

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.15052

## 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷幼鱼生长、体成分、血清生化指标及脂肪代谢酶的影响

黄裕<sup>1,2</sup>, 王际英<sup>2</sup>, 李宝山<sup>2</sup>, 郝甜甜<sup>2,3</sup>, 夏斌<sup>2</sup>, 孙永智<sup>2</sup>, 魏佳丽<sup>1,2</sup>, 王世信<sup>2</sup>, 张利民<sup>2</sup>

1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306;

2. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006;

3. 山东升索渔用饲料研究中心, 山东 烟台 265500

**摘要:** 以初始体重为(3.70±0.01) g 的半滑舌鲷(*Cynolossus semilaevis* Günter)幼鱼为实验对象, 研究小麦胚芽油替代鱼油对其生长、体成分、血清生化指标及脂肪代谢酶的影响。以添加 7.5% 的鱼油组为对照组, 用小麦胚芽油分别替代 0、20%、40%、60%、80%、100% 的鱼油配制成 6 组等氮等能饲料, 在海水循环养殖系统中进行 68 d 的养殖实验。结果显示: 饲料中小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷幼鱼存活率无显著影响; 随着替代水平的升高, 特定生长率和蛋白质效率降低, 饲料系数升高。各组间脏体比、肝体比和肥满度均无显著性差异。肝脂肪含量随替代水平的升高而升高, 而全鱼脂肪含量降低; 80% 和 100% 替代组全鱼水分含量显著高于对照组( $P < 0.05$ )。随着饲料中小麦胚芽油水平的升高, 鱼体组织中亚油酸和亚麻酸含量显著升高( $P < 0.05$ ), EPA 和 DHA 含量显著降低( $P < 0.05$ )。各组间血清谷丙转氨酶、谷草转氨酶、碱性磷酸酶和溶菌酶活性均无显著性差异( $P > 0.05$ ); 80% 和 100% 替代组甘油三酯和总胆固醇含量显著高于对照组( $P < 0.05$ ); 血清丙二醛含量呈降低趋势。随着替代水平的升高, 肝脂蛋白酯酶、肝酯酶、总酯酶、脂肪酸合成酶以及肠道脂肪酶活性升高。研究表明, 在本实验条件下, 小麦胚芽油可替代 60% 的饲料鱼油而不影响半滑舌鲷幼鱼的生长; 小麦胚芽油的添加, 促进了鱼体脂肪代谢, 抑制脂质过氧化作用, 但显著改变了鱼体脂肪酸组成。

**关键词:** 半滑舌鲷; 小麦胚芽油; 鱼油; 生长; 体成分; 血清生化; 脂肪代谢酶

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)06-1195-14

鱼油富含 EPA、DHA 等多不饱和脂肪酸, 是水产动物重要的优质脂肪源。然而, 随着养殖业的快速发展, 鱼油需求量与日俱增, 价格上涨, 使养殖成本不断升高, 寻找鱼油替代品成为当前水产动物营养与饲料学研究领域的热点之一。植物油具有产量高、来源广和价格低等优点, 为鱼油替代的首选。在虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)<sup>[1]</sup>、红罗非鱼(*Oreochromis* sp.)<sup>[2]</sup>、大西洋鲑(*Salmo*

*salar*)<sup>[3]</sup>、金头鲷(*Sparus aurata* L.)<sup>[4]</sup>等鱼类上的研究表明, 植物油可部分或完全替代鱼油。淡水鱼类大多具有将 C<sub>18</sub> 多不饱和脂肪酸转化成高不饱和脂肪酸的能力, 而海水鱼类这种能力很弱甚至不具备这种能力<sup>[5]</sup>。因此, 饲料中添加植物油一般不会显著影响淡水鱼类的生长, 而可能会显著影响海水鱼类的生长<sup>[6]</sup>。

小麦胚芽油是一种谷物胚芽油, 主要成分是

收稿日期: 2015-1-29; 修订日期: 2015-04-16.

基金项目: 国家海洋公益性行业专项(201205025); 国家海洋生物产业-水生动物营养与饲料研发创新示范平台资金(201402002).

作者简介: 黄裕(1988-), 男, 硕士; 研究方向为水产动物营养与饲料. E-mail: 1090462836@qq.com

通信作者: 王际英, 研究员, 硕士研究生导师. E-mail: ytwjy@126.com

油酸、亚油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸及维生素 E、二十八烷醇、磷脂及植物甾醇等多种生理活性组分, 营养价值很高<sup>[7]</sup>。中国是小麦生产和消费大国, 小麦胚芽油资源非常丰富, 近年来小麦胚芽油低温提取技术已经得到突破, 完全实现了工业化生产, 价格较低, 因此, 小麦胚芽油具有很好的应用前景。小麦胚芽油富含维生素 E、二十八烷醇及植物甾醇等多种活性成分, 这是其他植物油所无法比拟的<sup>[8]</sup>。小麦胚芽油主要应用于食品、药品及化妆品等方面, 在饲料上的应用很少, 仅在小鼠<sup>[9]</sup>和东方果蝇<sup>[10]</sup>上有少量研究, 在水产饲料上的未见有报道。半滑舌鲷(*Cynolossus semilaevis* Günther)属鲷形目(Pleuronectiformes), 舌鲷科(Cynoglossidae), 舌鲷属, 俗称牛舌头、鲷米等, 为近海暖温性大型底层鱼类<sup>[11]</sup>。半滑舌鲷具有生长速度快, 肉质鲜美, 适应范围广等特点, 是中国沿海养殖的理想经济鱼类<sup>[12]</sup>。本实验以半滑舌鲷幼鱼为研究对象, 初步探讨小麦胚芽油替代饲料中不同水平鱼油对其生长、体组成、血清生化指标及脂肪代谢酶的影响, 评价小麦胚芽油替代饲料鱼油的可行性及其适宜替代水平, 以期为小麦胚芽油在水产饲料中的应用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

以鱼粉、豆粕为主要蛋白源, 鱼油为主要脂肪源, 配制粗蛋白含量为 53%, 粗脂肪含量为 13%的基础饲料。在此基础上, 用小麦胚芽油分别替代基础饲料中 0、20%、40%、60%、80%、100% 的鱼油, 配制成 6 组等氮等能的实验饲料, 命名为 D0、D20、D40、D60、D80、D100, 饲料配方及营养组成见表 1, 鱼油、小麦胚芽油及各组饲料脂肪酸组成见表 2。饲料原料粉碎过 80 目筛, 按比例称量混匀后加鱼油和小麦胚芽油及适量蒸馏水均匀混合, 制成粒径为 1.5 mm 和 2.0 mm 的颗粒饲料, 阴凉处风干后-20℃冰箱保存备用。

