25 <sup>a</sup> | 3.40 $\pm$<br>0.13               |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP                | 76.18 $\pm$<br>2.27 | 16.10 $\pm$<br>1.34     | 3.44 $\pm$<br>0.29 <sup>a</sup> | 3.50 $\pm$<br>0.38               |
|                                         | 黄粉虫TM                    | 76.09 $\pm$<br>1.68 | 15.88 $\pm$<br>1.19     | 3.14 $\pm$<br>0.26 <sup>b</sup> | 3.43 $\pm$<br>0.25               |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC                | 76.40 $\pm$<br>2.43 | 16.05 $\pm$<br>1.51     | 3.38 $\pm$<br>0.29              | 3.46 $\pm$<br>0.23               |
|                                         | 小球藻CH                    | 75.86 $\pm$<br>1.60 | 15.91 $\pm$<br>1.23     | 3.45 $\pm$<br>0.39              | 3.60 $\pm$<br>0.42               |
| 0.21                                    | 豆粕SM                     | 77.49 $\pm$<br>1.70 | 15.22 $\pm$<br>1.18     | 3.25 $\pm$<br>0.31              | 3.35 $\pm$<br>0.16               |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP                | 75.85 $\pm$<br>1.30 | 15.82 $\pm$<br>1.05     | 3.43 $\pm$<br>0.30              | 3.42 $\pm$<br>0.26               |
|                                         | 黄粉虫TM                    | 77.30 $\pm$<br>1.84 | 15.63 $\pm$<br>1.08     | 3.21 $\pm$<br>0.14              | 3.40 $\pm$<br>0.19               |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC                | 77.30 $\pm$<br>1.84 | 15.63 $\pm$<br>1.08     | 3.21 $\pm$<br>0.14              | 3.40 $\pm$<br>0.19               |
|                                         | 小球藻CH                    | 77.30 $\pm$<br>1.84 | 15.63 $\pm$<br>1.08     | 3.21 $\pm$<br>0.14              | 3.40 $\pm$<br>0.19               |
|                                         | 豆粕SM                     | 76.40 $\pm$<br>2.43 | 16.05 $\pm$<br>1.51     | 3.38 $\pm$<br>0.29              | 3.46 $\pm$<br>0.23               |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP                | 75.86 $\pm$<br>1.60 | 15.91 $\pm$<br>1.23     | 3.45 $\pm$<br>0.39              | 3.60 $\pm$<br>0.42               |
|                                         | 黄粉虫TM                    | 77.49 $\pm$<br>1.70 | 15.22 $\pm$<br>1.18     | 3.25 $\pm$<br>0.31              | 3.35 $\pm$<br>0.16               |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC                | 75.85 $\pm$<br>1.30 | 15.82 $\pm$<br>1.05     | 3.43 $\pm$<br>0.30              | 3.42 $\pm$<br>0.26               |
|                                         | 小球藻CH                    | 77.30 $\pm$<br>1.84 | 15.63 $\pm$<br>1.08     | 3.21 $\pm$<br>0.14              | 3.40 $\pm$<br>0.19               |
| 双因素方差分析P值                               |                          |                     |                         |                                 |                                  |
| 养殖密度Density                             |                          | 0.072               | 0.098                   | 0.004                           | 0.557                            |
| 蛋白源Protein source                       |                          | 0.176               | 0.648                   | 0.354                           | 0.380                            |
| 交互作用 Interaction                        |                          | 0.482               | 0.873                   | 0.834                           | 0.030                            |

注: 同行数据上标不同表示组间存在显著差异( $P<0.05$ ); 下同

Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ( $P<0.05$ ); the same applies below

之外,黄粉虫适口性差也是导致生长缓慢的原因之一。研究表明,黄粉虫替代鱼粉比例超过60%会导致黑雕幼鱼(*Acanthopagrus schlegelii*)摄食量下降<sup>[26]</sup>;除黄粉虫组外,其他蛋白源组生长性能较为接近,乙醇梭菌蛋白组特定生长率和增重率最高,棉籽浓缩蛋白组蛋白质效率最高,小球藻组鱼体肥满度最高。这表明乙醇梭菌蛋白、棉籽浓缩蛋白和小球藻作为单一蛋白源在草鱼饲料中与豆粕具有相近的饲料价值。