### 1.2 饲养管理和样品采集

养殖实验在山东省海洋资源与环境研究院东营实验基地进行。实验鱼购自山东莱州明波水产

有限公司, 正式实验开始前, 实验鱼在海水循环养殖系统中驯养 2 周后, 选取体质健壮、规格整齐的半滑舌鲷幼鱼[初始体重为(3.70±0.01) g], 随机放养于 18 个圆形塑料养殖桶中(直径 70 cm, 高 80 cm, 水深控制在 50 cm 左右), 每桶 40 尾, 每种饲料随机投饲 3 桶。每天投喂两次(07:30、19:30), 日投喂量为鱼体重的 1%~2%, 据摄食情况调整投喂量, 投喂结束后半小时排残饵, 数颗粒, 计算残饵量。控制水温 19~20℃, 溶氧>6 mg/L, pH 7.6~8.2, 盐度 28~32, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N<0.1 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N<0.1 mg/L。实验周期 68 d。

实验结束后, 鱼体饥饿 24 h。称总重后, 每桶随机取 5 尾用作全鱼常规分析, 另随机取 10 尾鱼称重, 尾静脉取血, 分离内脏、肝、肠道并称重, 取背肌, 样品-20℃保存, 待测。血样 4℃静置 4 h 后, 离心 (4000 r/min, 10 min), 取上清液, -80℃保存待测。

### 1.3 样品分析

饲料及组织样品水分测定采用 105℃烘干恒重法测定(GB/T 6435-2006); 粗蛋白采用杜马斯燃烧定氮法测定(Leco FP528); 粗脂肪采用索氏抽提法测定(GB/T 6433-2006); 粗灰分采用马弗炉 550℃失重法测定(GB/T 6438-2007); 能量采用燃烧法测定(PARR 6100)。

脂肪酸分析中油脂提取参照 Folch 等<sup>[13]</sup>的方法, 脂肪酸测定参照 Metcalfe 等<sup>[14]</sup>的方法并略作改进。样品皂化、甲酯化后, 高效气相色谱仪(GC-2010, Hitachi, Japan)测定脂肪酸含量, 色谱条件参照马晶晶等<sup>[15]</sup>的条件。采用 supelco 37 种脂肪酸甲酯混标(supelco, Bellefonte, PA, USA)识别样品脂肪酸, 各脂肪酸相对含量采用面积归一化法计算。

血清甘油三酯(TG)、总胆固醇(TCHO)、总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、碱性磷酸酶(ALP)采用日立生化分析仪(Hitachi, 7020)测定; 试剂盒购于北京利德曼生化股份有限公司。血清溶菌酶(LZM)、超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA), 脂肪酶(LPS)、总脂酶(脂蛋白酯酶(LPL)和肝酯酶(HL))和总蛋白

测定采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定; 脂肪酸合成酶(FAS)采用上海江莱生物科技有限公司试剂盒测定。

脂肪酶活性单位定义: 在 37℃条件下, 每克组织蛋白在本反应体系中与底物反应 1 min, 每消耗 1 μmol 底物为 1 个酶活单位。脂蛋白酯酶和

肝酯酶活性单位定义: 每 mg 组织蛋白每小时在本反应体系中产生 1 μmol 的游离脂肪酸为 1 个酶活性单位。总酯酶活性为脂蛋白酯酶和肝酯酶活性之和。脂肪酸合成酶活性单位定义: 每毫克组织蛋白每 min 每氧化 1 nmol NADPH 为 1 个酶活单位。

表 1 饲料配方组成及营养水平(风干基础)  
Tab. 1 Composition and nutrient levels of experimental diet (air-dry basis)

| 原料 ingredient                                          | 组别 group |        |        |        |        |        | % |
|--------------------------------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
|                                                        | D0       | D20    | D40    | D60    | D80    | D100   |   |
| 鱼粉 <sup>1)</sup> fish meal <sup>1)</sup>               | 45.00    | 45.00  | 45.00  | 45.00  | 45.00  | 45.00  |   |
| 豆粕 <sup>2)</sup> soybean meal <sup>2)</sup>            | 24.00    | 24.00  | 24.00  | 24.00  | 24.00  | 24.00  |   |
| 谷朊粉 <sup>3)</sup> wheat gluten <sup>3)</sup>           | 7.50     | 7.50   | 7.50   | 7.50   | 7.50   | 7.50   |   |
| α-淀粉 alpha-starch                                      | 8.45     | 8.45   | 8.45   | 8.45   | 8.45   | 8.45   |   |
| 蛋氨酸 methionine                                         | 0.50     | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   |   |
| 磷脂 phospholipids                                       | 1.00     | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   |   |
| 鱼油 fish oil                                            | 7.50     | 6.00   | 4.50   | 3.00   | 1.50   | 0.00   |   |
| 小麦胚芽油 wheat germ oil                                   | 0.00     | 1.50   | 3.00   | 4.50   | 6.00   | 7.50   |   |
| 氯化胆碱 choline chloride                                  | 0.50     | 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> | 1.00     | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   |   |
| 维生素预混料 <sup>4)</sup> vitamin mixture <sup>4)</sup>     | 2.00     | 2.00   | 2.00   | 2.00   | 2.00   | 2.00   |   |
| 矿物质预混料 <sup>5)</sup> mineral mixture <sup>5)</sup>     | 1.00     | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   |   |
| 黏合剂 <sup>6)</sup> binder <sup>6)</sup>                 | 0.50     | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   |   |
| 甜菜碱 betaine                                            | 1.00     | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   |   |
| 抗氧化剂 <sup>7)</sup> antioxidant <sup>7)</sup>           | 0.05     | 0.05   | 0.05   | 0.05   | 0.05   | 0.05   |   |
| 合计 total                                               | 100.00   | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |   |
| 营养水平 nutrient level                                    |          |        |        |        |        |        |   |
| 粗蛋白 crude protein                                      | 52.5     | 52.9   | 52.9   | 52.8   | 52.9   | 53.0   |   |
| 粗脂肪 crude lipid                                        | 12.5     | 13.0   | 12.9   | 12.9   | 12.8   | 12.6   |   |
| 粗灰分 crude ash                                          | 13.4     | 12.9   | 13.0   | 13.0   | 13.0   | 13.0   |   |
| 总能/(kJ·g <sup>-1</sup> ) gorss energy                  | 20.3     | 20.5   | 20.4   | 20.6   | 20.7   | 20.6   |   |

注: 1) 鱼粉: 蛋白 65.35%, 脂肪 7.43%; 2) 豆粕: 蛋白 46.42%, 脂肪 1.43%; 3) 谷朊粉: 蛋白 76.27%, 脂肪 0.84%; 4) 维生素预混料(mg/kg 饲料): VA, 38.0 mg; α-生育酚, 210.0 mg; 肌醇, 4000.0 mg; 硫胺素, 115.5 mg; 核黄素, 380.0 mg; 盐酸吡哆醇, 88.0 mg; VD<sub>3</sub>, 13.3 mg; 泛酸, 365.0 mg; 烟酸, 1030.0 mg; 生物素, 10.0 mg; 叶酸, 20.0 mg; VB<sub>12</sub>, 1.3 mg; 抗坏血酸, 500.0 mg; 5) 矿物质预混料(mg/kg 饲料): NaCl, 100.0 mg; KCl, 3020.0 mg; ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 363.0 mg; C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>Fe·5H<sub>2</sub>O, 1530.0 mg; CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, 8.0 mg; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 3570 mg; MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O, 65.2 mg; KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 11.3 mg; Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>, 2.3 mg; CoCl<sub>2</sub>, 28.0 mg; KI, 7.5mg; NaF, 4.0 mg; NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, 25560.0 mg; 乳酸钙, 15975.0 mg; 6) 黏合剂: 海藻酸钠; 7) 抗氧化剂: 乙氧基喹啉。

Note: 1) Fish meal: protein 65.35%, fat 7.43%; 2) Soybean meal: protein 46.42%, fat 1.43%; 3) Wheat gluten: protein 76.27%, fat 0.84%; 4) Vitamin premix (mg/kg diet): retinol acetate, 38.0 mg; alpha-tocopherol, 210.0 mg; inositol, 4000.0 mg; thiamin, 115.5 mg; riboflavin, 380.0 mg; pyridoxine HCl, 88.0 mg; cholecalciferol, 13.3 mg; pantothenic acid, 365.0 mg; niacin acid, 1030.0 mg; biotin, 10.0 mg; folic acid, 20.0 mg; vitamin B<sub>12</sub>, 1.3 mg; ascorbic acid, 500.0 mg; 5) Mineral premix (mg/kg diet): NaCl, 100.0mg; KCl, 3020.0 mg; ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 363.0 mg; C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>Fe·5H<sub>2</sub>O, 1530.0 mg; CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, 8.0 mg; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 3570 mg; MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O, 65.2 mg; KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 11.3 mg; Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>, 2.3 mg; CoCl<sub>2</sub>, 28.0 mg; KI, 7.5 mg; NaF, 4.0 mg; NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, 25560.0 mg; Ca-lactate, 15975.0 mg; 6) Binder: sodium alginate; 7) Antioxi-dant: ethoxyquin.

表 2 鱼油、小麦胚芽油和饲料脂肪酸组成  
Tab. 2 Fatty acids profile of fish oil, wheat germ oil and diets

| 脂肪酸<br>fatty acid    | 鱼油<br>fish oil | 小麦胚芽油<br>wheat germ oil | 组别 group   |            |            |            |            |            |
|----------------------|----------------|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                      |                |                         | D0         | D20        | D40        | D60        | D80        | D100       |
| C <sub>14:0</sub>    | 8.48±0.15      | —                       | 6.33±0.10  | 5.46±0.12  | 4.56±0.08  | 3.70±0.09  | 2.72±0.05  | 1.90±0.06  |
| C <sub>16:0</sub>    | 24.50±0.27     | 16.11±0.20              | 22.33±0.16 | 21.53±0.14 | 20.73±0.19 | 19.84±0.10 | 19.08±0.15 | 18.28±0.14 |
| C <sub>18:0</sub>    | 4.04±0.08      | 0.79±0.04               | 3.87±0.10  | 3.61±0.12  | 3.25±0.07  | 2.86±0.05  | 2.51±0.09  | 2.16±0.06  |
| ∑ SFA                | 39.63±0.29     | 17.14±0.15              | 34.21±0.14 | 32.02±0.25 | 29.76±0.27 | 27.41±0.18 | 24.98±0.14 | 22.80±0.10 |
| C <sub>16:1n-7</sub> | 7.42±0.10      | 0.14±0.03               | 6.15±0.12  | 5.29±0.10  | 4.56±0.06  | 3.80±0.09  | 2.91±0.04  | 2.15±0.11  |
| C <sub>18:1n-9</sub> | 12.42±0.15     | 13.83±0.06              | 11.00±0.06 | 11.46±0.12 | 11.87±0.10 | 12.18±0.09 | 12.53±0.17 | 12.81±0.13 |
| C <sub>18:1n-7</sub> | 3.46±0.08      | 1.41±0.05               | 2.97±0.09  | 2.81±0.12  | 2.61±0.08  | 2.56±0.10  | 2.26±0.07  | 2.04±0.16  |
| C <sub>20:1n-7</sub> | 3.25±0.09      | 1.12±0.04               | 1.89±0.09  | 1.73±0.11  | 1.56±0.09  | 1.36±0.10  | 1.12±0.08  | 0.91±0.05  |
| C <sub>22:1n-9</sub> | 4.39±0.08      | —                       | 2.33±0.04  | 1.80±0.05  | 1.46±0.09  | 0.89±0.03  | 0.43±0.04  | —          |
| ∑ MUFA               | 30.94±0.18     | 16.50±0.22              | 24.34±0.15 | 23.09±0.10 | 22.06±0.18 | 20.79±0.16 | 19.25±0.12 | 17.91±0.15 |
| C <sub>18:3n-3</sub> | 1.43±0.09      | 4.19±0.10               | 1.73±0.07  | 2.13±0.05  | 2.42±0.03  | 2.87±0.08  | 3.14±0.09  | 3.50±0.04  |
| C <sub>20:3n-3</sub> | 0.18±0.03      | —                       | 0.30±0.05  | 0.12±0.04  | —          | —          | —          | —          |
| EPA                  | 5.85±0.12      | —                       | 9.18±0.17  | 8.07±0.10  | 7.13±0.08  | 6.17±0.12  | 4.93±0.15  | 4.00±0.06  |
| DPA                  | 0.56±0.09      | —                       | 0.95±0.05  | 0.85±0.03  | 0.75±0.05  | 0.71±0.04  | 0.58±0.02  | 0.47±0.03  |
| DHA                  | 8.25±0.12      | —                       | 11.79±0.21 | 10.06±0.15 | 8.54±0.10  | 7.30±0.23  | 5.58±0.17  | 4.11±0.09  |
| C <sub>18:2n-6</sub> | 2.21±0.09      | 60.70±0.27              | 7.94±0.18  | 15.41±0.23 | 21.95±0.16 | 29.28±0.25 | 36.65±0.20 | 43.82±0.18 |
| ARA                  | 0.64±0.06      | —                       | 0.88±0.05  | 0.69±0.09  | 0.59±0.04  | 0.48±0.03  | 0.39±0.02  | 0.29±0.05  |
| ∑ PUFA               | 21.17±0.23     | 64.90±0.35              | 34.96±0.18 | 39.31±0.24 | 43.14±0.27 | 48.20±0.14 | 52.25±0.20 | 56.93±0.24 |
| ∑ n-3PUFA            | 16.27±0.19     | 4.19±0.08               | 23.95±0.27 | 21.23±0.10 | 18.94±0.24 | 17.05±0.21 | 14.23±0.13 | 12.08±0.25 |
| ∑ n-3HUFA            | 14.66±0.18     | —                       | 21.92±0.21 | 18.98±0.19 | 16.42±0.14 | 14.18±0.10 | 11.09±0.09 | 8.58±0.15  |
| ∑ n-6PUFA            | 2.85±0.08      | 60.70±0.36              | 8.82±0.15  | 16.11±0.18 | 22.54±0.10 | 29.76±0.27 | 37.04±0.24 | 44.11±0.20 |
| n-3/n-6              | 5.70±0.12      | 0.07±0.01               | 2.72±0.05  | 1.32±0.06  | 0.84±0.03  | 0.57±0.03  | 0.38±0.04  | 0.27±0.02  |
| EPA/DHA              | 0.71±0.03      | —                       | 0.78±0.01  | 0.80±0.04  | 0.83±0.02  | 0.84±0.04  | 0.88±0.02  | 0.97±0.03  |