在本研究中,饲料蛋白源和养殖密度对草鱼的增重率存在显著的交互作用。除小球藻外,各蛋白源组密度为0.11 kg/m<sup>3</sup>的草鱼生长性能均优于密度为0.21 kg/m<sup>3</sup>的,说明降低养殖密度,在一定程度上能够提高草鱼对豆粕、乙醇梭菌蛋白、黄粉虫和棉籽浓缩蛋白的利用效率。Timalsina等<sup>[17]</sup>研究发现养殖密度和饲料蛋白源组成对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的增重率和特定生长率无显著影响,这与本研究的结果不同,可能是由于该研究中的养殖密度并未达到对鱼类的生长产生不利影响的程度。

### 3.2 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼体成分的影响

营养成分是评价养殖鱼类肌肉品质的重要指标,其往往受到养殖环境和饲料种类等因素的影响<sup>[28]</sup>。鱼类对营养物质吸收利用能力不同,饲料组分的差异可能会导致鱼体蛋白质和脂肪含量产生变化<sup>[29]</sup>。研究表明,在饲料中使用乙醇梭菌蛋白替代豆粕或棉籽蛋白替代鱼粉,对草鱼全鱼粗灰分、粗蛋白质和粗脂肪含量无显著影响<sup>[30, 31]</sup>。本研究与以上结果相似,以豆粕、乙醇梭菌蛋白、黄粉虫、棉籽浓缩蛋白和小球藻为蛋白源,对草鱼全鱼水分、粗蛋白质和粗脂肪含量未产生影响;当养殖密度升高到0.21 kg/m<sup>3</sup>时,草鱼粗脂肪含量显著下降。密度是一种重要的环境因子,高密度的养殖模式下鱼类会出现拥挤胁迫,导致能量消耗增加,不利于营养物质的积累<sup>[32]</sup>。随着养殖密度的增加,养殖鱼类个体间竞争加剧,易引起应激反应,导致运动耗能增加<sup>[33]</sup>。脂肪作为生物体内储能和供能的重要物质,在高养殖密度下,鱼类会通过甘油三酯的分解给机体供能<sup>[34]</sup>,这可能是导致鱼体粗脂肪含量下降的原因。

本研究中发现,饲料蛋白源和养殖密度对草鱼全鱼粗蛋白和粗脂肪含量不存在显著的交互作用,类似的结果在黄金鲮(*Notemigonus crysoleucas*)<sup>[35]</sup>和虹鳟<sup>[17]</sup>等养殖密度和饲料蛋白质水平的研究中也发现。

### 3.3 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼血清生化指标的影响

高密度养殖环境造成的拥挤胁迫会引起鱼体

的应激反应, 导致血清生化指标发生变化<sup>[36]</sup>。谷草转氨酶和谷丙转氨酶是反映肝脏功能的重要生理代谢酶, 参与机体氨基酸和乳酸的代谢, 其主要存在于肝细胞内, 当肝细胞受损时, 转氨酶便会释放到血液里, 使血清中转氨酶活性升高。葡萄糖是机体生命活动的主要能量来源, 在一定范围内, 血糖的升高能增强机体抗逆能力, 提高免疫力<sup>[37]</sup>。在本研究中, 随着养殖密度的增加, 草鱼血清中谷草转氨酶、谷丙转氨酶和葡萄糖的水平增加, 这与团头鲂<sup>[38]</sup>、褐牙鲢(*Paralichthys olivaceus*)<sup>[39]</sup>和大口

黑鲈(*Micropterus salmoides*)<sup>[40]</sup>等养殖密度的研究结果相似。研究结果表明, 养殖密度的增加, 可能导致草鱼肝脏器官受到损害, 因此血清中谷草转氨酶和谷丙转氨酶的水平升高。同时, 应激状态下的机体能耗增加, 促进了糖原分解来满足能量的需求, 导致血清葡萄糖含量升高<sup>[41]</sup>。

血清白蛋白主要在肝脏中合成, 具有维持血浆胶体渗透压和运输代谢产物的功能; 碱性磷酸酶是一种重要的非特异性免疫酶, 机体肝脏受到损伤时其活性升高<sup>[42]</sup>。在本研究中, 小球藻组血清白蛋白

表 4 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼血清生化指标的影响

Tab. 4 Effects of different dietary protein source and stocking density on serum biochemical indexes of grass carp (mean±SD, n=3)

| 养殖密度<br>Density<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 蛋白源<br>Protein source | 总蛋白<br>TP<br>(g/L) | 白蛋白<br>ALB<br>(g/L)      | 谷草转氨酶<br>AST<br>(U/L)    | 谷丙转氨酶<br>ALT<br>(U/L)      | 碱性磷酸酶<br>ALP<br>(U/L)    | 甘油三酯<br>TG<br>(mmol/L)     | 总胆固醇<br>T-CHO<br>(mmol/L) | 葡萄糖<br>GLU<br>(mmol/L)  |
|-----------------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 0.11                                    | 豆粕SM                  | 28.70±1.04         | 9.14±0.33 <sup>a</sup>   | 34.00±2.00 <sup>a</sup>  | 14.50±1.50 <sup>a</sup>    | 65.50±4.50 <sup>ab</sup> | 2.66±0.21 <sup>abcd</sup>  | 5.06±0.33 <sup>abc</sup>  | 5.70±0.54 <sup>ab</sup> |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 27.60±1.39         | 9.09±0.78 <sup>a</sup>   | 29.00±2.00 <sup>a</sup>  | 16.50±1.50 <sup>ab</sup>   | 66.00±4.00 <sup>ab</sup> | 2.86±0.02 <sup>bcdef</sup> | 4.67±0.15 <sup>ab</sup>   | 5.87±0.49 <sup>ab</sup> |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 30.30±1.15         | 9.26±0.48 <sup>a</sup>   | 31.50±0.50 <sup>a</sup>  | 16.50±0.50 <sup>ab</sup>   | 70.50±2.50 <sup>ab</sup> | 2.48±0.02 <sup>ab</sup>    | 5.91±0.41 <sup>c</sup>    | 5.73±0.11 <sup>ab</sup> |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 29.99±2.19         | 9.27±0.55 <sup>ab</sup>  | 39.33±2.08 <sup>a</sup>  | 15.33±3.21 <sup>a</sup>    | 68.50±4.50 <sup>ab</sup> | 3.11±0.11 <sup>cdef</sup>  | 5.27±0.44 <sup>abc</sup>  | 6.42±0.09 <sup>ab</sup> |
|                                         | 小球藻CH                 | 30.41±1.60         | 10.17±0.80 <sup>ab</sup> | 40.00±2.00 <sup>a</sup>  | 16.50±1.50 <sup>ab</sup>   | 62.50±1.50 <sup>ab</sup> | 3.29±0.00 <sup>cf</sup>    | 4.73±0.26 <sup>ab</sup>   | 6.09±0.30 <sup>ab</sup> |
|                                         | 豆粕SM                  | 27.66±1.70         | 9.91±0.26 <sup>ab</sup>  | 38.50±1.50 <sup>a</sup>  | 17.50±0.50 <sup>abc</sup>  | 66.67±2.52 <sup>ab</sup> | 3.46±0.20 <sup>f</sup>     | 5.60±0.45 <sup>bc</sup>   | 5.38±0.09 <sup>a</sup>  |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 29.60±1.99         | 8.90±0.23 <sup>a</sup>   | 35.67±9.07 <sup>a</sup>  | 15.50±1.50 <sup>a</sup>    | 65.50±1.50 <sup>ab</sup> | 3.34±0.04 <sup>cf</sup>    | 4.72±0.43 <sup>ab</sup>   | 5.33±0.32 <sup>a</sup>  |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 25.50±2.11         | 8.55±0.73 <sup>a</sup>   | 43.00±0.00 <sup>a</sup>  | 23.50±1.50 <sup>abcd</sup> | 77.00±1.00 <sup>a</sup>  | 2.57±0.06 <sup>abc</sup>   | 4.70±0.20 <sup>ab</sup>   | 6.67±0.03 <sup>ab</sup> |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 26.16±1.98         | 8.84±0.51 <sup>a</sup>   | 43.50±1.50 <sup>a</sup>  | 25.50±3.50 <sup>bcd</sup>  | 75.00±0.00 <sup>a</sup>  | 3.22±0.03 <sup>def</sup>   | 4.44±0.25 <sup>ab</sup>   | 5.97±0.33 <sup>ab</sup> |
|                                         | 小球藻CH                 | 28.53±2.31         | 9.99±0.59 <sup>ab</sup>  | 42.00±5.00 <sup>a</sup>  | 21.50±1.50 <sup>abcd</sup> | 71.50±3.50 <sup>a</sup>  | 2.45±0.13 <sup>ab</sup>    | 4.53±0.33 <sup>ab</sup>   | 5.26±0.30 <sup>a</sup>  |
| 0.21                                    | 豆粕SM                  | 29.69±0.05         | 10.16±0.01 <sup>ab</sup> | 76.00±3.00 <sup>bc</sup> | 29.50±0.50 <sup>d</sup>    | 69.50±3.50 <sup>ab</sup> | 2.41±0.13 <sup>ab</sup>    | 4.95±0.12 <sup>abc</sup>  | 6.40±0.25 <sup>ab</sup> |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 27.63±0.95         | 9.16±0.41 <sup>a</sup>   | 66.50±1.50 <sup>bc</sup> | 30.00±1.00 <sup>d</sup>    | 54.00±3.00 <sup>b</sup>  | 2.72±0.01 <sup>abcde</sup> | 4.78±0.38 <sup>abc</sup>  | 7.00±0.05 <sup>b</sup>  |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 26.42±2.83         | 8.45±0.93 <sup>a</sup>   | 61.00±6.00 <sup>b</sup>  | 26.00±1.00 <sup>bcd</sup>  | 73.50±3.50 <sup>a</sup>  | 3.31±0.08 <sup>cf</sup>    | 4.30±0.56 <sup>a</sup>    | 6.13±0.24 <sup>ab</sup> |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 29.21±2.65         | 9.28±0.62 <sup>a</sup>   | 74.00±3.00 <sup>bc</sup> | 26.50±1.50 <sup>cd</sup>   | 69.50±5.50 <sup>ab</sup> | 2.21±0.11 <sup>a</sup>     | 4.74±0.07 <sup>ab</sup>   | 6.56±0.12 <sup>ab</sup> |