注: SFA: 饱和脂肪酸; MUFA: 单不饱和脂肪酸; EPA: 二十碳五烯酸; DPA: 二十二碳五烯酸; DHA: 二十二碳六烯酸; ARA: 花生四烯酸; PUFA: 多不饱和脂肪酸; “—”表示脂肪酸含量低于 0.1%。

Note: SFA: saturated fatty acids; MUFA: monounsaturated fatty acid; EPA: eicosapentaenoic acid; DPA: docosapentaenoic acid; DHA: docosahexaenoic acid; ARA: arachidonic acid; PUFA: polyunsaturated fatty acids; “—” represents the fatty acid content less than 0.1%.

1.4 计算公式

存活率(survival rate, SR, %)=成活尾数/总尾数×100;

特定生长率(specific growth rate, SGR, %·d<sup>-1</sup>)=[ln 末体重(g)-ln 初体重(g)]/时间(d)×100;

饲料系数(feed conversion ratio, FCR)=摄食饲料总量(g)/[末体重(g)-初体重(g)]×100;

蛋白质效率(protein efficiency ratio, PER)=[末体重(g)-初体重(g)]/[摄食饲料总量(g)×蛋白含量(%)];

脏体比(viserosomatic index, VSI, %)=内脏质量/末体重×100;

肝体比(hepatosomatic index, HSI, %)=肝质量/

末体重×100;

肥满度(condition factor, CF, g/cm<sup>3</sup>)=体重/体长<sup>3</sup>×100。

1.5 数据处理与分析

实验数据采用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 差异显著则进行 Duncan’s 多重比较检验, 显著水平为 0.05。统计数据均以平均值±标准差( $\bar{x} \pm SD$ )的形式表示。

2 结果与分析

2.1 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷生长性能的影响

由表 3 可知, 实验鱼存活率(SR)为 90.83%~

表 3 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷生长及形体指数的影响

Tab. 3 Effects of replacement of fish oil by wheat germ oil on growth performance and body parameters of *Cynolossus semilaevis*   
 *n*=3;  $\bar{x}\pm\text{SE}$

| 指标 index                       | 组别 group                |                         |                         |                         |                         |                         |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                | D0                      | D20                     | D40                     | D60                     | D80                     | D100                    |
| 初均重/g initial weight           | 3.71±0.01               | 3.71±0.01               | 3.72±0.00               | 3.71±0.01               | 3.71±0.01               | 3.71±0.01               |
| 末均重/g final weight             | 13.51±0.13 <sup>a</sup> | 13.41±0.34 <sup>a</sup> | 13.12±0.34 <sup>a</sup> | 12.67±0.42 <sup>b</sup> | 12.52±0.03 <sup>b</sup> | 11.40±0.18 <sup>c</sup> |
| 特定生长率/(%·d <sup>-1</sup> ) SGR | 1.87±0.01 <sup>a</sup>  | 1.86±0.04 <sup>a</sup>  | 1.83±0.04 <sup>ab</sup> | 1.80±0.04 <sup>ab</sup> | 1.76±0.01 <sup>b</sup>  | 1.63±0.03 <sup>c</sup>  |
| 饲料系数 FCR                       | 0.89±0.02 <sup>a</sup>  | 0.91±0.03 <sup>ab</sup> | 0.93±0.06 <sup>ab</sup> | 0.94±0.05 <sup>ab</sup> | 1.02±0.07 <sup>bc</sup> | 1.06±0.05 <sup>c</sup>  |
| 蛋白质效率 PER                      | 2.28±0.06 <sup>a</sup>  | 2.21±0.07 <sup>ab</sup> | 2.19±0.13 <sup>ab</sup> | 2.16±0.11 <sup>ab</sup> | 2.00±0.13 <sup>bc</sup> | 1.89±0.10 <sup>c</sup>  |
| 存活率 SR                         | 95.83±1.18              | 90.83±1.18              | 95.00±2.04              | 93.33±2.36              | 93.33±3.12              | 95.83±2.36              |
| 脏体比/% VSI                      | 4.23±0.22               | 4.34±0.22               | 4.28±0.29               | 4.36±0.14               | 4.2±0.15                | 4.18±0.19               |
| 肝体比/% HIS                      | 0.86±0.06               | 0.81±0.09               | 0.89±0.16               | 0.83±0.05               | 0.80±0.06               | 0.81±0.06               |
| 肥满度/(g·cm <sup>-3</sup> ) CF   | 0.68±0.02               | 0.64±0.01               | 0.66±0.02               | 0.67±0.02               | 0.68±0.01               | 0.65±0.02               |

注: 表中数值为 3 个重复的均值及标准误, 同一行上标注字母不同表示差异显著( $P<0.05$ ).  
Note: Values are means and standard errors of three replicates. Means in each row with different superscripts show significant differences ( $P<0.05$ ).

95.83%, 各组间差异不显著( $P>0.05$ ); 特定生长率(SGR)和蛋白质效率(PER)随替代水平的提高而降低, D80 和 D100 组显著低于 D0 组( $P<0.05$ ); 饲料系数(FCR)随替代水平的提高而升高, D80 和 D100 组显著高于 D0 组( $P<0.05$ ), 其他各组与 D0 组无显著差异( $P>0.05$ ); 各组间脏体比(VSI)、肝体比(HSI)和肥满度(CF)均无显著性差异( $P>0.05$ ).