|                                         | 小球藻CH                 | 30.64±4.47         | 11.50±0.77 <sup>b</sup>  | 78.68±1.53 <sup>c</sup>  | 25.50±2.50 <sup>bcd</sup>  | 75.00±2.00 <sup>f</sup>  | 3.22±0.18 <sup>def</sup>   | 5.27±0.20 <sup>abc</sup>  | 7.13±0.23 <sup>b</sup>  |
|                                         | 豆粕SM                  | 29.40±1.71         | 9.48±0.67                | 35.18±4.72 <sup>a</sup>  | 15.82±1.79 <sup>a</sup>    | 66.60±4.15               | 2.88±0.33                  | 5.13±0.54                 | 5.96±0.41 <sup>a</sup>  |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 27.56±2.32         | 9.26±0.75                | 40.09±5.06 <sup>a</sup>  | 20.70±4.18 <sup>b</sup>    | 71.13±4.98               | 3.00±0.44                  | 4.80±0.52                 | 5.72±0.58 <sup>a</sup>  |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 28.73±2.75         | 9.59±1.21                | 71.91±7.35 <sup>b</sup>  | 27.50±2.30 <sup>c</sup>    | 68.30±8.34               | 2.77±0.46                  | 4.76±0.42                 | 6.64±0.42 <sup>b</sup>  |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             | 28.79±1.24         | 9.74±0.51 <sup>ab</sup>  | 49.50±20.07              | 20.50±6.92                 | 67.22±3.59 <sup>ab</sup> | 2.84±0.50                  | 5.20±0.42                 | 5.83±0.54               |
|                                         | 小球藻CH                 | 28.36±1.64         | 9.06±0.47 <sup>a</sup>   | 42.57±17.95              | 20.67±7.11                 | 61.83±6.43 <sup>b</sup>  | 2.97±0.30                  | 4.72±0.30                 | 6.07±0.79               |
| 0.21                                    | 豆粕SM                  | 27.41±2.88         | 8.75±0.74 <sup>a</sup>   | 45.17±13.22              | 22.00±4.37                 | 73.67±3.58 <sup>a</sup>  | 2.79±0.40                  | 4.97±0.81                 | 6.17±0.43               |
|                                         | 乙醇梭菌蛋白CAP             | 28.45±2.65         | 9.28±0.62 <sup>a</sup>   | 50.43±16.51              | 21.43±5.90                 | 71.00±4.67 <sup>ab</sup> | 2.84±0.49                  | 4.83±0.44                 | 6.31±0.32               |
|                                         | 黄粉虫TM                 | 29.86±2.82         | 10.44±0.95 <sup>b</sup>  | 57.14±19.06              | 21.17±4.24                 | 69.67±5.98 <sup>ab</sup> | 2.99±0.42                  | 4.84±0.40                 | 6.18±0.82               |
|                                         | 棉籽浓缩蛋白CPC             |                    |                          |                          |                            |                          |                            |                           |                         |
|                                         | 小球藻CH                 |                    |                          |                          |                            |                          |                            |                           |                         |
|                                         | 双因素方差分析P值             |                    |                          |                          |                            |                          |                            |                           |                         |
|                                         | 养殖密度Density           | 0.107              | 0.652                    | 0.000                    | 0.000                      | 0.665                    | 0.480                      | 0.130                     | 0.001                   |
|                                         | 蛋白源Protein source     | 0.326              | 0.000                    | 0.623                    | 0.993                      | 0.025                    | 0.915                      | 0.319                     | 0.776                   |
|                                         | 交互作用Interaction       | 0.221              | 0.133                    | 0.199                    | 0.016                      | 0.005                    | 0.000                      | 0.001                     | 0.017                   |



的水平最高,乙醇梭菌蛋白组碱性磷酸酶的水平最低,而黄粉虫组草鱼血清白蛋白的水平最低而碱性磷酸酶的水平最高。有研究表明,随着饲料中黄粉虫比例的增加,罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)血清碱性磷酸酶的水平增加<sup>[43]</sup>。这可能是由于黄粉虫组草鱼肝脏受到损伤,使得碱性磷酸酶水平升高,同时肝脏功能异常导致蛋白合成能力下降,因此血清白蛋白水平降低。血糖和血脂是反映机体能量代谢的重要指标<sup>[16]</sup>。在本研究中,与中密度( $0.16 \text{ kg/m}^3$ )相比,高密度( $0.21 \text{ kg/m}^3$ )下黄粉虫组和小球藻组草鱼血清甘油三酯水平升高,乙醇梭菌蛋白组和小球藻组血清葡萄糖水平升高,这表明高密度胁迫可能导致了鱼类脂肪和葡萄糖代谢增加,以满足机体对能量的需求。

#### 4 结论

综上所述,在本试验条件下,养殖草鱼幼鱼( $5.36 \pm 0.18$ ) g的密度达到 $0.21 \text{ kg/m}^3$ 时,饲料效率显著降低,血清生化指标发生变化,生长受到抑制。乙醇梭菌蛋白、棉籽浓缩蛋白和小球藻作为单一蛋白源在草鱼饲料中与之豆粕具有相近的饲料价值。以蛋白质效率和增重率为评价指标,草鱼对5种蛋白源的利用能力为乙醇梭菌蛋白=小球藻=棉籽浓缩蛋白>豆粕>黄粉虫。