2.2 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷体成分的影响  
由表 4 可知, 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌

鲷肌肉基本营养组成无显著性影响。全鱼组成中, D80 和 D100 组水分含量显著高于 D0 组( $P<0.05$ ), 其他各组与 D0 组差异不显著( $P>0.05$ ); 粗脂肪含量随替代水平的提高而降低; 粗蛋白和粗灰分含量各组间无显著性差异( $P>0.05$ )。肝组成中, 水分和粗蛋白含量差异不显著( $P>0.05$ ); 粗脂肪含量随替代水平的提高而升高, D20 组与 D0 组差异不显著( $P>0.05$ ), 其他组显著高于 D0 组( $P<0.05$ )。

表 4 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷体组成的影响

Tab. 4 Effects of replacement of fish oil by wheat germ oil on body composition of *Cynolossus semilaevis*   
 *n*=3;  $\bar{x}\pm\text{SE}$ ; %

| 指标 index          | 组别 group                |                         |                         |                         |                         |                         |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                   | D0                      | D20                     | D40                     | D60                     | D80                     | D100                    |
| 全鱼 whole fish     |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 水分 moisture       | 77.38±0.32 <sup>a</sup> | 77.54±0.17 <sup>a</sup> | 77.58±0.14 <sup>a</sup> | 77.50±0.29 <sup>a</sup> | 78.06±0.19 <sup>b</sup> | 78.23±0.17 <sup>b</sup> |
| 粗蛋白 crude protein | 14.84±0.02              | 14.98±0.25              | 15.12±0.22              | 14.93±0.15              | 14.81±0.16              | 14.78±0.20              |
| 粗脂肪 crude lipid   | 5.65±0.19 <sup>a</sup>  | 5.47±0.07 <sup>a</sup>  | 5.33±0.07 <sup>ab</sup> | 5.29±0.22 <sup>ab</sup> | 5.03±0.23 <sup>bc</sup> | 4.79±0.18 <sup>c</sup>  |
| 粗灰分 crude ash     | 1.86±0.11               | 1.88±0.05               | 1.88±0.09               | 1.97±0.07               | 1.90±0.11               | 1.97±0.02               |
| 肌肉 muscle         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 水分 moisture       | 79.65±1.08              | 79.51±0.47              | 79.76±0.65              | 80.29±0.22              | 79.79±0.27              | 80.48±0.25              |
| 粗蛋白 crude protein | 17.44±0.34              | 17.91±0.38              | 17.53±0.11              | 17.40±0.08              | 17.68±0.31              | 17.40±0.21              |
| 粗脂肪 crude lipid   | 1.32±0.18               | 1.50±0.22               | 1.28±0.14               | 1.36±0.19               | 1.50±0.08               | 1.37±0.17               |
| 粗灰分 crude ash     | 1.21±0.08               | 1.16±0.03               | 1.20±0.12               | 1.16±0.05               | 1.18±0.09               | 1.15±0.05               |
| 肝 liver           |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| 水分 moisture       | 73.48±0.65              | 73.23±0.32              | 73.14±0.13              | 73.18±0.60              | 72.99±0.25              | 72.85±0.66              |
| 粗蛋白 crude protein | 15.04±0.41              | 15.01±0.11              | 15.09±0.19              | 14.92±0.12              | 14.96±0.41              | 14.72±0.28              |
| 粗脂肪 crude lipid   | 1.29±0.12 <sup>a</sup>  | 1.44±0.15 <sup>ab</sup> | 1.67±0.12 <sup>bc</sup> | 2.05±0.19 <sup>cd</sup> | 2.32±0.10 <sup>d</sup>  | 2.79±0.25 <sup>e</sup>  |

注: 表中数值为 3 个重复的均值及标准误, 同一行上标注字母不同表示差异显著( $P<0.05$ ).  
Note: Values are means and standard errors of three replicates. Means in each row with different superscripts show significant differences ( $P<0.05$ ).

### 2.3 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷幼鱼体组织脂肪酸组成的影响

饲料脂肪酸组成明显影响了半滑舌鲷鱼体组织脂肪酸组成(表 5, 表 6, 表 7)。随着小麦胚芽油水平的升高, 鱼体组织中亚油酸( $C_{18:2n-6}$ )、亚麻酸( $C_{18:3n-3}$ )和多不饱和脂肪酸含量显著升高( $P<0.05$ ); 饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、 $n-3$  高不饱和脂肪酸含量显著降低( $P<0.05$ );  $n-3/n-6$ (PUFA)由 2.6~2.9 显著降到 0.4~0.6( $P<0.05$ ); EPA/DHA 在鱼体和肌肉中变化不显著( $P>0.05$ ), 而在肝中呈降低趋势;  $C_{18:1n-9}/n-3$ HUFA 均显著升高( $P<0.05$ ), 且肝中  $C_{18:1n-9}/n-3$ HUFA 明显低于鱼体和肌肉。

### 2.4 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷血清生化指标的影响

由表 8 可知, 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷血清谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、碱性磷酸酶(ALP)活力均无显著性影响( $P>0.05$ ); 甘油三酯(TG)和总胆固醇(TCHO)含量随替代水平的升高而升高, D60、D80 和 D100 组显著高于 D0 组( $P<0.05$ ); 各组间血清溶菌酶(LZM)活性无显著性差异( $P>0.05$ ); 丙二醛(MDA)含量随替代水平的升高而降低, D20 组与 D0 组无显著性差异( $P>0.05$ ), 其他各组显著低于 D0 组( $P<0.05$ )。

表 5 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷鱼体脂肪酸组成的影响

Tab. 5 Effects of replacement of fish oil by wheat germ oil on fatty acid composition in the body of *Cynolossus semilaevis*

$n=3$ ;  $\bar{x}\pm SE$ ; %

| 脂肪酸 fatty acid         | 组别 group                |                         |                         |                         |                         |                         |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                        | D0                      | D20                     | D40                     | D60                     | D80                     | D100                    |
| $C_{14:0}$             | 5.27±0.15 <sup>a</sup>  | 4.55±0.06 <sup>b</sup>  | 4.05±0.06 <sup>c</sup>  | 3.42±0.04 <sup>d</sup>  | 2.76±0.10 <sup>e</sup>  | 2.23±0.08 <sup>f</sup>  |
| $C_{16:0}$             | 19.77±0.18 <sup>a</sup> | 19.16±0.08 <sup>b</sup> | 18.75±0.12 <sup>c</sup> | 18.20±0.04 <sup>d</sup> | 17.92±0.17 <sup>d</sup> | 17.54±0.16 <sup>e</sup> |
| $C_{18:0}$             | 3.58±0.05 <sup>a</sup>  | 3.51±0.03 <sup>ab</sup> | 3.40±0.04 <sup>bc</sup> | 3.34±0.09 <sup>cd</sup> | 3.20±0.07 <sup>de</sup> | 3.23±0.05 <sup>e</sup>  |
| ΣSFA                   | 29.61±0.26 <sup>a</sup> | 28.22±0.04 <sup>b</sup> | 27.2±0.19 <sup>c</sup>  | 25.96±0.10 <sup>d</sup> | 24.89±0.28 <sup>e</sup> | 23.99±0.23 <sup>f</sup> |
| $C_{16:1n-7}$          | 6.26±0.11 <sup>a</sup>  | 5.54±0.03 <sup>b</sup>  | 5.07±0.08 <sup>c</sup>  | 4.35±0.10 <sup>d</sup>  | 3.74±0.10 <sup>e</sup>  | 3.06±0.15 <sup>f</sup>  |
| $C_{18:1n-9}$          | 13.43±0.12              | 13.30±0.06              | 13.41±0.13              | 13.26±0.14              | 13.33±0.07              | 13.19±0.10              |
| $C_{18:1n-7}$          | 3.96±0.10 <sup>a</sup>  | 3.60±0.04 <sup>b</sup>  | 3.40±0.07 <sup>c</sup>  | 3.12±0.06 <sup>d</sup>  | 2.99±0.09 <sup>d</sup>  | 2.81±0.08 <sup>e</sup>  |
| $C_{20:1n-7}$          | 1.45±0.08 <sup>a</sup>  | 1.36±0.08 <sup>a</sup>  | 1.20±0.04 <sup>b</sup>  | 1.03±0.04 <sup>c</sup>  | 0.95±0.07 <sup>cd</sup> | 0.83±0.09 <sup>d</sup>  |
| $C_{22:1n-9}$          | 1.29±0.07 <sup>a</sup>  | 1.02±0.02 <sup>b</sup>  | 0.83±0.07 <sup>c</sup>  | 0.58±0.03 <sup>d</sup>  | 0.38±0.03 <sup>e</sup>  | 0.24±0.03 <sup>f</sup>  |
| ΣMUFA                  | 26.39±0.14 <sup>a</sup> | 24.83±0.06 <sup>b</sup> | 23.9±0.15 <sup>c</sup>  | 22.34±0.23 <sup>d</sup> | 21.4±0.19 <sup>e</sup>  | 20.13±0.27 <sup>f</sup> |
| $C_{20:2n-9}$          | 1.99±0.05 <sup>a</sup>  | 1.75±0.01 <sup>b</sup>  | 1.51±0.04 <sup>c</sup>  | 1.24±0.02 <sup>d</sup>  | 0.83±0.03 <sup>e</sup>  | 0.59±0.03 <sup>f</sup>  |
| $C_{18:3n-3}$          | 1.77±0.09 <sup>a</sup>  | 2.07±0.06 <sup>b</sup>  | 2.28±0.05 <sup>c</sup>  | 2.52±0.09 <sup>d</sup>  | 2.72±0.08 <sup>e</sup>  | 2.94±0.07 <sup>f</sup>  |
| EPA                    | 7.40±0.05 <sup>a</sup>  | 6.47±0.12 <sup>b</sup>  | 5.68±0.12 <sup>c</sup>  | 5.10±0.13 <sup>d</sup>  | 4.11±0.11 <sup>e</sup>  | 3.52±0.08 <sup>f</sup>  |
| DPA                    | 1.92±0.04 <sup>a</sup>  | 1.77±0.04 <sup>b</sup>  | 1.64±0.08 <sup>bc</sup> | 1.57±0.06 <sup>c</sup>  | 1.35±0.09 <sup>d</sup>  | 1.19±0.06 <sup>e</sup>  |
| DHA                    | 12.81±0.12 <sup>a</sup> | 11.39±0.1 <sup>b</sup>  | 9.91±0.14 <sup>c</sup>  | 8.79±0.21 <sup>d</sup>  | 7.32±0.13 <sup>e</sup>  | 6.30±0.09 <sup>f</sup>  |
| $C_{18:2n-6}$          | 8.06±0.33 <sup>a</sup>  | 14.56±0.15 <sup>b</sup> | 19.63±0.34 <sup>c</sup> | 25.22±0.42 <sup>d</sup> | 31.12±0.47 <sup>e</sup> | 35.24±0.27 <sup>f</sup> |
| ARA                    | 0.93±0.01 <sup>a</sup>  | 0.81±0.01 <sup>b</sup>  | 0.72±0.02 <sup>c</sup>  | 0.66±0.05 <sup>c</sup>  | 0.55±0.03 <sup>d</sup>  | 0.45±0.04 <sup>e</sup>  |
| ΣPUFA                  | 34.9±0.46 <sup>a</sup>  | 38.81±0.20 <sup>b</sup> | 41.38±0.50 <sup>c</sup> | 45.1±0.16 <sup>d</sup>  | 48.00±0.25 <sup>e</sup> | 50.23±0.40 <sup>f</sup> |
| Σ $n-3$ PUFA           | 23.91±0.16 <sup>a</sup> | 21.70±0.17 <sup>b</sup> | 19.52±0.29 <sup>c</sup> | 17.98±0.21 <sup>d</sup> | 15.50±0.23 <sup>e</sup> | 13.95±0.09 <sup>f</sup> |
| Σ $n-6$ PUFA           | 9.00±0.35 <sup>a</sup>  | 15.36±0.16 <sup>b</sup> | 20.35±0.36 <sup>c</sup> | 25.88±0.37 <sup>d</sup> | 31.67±0.45 <sup>e</sup> | 35.70±0.30 <sup>f</sup> |
| $n-3/n-6$              | 2.66±0.09 <sup>a</sup>  | 1.41±0.02 <sup>b</sup>  | 0.96±0.02 <sup>c</sup>  | 0.69±0.02 <sup>d</sup>  | 0.49±0.01 <sup>e</sup>  | 0.39±0.00 <sup>f</sup>  |
| EPA/DHA                | 0.58±0.01               | 0.57±0.01               | 0.57±0.01               | 0.58±0.01               | 0.56±0.01               | 0.56±0.02               |
| $C_{18:1n-9}/n-3$ HUFA | 0.61±0.01 <sup>a</sup>  | 0.68±0.01 <sup>b</sup>  | 0.78±0.02 <sup>c</sup>  | 0.86±0.02 <sup>d</sup>  | 1.04±0.03 <sup>e</sup>  | 1.20±0.01 <sup>f</sup>  |

注: 表中数值为 3 个重复的均值及标准误, 同一行上标注字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Values are means and standard errors of three replicates. Means in each row with different superscripts show significant differences ( $P<0.05$ ).

表 6 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷肌肉脂肪酸组成的影响

Tab. 6 Effects of replacement of fish oil by wheat germ oil on fatty acid composition in the muscle of *Cynolossus semilaevis*  $n=3$ ;  $\bar{x}\pm\text{SE}$ ; %