#### 参考文献:

- [1] Li A J. Aquatic Animal Nutrition and Feed Science [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996: 1-2. [李爱杰. 水产动物营养与饲料学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 1-2.]
- [2] Hua K, Cobcroft J M, Cole A, et al. The future of aquatic protein: implications for protein sources in aquaculture-diets [J]. *One Earth*, 2019, **1**(3): 316-329.
- [3] Boyd C E, McNevin A A, Davis R P. The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply [J]. *Food Security*, 2022, **14**(3): 805-827.
- [4] Bondad-Reantaso M G, Subasinghe R P, Josupeit H, et al. The role of crustacean fisheries and aquaculture in global food security: Past, present and future [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2012, **110**(2): 158-165.
- [5] Mai K S, Zhang W B. Development Status and Efficient Utilization Strategy of Feed Resources in Non-Grain Protein [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2019: 1-8. [麦康森, 张文兵. 非粮型蛋白质饲料资源开发现状与高效利用策略 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 1-8.]
- [6] National Technology System Conventional Freshwater Fish Industry. Development report of grass carp industry [J]. *China Fisheries*, 2021(2): 26-37. [国家大宗淡水鱼产业技术体系. 草鱼产业发展报告 [J]. 中国水产, 2021(2): 26-37.]
- [7] Zhu S, Gao W, Wen Z, et al. Partial substitution of fish meal by *Clostridium autoethanogenum* protein in the diets of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(22): 100938.
- [8] Ren S, Yu H, Chu Y X, et al. Effect of *Tenebrio molitor* replacing fish meal on blood and liver biochemical indexes of koi carp [J]. *Feed Research*, 2021, **44**(18): 53-57. [任顺, 于宏, 初宇轩, 等. 黄粉虫代替鱼粉对锦鲤血浆及肝脏生化指标的影响 [J]. 饲料研究, 2021, **44**(18): 53-57.]
- [9] Xu W, Gao Z, Qi Z, et al. Effect of dietary *Chlorella* on the growth performance and physiological parameters of gibel carp, *Carassius auratus gibelio* [J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2014, **14**(1): 53-57.
- [10] Xue M. Processing of cottonseed protein concentrated and its nutrient values in aquatic feed [J]. *Feed Industry*, 2021, **42**(12): 1-5. [薛敏. 棉籽浓缩蛋白加工工艺及其在水产饲料中营养价值 [J]. 饲料工业, 2021, **42**(12): 1-5.]
- [11] Maulu S, Hualiang L, Ke J, et al. Dietary *Clostridium autoethanogenum* protein modulates intestinal absorption, antioxidant status, and immune response in GIFT (*Oreochromis niloticus*) juveniles [J]. *Aquaculture Research*, 2021, **52**(11): 5787-5799.
- [12] Gu J, Liang H, Ge X, et al. A study of the potential effect of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) substitution for fish meal on growth, immune and antioxidant capacity in juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022(120): 214-221.
- [13] El-Habashi N, Fadl S E, Farag H F, et al. Effect of using *Spirulina* and *Chlorella* as feed additives for elevating immunity status of Nile tilapia experimentally infected with *Aeromonas hydrophila* [J]. *Aquaculture Research*, 2019, **50**(10): 2769-2781.
- [14] Li W, Wu H, Zhang L, et al. Effects of replacing soybean meal protein with cottonseed protein concentrate on the growth condition and intestinal health of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, **27**(6): 2436-2447.
- [15] James T, Alisdair B, Colin A, et al. Stocking density and welfare of cage farmed Atlantic salmon: application of a multivariate analysis [J]. *Aquaculture*, 2004, **243**(1): 121-132.
- [16] Zhang X, Liang M Q, Wei Y L, et al. Effects of dietary protein content and stocking density on growth performance, nitrogen excretion, and relevant biochemical parameters of juvenile *Takifugu rubripes* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, **42**(1): 74-83. [张晓, 梁萌青, 卫育良, 等. 饲料中蛋白质含量及养殖密度对红鳍东方鲀幼鱼生长性能、氮排泄及相关生化指标的影响 [J]. 渔业科学进展, 2021, **42**(1): 74-83.]
- [17] Timalisina P, Yadav C N R, Lamsal G P, et al. Effect of stocking density and source of animal protein on growth and survival of rainbow trout fingerlings in flow-through system at Nuwakot, Nepal [J]. *Aquaculture Reports*, 2017(8): 58-64.
- [18] Chen J. Effect of stocking density on lipid accumulation and the expression level of genes related to lipid metabolism in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [D].



- Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017: 1-6. [陈洁. 养殖密度对草鱼脂肪蓄积、脂肪代谢及相关基因表达的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017: 1-6.]
- [19] Yadata G W, Ji K, Liang H, *et al.* Effects of dietary protein levels with various stocking density on growth performance, whole body composition, plasma parameters, nitrogen emission and gene expression related to TOR signaling of juvenile blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. *Aquaculture*, 2020(519): 734730-734730.
- [20] Daudpota A M, Kalhor I B, Shah S A, *et al.* Effect of stocking densities on growth, production and survival rate of red tilapia in hapa at fish hatchery Chilya Thatta, Sindh, Pakistan [J]. *Journal of Fisheries*, 2014, **2**(3): 180-186.
- [21] Long L, Zhang H, Ni Q, *et al.* Effects of stocking density on growth, stress, and immune responses of juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) in a recirculating aquaculture system [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2019(219): 25-34.
- [22] Yuan H, Chen F, Xu Q, *et al.* Effects of different stocking densities on growth, serum steroid hormone concentrations, gonadosomatic index and sex reversal in the rice field eel, *Monopterus albus* (Zuiew) [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011(142): 233-237.
- [23] Li D P, Zhuang P, Yan A S, *et al.* The influences of illumination, water current and stocking density on feeding, behavior and growth in juveniles *Acipenser schrenckii* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, **28**(1): 54-61. [李大鹏, 庄平, 严安生, 等. 光照、水流和养殖密度对史氏鲟稚鱼摄食、行为和生长的影响 [J]. 水产学报, 2004, **28**(1): 54-61.]
- [24] Aliyu-Paiko M, Hashim R. Effects of substituting dietary fish oil with crude palm oil and palm fatty acid distillate on growth, muscle fatty acid composition and the activities of hepatic lipogenic enzymes in snakehead (*Channa striatus*, Bloch 1793) fingerling [J]. *Aquaculture Research*, 2012, **43**(5): 767-776.
- [25] Prabu E, Felix N, Uma A. Optimizing amino acid balance in fish meal-free diets for GIFT strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) by deletion method [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, **27**(4): 1031-1041.
- [26] Jeong S M, Khosravi S, Kim K W, *et al.* Potential of mealworm, *Tenebrio molitor*, meal as a sustainable dietary protein source for juvenile black porgy, *Acanthopagrus schlegelii* [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(22): 100956.
- [27] Shi X, Luo Z, Huang C, *et al.* Effect of substituting *Chlorella* sp. for regular fishmeal on growth, body composition, hepatic lipid metabolism and histology in crucian carp *Carassius auratus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(3): 498-506. [石西, 罗智, 黄超, 等. 小球藻替代鱼粉对鲫生长、体组成、肝脏脂肪代谢及其组织学的影响 [J]. 水生生物学报, 2015, **39**(3): 498-506.]
- [28] Zhao H H. The effects of stocking density and feeding models on muscle quality and metabolic regulations of grass carp, *Ctenopharyngodon idellus* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019: 1-5. [赵鸿昊. 养殖密度和投喂模式对草鱼肌肉品质和代谢调控的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 1-5.]
- [29] Pohlenz C, Buentello A, Criscitiello M F, *et al.* Synergies between vaccination and dietary arginine and glutamine supplementation improve the immune response of channel catfish against *Edwardsiella ictaluri* [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2012, **33**(3): 543-551.
- [30] Wei H C, Yu H H, Chen X M, *et al.* Effects of soybean meal replaced by *Clostridium autoethanogenum* protein on growth performance, plasma biochemical indexes and hepatopancreas and intestinal histopathology of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, **30**(10): 4190-4201. [魏洪城, 郁欢欢, 陈晓明, 等. 乙醇梭菌蛋白替代豆粕对草鱼生长性能、血浆生化指标及肝胆脏和肠道组织病理的影响 [J]. 动物营养学报, 2018, **30**(10): 4190-4201.]
- [31] Liu H, Yan Q, Han D, *et al.* Effect of dietary inclusion of cottonseed meal on growth performance and physiological and immune responses in juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018: anu.12867.
- [32] Jia R, Liu B, Han C, *et al.* Influence of stocking density on growth performance, antioxidant status, and physiological response of juvenile turbot, *Scophthalmus maximus*, reared in land-based recirculating aquaculture system [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2016, **47**(4): 587-599.
- [33] Ni J J. Effects of stocking density on growth and physiology of micropterus salmoides reared in in-pond raceway culture systems [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020: 6-9. [倪金金. 池塘工程化循环水养殖模式下养殖密度对大口黑鲈生长与生理机能的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 6-9.]
- [34] Zhang H E, He Y Y, Li J, *et al.* Effects of different stocking densities on the growth and energy metabolism of *Fenneropenaeus chinensis* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, **42**(05): 70-76. [张海恩, 何玉英, 李健, 等. 不同养殖密度对中国明对虾生长和能量代谢的影响 [J]. 渔业科学进展, 2021, **42**(05): 70-76.]
- [35] Lochmann R T, Phillips H, Weldon D, *et al.* Effects of dietary protein and fish density on performance and production economics of Golden Shiners in pools [J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2014, **76**(2): 130-137.
- [36] Refaey M M, Li D, Tian X, *et al.* High stocking density alters growth performance, blood biochemistry, intestinal histology, and muscle quality of channel catfish *Ictalurus punctatus* [J]. *Aquaculture*, 2018(492): 73-81.
- [37] Wei Y Q, Xu Y Q, Wei Y Y, *et al.* Effect of  $\alpha$ -ketoglutarate supplementation in different protein sources of diets on muscle composition, serum amino acids and biochemical indices of Songpu mirror carp [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015(1): 94-100. [魏玉强, 徐奇友, 位莹莹, 等. 不同蛋白源饲料中添加 $\alpha$ -酮戊二酸对松浦镜鲤肌肉成分、血清氨基酸和生化指标的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2015(1): 94-100.]
- [38] Yanag Z F. Effect of high density stress on Nrf2 pathway and the regulation mechanism of emodin in blunt snout