| 脂肪酸 fatty acid                | 组别 group                |                         |                         |                         |                          |                         |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                               | D0                      | D20                     | D40                     | D60                     | D80                      | D100                    |
| C <sub>14:0</sub>             | 4.23±0.08 <sup>a</sup>  | 3.81±0.11 <sup>b</sup>  | 3.18±0.07 <sup>c</sup>  | 2.53±0.03 <sup>d</sup>  | 2.10±0.04 <sup>e</sup>   | 1.73±0.04 <sup>f</sup>  |
| C <sub>16:0</sub>             | 21.63±0.20 <sup>a</sup> | 20.32±0.14 <sup>b</sup> | 19.61±0.43 <sup>c</sup> | 18.73±0.32 <sup>d</sup> | 18.20±0.41 <sup>de</sup> | 17.73±0.23 <sup>e</sup> |
| C <sub>18:0</sub>             | 4.95±0.07 <sup>a</sup>  | 4.79±0.07 <sup>ab</sup> | 4.66±0.07 <sup>b</sup>  | 4.43±0.10 <sup>c</sup>  | 4.35±0.09 <sup>c</sup>   | 4.31±0.06 <sup>c</sup>  |
| ΣSFA                          | 30.81±0.13 <sup>a</sup> | 28.92±0.27 <sup>b</sup> | 27.45±0.29 <sup>c</sup> | 25.86±0.55 <sup>d</sup> | 24.65±0.64 <sup>e</sup>  | 23.77±0.46 <sup>f</sup> |
| C <sub>16:1n-7</sub>          | 5.12±0.16 <sup>a</sup>  | 4.93±0.21 <sup>a</sup>  | 4.02±0.19 <sup>b</sup>  | 3.22±0.14 <sup>c</sup>  | 2.74±0.05 <sup>d</sup>   | 2.37±0.13 <sup>e</sup>  |
| C <sub>18:1n-9</sub>          | 14.16±0.24 <sup>a</sup> | 13.73±0.24 <sup>a</sup> | 13.09±0.18 <sup>b</sup> | 12.52±0.21 <sup>c</sup> | 12.47±0.11 <sup>c</sup>  | 12.62±0.26 <sup>c</sup> |
| C <sub>18:1n-7</sub>          | 3.49±0.05 <sup>a</sup>  | 3.38±0.09 <sup>a</sup>  | 3.27±0.14 <sup>a</sup>  | 2.96±0.12 <sup>b</sup>  | 2.67±0.16 <sup>c</sup>   | 2.59±0.06 <sup>c</sup>  |
| C <sub>20:1n-7</sub>          | 1.71±0.04 <sup>a</sup>  | 1.55±0.03 <sup>b</sup>  | 1.26±0.06 <sup>c</sup>  | 1.19±0.05 <sup>c</sup>  | 1.04±0.03 <sup>d</sup>   | 0.91±0.06 <sup>e</sup>  |
| C <sub>22:1n-9</sub>          | 1.31±0.07 <sup>a</sup>  | 0.99±0.05 <sup>b</sup>  | 0.8±0.06 <sup>c</sup>   | 0.55±0.02 <sup>d</sup>  | 0.38±0.06 <sup>e</sup>   | 0.28±0.07 <sup>e</sup>  |
| ΣMUFA                         | 25.79±0.07 <sup>a</sup> | 24.57±0.37 <sup>b</sup> | 22.43±0.05 <sup>c</sup> | 20.43±0.07 <sup>d</sup> | 19.31±0.25 <sup>e</sup>  | 18.76±0.20 <sup>f</sup> |
| C <sub>20:2n-9</sub>          | 0.97±0.05 <sup>a</sup>  | 0.95±0.02 <sup>a</sup>  | 0.83±0.04 <sup>b</sup>  | 0.65±0.01 <sup>c</sup>  | 0.54±0.01 <sup>d</sup>   | 0.40±0.03 <sup>e</sup>  |
| C <sub>18:3n-3</sub>          | 1.32±0.06 <sup>a</sup>  | 1.66±0.09 <sup>b</sup>  | 1.78±0.07 <sup>bc</sup> | 1.93±0.03 <sup>c</sup>  | 2.15±0.05 <sup>d</sup>   | 2.18±0.07 <sup>d</sup>  |
| EPA                           | 7.07±0.25 <sup>a</sup>  | 6.09±0.28 <sup>b</sup>  | 5.67±0.48 <sup>bc</sup> | 5.23±0.08 <sup>c</sup>  | 4.50±0.15 <sup>d</sup>   | 3.63±0.17 <sup>e</sup>  |
| DPA                           | 1.81±0.01 <sup>a</sup>  | 1.61±0.04 <sup>c</sup>  | 1.67±0.02 <sup>b</sup>  | 1.61±0.03 <sup>c</sup>  | 1.37±0.02 <sup>d</sup>   | 1.28±0.01 <sup>e</sup>  |
| DHA                           | 13.07±0.51 <sup>a</sup> | 10.46±0.69 <sup>b</sup> | 9.92±0.29 <sup>bc</sup> | 8.95±0.38 <sup>c</sup>  | 7.38±0.07 <sup>d</sup>   | 6.26±0.52 <sup>e</sup>  |
| C <sub>18:2n-6</sub>          | 5.69±0.16 <sup>a</sup>  | 14.2±0.30 <sup>b</sup>  | 18.26±0.52 <sup>c</sup> | 23.37±0.35 <sup>d</sup> | 28.62±0.13 <sup>e</sup>  | 32.46±0.14 <sup>f</sup> |
| ARA                           | 0.81±0.12               | 0.78±0.04               | 0.69±0.04               | 0.77±0.07               | 0.62±0.07                | 0.57±0.09               |
| ΣPUFA                         | 31.07±0.82 <sup>a</sup> | 35.96±0.43 <sup>b</sup> | 39.04±0.31 <sup>c</sup> | 42.68±0.14 <sup>d</sup> | 45.38±0.27 <sup>e</sup>  | 46.97±0.18 <sup>f</sup> |
| Σn-3PUFA                      | 23.56±0.40 <sup>a</sup> | 20.13±0.08 <sup>b</sup> | 19.25±0.37 <sup>c</sup> | 17.89±0.31 <sup>d</sup> | 15.61±0.06 <sup>e</sup>  | 13.54±0.21 <sup>f</sup> |
| Σn-6PUFA                      | 7.98±0.40 <sup>a</sup>  | 14.98±0.27 <sup>b</sup> | 18.95±0.51 <sup>c</sup> | 24.13±0.28 <sup>d</sup> | 29.23±0.20 <sup>e</sup>  | 33.03±0.06 <sup>f</sup> |
| n-3/n-6                       | 2.93±0.11 <sup>a</sup>  | 1.34±0.02 <sup>b</sup>  | 1.02±0.05 <sup>c</sup>  | 0.74±0.02 <sup>d</sup>  | 0.53±0.00 <sup>e</sup>   | 0.41±0.01 <sup>f</sup>  |
| EPA/DHA                       | 0.54±0.01               | 0.58±0.03               | 0.57±0.01               | 0.59±0.03               | 0.60±0.03                | 0.58±0.04               |
| C <sub>18:1n-9</sub> /n-3HUFA | 0.64±0.02 <sup>a</sup>  | 0.75±0.05 <sup>ab</sup> | 0.75±0.04 <sup>ab</sup> | 0.78±0.01 <sup>b</sup>  | 0.93±0.04 <sup>c</sup>   | 1.12±0.10 <sup>d</sup>  |

注: 表中数值为 3 个重复的均值及标准误, 同一行上标注字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Values are means and standard errors of three replicates. Means in each row with different superscripts show significant differences ( $P<0.05$ ).