- bream (*Megalobrama amblycephala*) reared under in-pond raceway conditions [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019: 14-20. [杨震飞. 池塘跑道式养殖系统下密度应激对团头鲂生长、Nrf2通路的影响及大黄提取物的调控研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 14-20.]
- [39] Wang T T. Experiments of flatfish culture using two new-style net cages and effect of farming density on *Paralichthys olivaceus* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016: 34-39. [王腾腾. 两种新型鲆鲽类网箱养殖试验及密度对网箱养殖褐牙鲆的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2016: 34-39.]
- [40] Zhang Q. Study on the effects of stocking density on growth, physiological indexes and muscle quality of *micropterus salmoides* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 28-32. [张奇. 圈养模式下养殖密度对大口黑鲈生长、生理指标以及肌肉品质影响的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 28-32.]
- [41] Ni M, Wen H, Li J, *et al.* The physiological performance and immune responses of juvenile Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*) to stocking density and hypoxia stress [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2014, **36**(2): 325-335.
- [42] Molina R, Moreno I, Pichardo S, *et al.* Acid and alkaline phosphatase activities and pathological changes induced in tilapia fish (*Oreochromis* sp.) exposed subchronically to microcystins from toxic cyanobacterial blooms under laboratory conditions [J]. *Toxicon*, 2005, **46**(7): 725-735.
- [43] Fang P F, He J Z, Lv M, *et al.* Effect of dietary *Tenebrio molitor* protein on growth performance and immunological parameters in *Macrobrachium rosenbergii* [J]. *Aquaculture*, 2019(511): 734247.

## DIETARY PROTEIN SOURCE AND STOCKING DENSITY ON GROWTH PERFORMANCE, BODY COMPOSITION AND SERUM BIOCHEMICAL PARAMETERS OF GRASS CARP (*CTENOPHARYNGODON IDELLA*)

DONG Li-Xue<sup>1</sup>, XIE Shou-Qi<sup>2</sup>, ZHOU Liang<sup>3</sup>, LU Xing<sup>1</sup>, TIAN Juan<sup>1</sup>, YU Li-Juan<sup>1</sup>, WEN Hua<sup>1</sup>,  
XIAO Jiang-Rong<sup>3</sup> and JIANG Ming<sup>1</sup>

(1. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430073, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430064, China; 3. Wuchang Shouyi University, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** The experiment was conducted to investigate the effects of dietary protein source and stocking density on growth performance, body composition and serum biochemical parameters of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). A two-factor orthogonal experiment (3×5) was used to evaluate the effects of soybean meal (SM), *Clostridium autoethanogenum* protein (CAP), *Tenebrio molitor* (TM), cottonseed protein concentrate (CPC) and *Chlorella* (CH) for grass carps with three stocking density. Five isonitrogenous and isoenergetic diets were prepared with the five protein sources as a single protein source, respectively. Grass carps with an initial body weight of (5.36±0.18) g were fed with the five test diets at three stocking density (0.11, 0.16 and 0.21 kg/m<sup>3</sup>) for 60 days in pond cages (1.0 m×1.0 m×1.5 m), respectively. The results showed that the feed coefficient (FCR) increased, and the specific growth rate (SGR), weight gain rate (WGR), protein efficiency (PER) and liver index (HSI) decreased with the increase of stocking density. Under the three stocking densities, FCR in TM group was significantly higher than that of other protein source groups (*P*<0.05), and FBW, SGR, WGR and PER were significantly lower than those in other protein source groups (*P*<0.05). The growth performance of grass carp in the 0.11 and 0.16 kg/m<sup>3</sup> stocking density groups were similar, and were significantly better than that in the 0.21 kg/m<sup>3</sup> stocking density group (*P*<0.05). Protein source and stocking density had no significant effects on the moisture, crude protein and ash content of the whole grass carp (*P*>0.05). The crude fat content of grass carp in the 0.21 kg/m<sup>3</sup> stocking density group was significantly lower than that in other stocking density groups (*P*<0.05), and the serum biochemical indexes of aspartate aminotransferase (AST), alanine aminotransferase (ALT) and glucose (GLU) were significantly higher than those in other stocking density groups (*P*<0.05). Regardless of the stocking density, the serum albumin (ALB) content of the CH group was significantly higher than that in the CAP group, the TM group and the CPC group (*P*<0.05). The alkaline phosphatase activity of TM group was significantly higher than that in the CAP group (*P*<0.05). Based on the protein efficiency and weight gain rate, the ability of grass carp to utilize the five protein sources was CAP=CH=CPC=SM>TM.

**Key words:** Protein source; Stocking density; Growth performance; Body composition; Serum biochemical parameters; *Ctenopharyngodon idella*