2.5 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷脂肪代谢酶的影响

由表 9 可知, 半滑舌鲷肝脂蛋白酯酶(LPL)活性随替代水平的升高而升高, D60 组、D80 组和 D100 组显著高于 D0 组( $P<0.05$ ), 其他各组与 D0 组无显著差异( $P>0.05$ ); 肝酯酶(HL)、总酯酶(TL)和脂肪酸合成酶(FAS)活性随替代水平的升高而升高, D80 组和 D100 组显著高于 D0 组( $P<0.05$ ), 其他各组则与 D0 组无显著差异( $P>0.05$ )。肠道脂肪酶(LPS)活性随替代水平的升高而升高, D60 组、D80 组和 D100 组显著高于 D0 组( $P<0.05$ )。

3 讨论

3.1 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷幼鱼生长性能的影响

本研究发现, 小麦胚芽油可部分替代鱼油而

不影响半滑舌鲷幼鱼的生长和存活, 但替代过高(超过 60%)则会抑制生长。Izquierdo 等<sup>[16]</sup>用植物油替代 60%的饲料鱼油不影响金头鲷的生长和存活, 但替代 80%则会显著降低其生长。Bowyer 等<sup>[17]</sup>在黄尾鲷(*Seriola lalandi*)上的研究也显示, 菜籽油可部分替代饲料鱼油而不影响其生长, 但完全替代则会显著降低生长。Turchini 等<sup>[18]</sup>认为, 在饲料必需脂肪酸得到满足的情况下, 其他脂肪源可替代 60%~75%鱼油而不影响鱼类生长。本实验中, 随小麦胚芽油替代鱼油水平的升高, 饲料系数呈上升趋势而蛋白质效率呈下降趋势, 这说明饲料中添加小麦胚芽油降低了半滑舌鲷对饲料的利用率, 这可能与饲料 n-3HUFA 含量的降低有关。饲料 PUFA 特别是 n-3HUFA 对鱼类消化酶的活性具有促进作用<sup>[16]</sup>。Morais 等<sup>[20]</sup>在塞内加尔鲷(*Solea senegalensis*)上的研究显示, n-3HUFA 能

表 7 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷肝脂肪酸组成的影响

Tab. 7 Effects of replacement of fish oil by wheat germ oil on fatty acid composition in the liver of *Cynolossus semilaevis* $n=3$ ;  $\bar{x}\pm\text{SE}$ ; %

| 脂肪酸 fatty acid                | 组别 group                |                         |                          |                          |                         |                         |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                               | D0                      | D20                     | D40                      | D60                      | D80                     | D100                    |
| C <sub>14:0</sub>             | 1.74±0.04 <sup>a</sup>  | 1.39±0.09 <sup>b</sup>  | 1.29±0.04 <sup>b</sup>   | 1.15±0.04 <sup>c</sup>   | 0.91±0.04 <sup>d</sup>  | 0.74±0.02 <sup>c</sup>  |
| C <sub>16:0</sub>             | 19.41±0.22 <sup>a</sup> | 18.35±0.29 <sup>b</sup> | 17.91±0.07 <sup>cd</sup> | 17.68±0.15 <sup>cd</sup> | 17.18±0.42 <sup>c</sup> | 15.79±0.55 <sup>d</sup> |
| C <sub>18:0</sub>             | 13.73±0.08 <sup>a</sup> | 13.22±0.08 <sup>b</sup> | 13.25±0.31 <sup>b</sup>  | 13.23±0.10 <sup>b</sup>  | 13.08±0.03 <sup>b</sup> | 13.00±0.03 <sup>b</sup> |
| Σ SFA                         | 36.37±0.18 <sup>a</sup> | 34.31±0.18 <sup>b</sup> | 33.67±0.35 <sup>bc</sup> | 33.18±0.11 <sup>cd</sup> | 32.14±0.43 <sup>d</sup> | 30.36±0.53 <sup>e</sup> |
| C <sub>16:1n-7</sub>          | 1.73±0.04 <sup>a</sup>  | 1.37±0.07 <sup>b</sup>  | 1.25±0.06 <sup>c</sup>   | 1.04±0.06 <sup>d</sup>   | 0.91±0.05 <sup>e</sup>  | 0.74±0.00 <sup>f</sup>  |
| C <sub>18:1n-9</sub>          | 7.71±0.20 <sup>a</sup>  | 7.22±0.05 <sup>a</sup>  | 6.89±0.18 <sup>b</sup>   | 6.76±0.35 <sup>b</sup>   | 6.65±0.02 <sup>b</sup>  | 6.54±0.02 <sup>b</sup>  |
| C <sub>18:1n-7</sub>          | 2.79±0.06 <sup>a</sup>  | 2.61±0.04 <sup>b</sup>  | 2.41±0.04 <sup>c</sup>   | 2.31±0.13 <sup>c</sup>   | 2.14±0.06 <sup>d</sup>  | 1.96±0.08 <sup>e</sup>  |
| C <sub>20:1n-7</sub>          | 0.89±0.05 <sup>a</sup>  | 0.72±0.04 <sup>b</sup>  | 0.66±0.02 <sup>b</sup>   | 0.59±0.02 <sup>c</sup>   | 0.47±0.00 <sup>d</sup>  | 0.41±0.01 <sup>d</sup>  |
| C <sub>22:1n-9</sub>          | 0.44±0.01 <sup>a</sup>  | 0.33±0.01 <sup>b</sup>  | 0.29±0.03 <sup>c</sup>   | 0.19±0.01 <sup>d</sup>   | 0.11±0.01 <sup>e</sup>  | —                       |
| Σ MUFA                        | 13.56±0.28 <sup>a</sup> | 12.26±0.12 <sup>b</sup> | 11.5±0.25 <sup>c</sup>   | 10.89±0.55 <sup>d</sup>  | 10.27±0.07 <sup>e</sup> | 9.65±0.11 <sup>f</sup>  |
| C <sub>20:2n-9</sub>          | 0.23±0.01 <sup>a</sup>  | 0.21±0.01 <sup>b</sup>  | 0.17±0.01 <sup>c</sup>   | 0.14±0.00 <sup>d</sup>   | 0.09±0.01 <sup>e</sup>  | —                       |
| C <sub>18:3n-3</sub>          | 0.61±0.01 <sup>a</sup>  | 0.67±0.01 <sup>b</sup>  | 0.72±0.02 <sup>c</sup>   | 0.74±0.02 <sup>c</sup>   | 0.83±0.01 <sup>d</sup>  | 0.89±0.03 <sup>e</sup>  |
| EPA                           | 11.51±0.18 <sup>a</sup> | 10.6±0.16 <sup>b</sup>  | 9.39±0.30 <sup>c</sup>   | 7.74±0.15 <sup>d</sup>   | 7.02±0.09 <sup>e</sup>  | 6.17±0.07 <sup>f</sup>  |
| DPA                           | 1.67±0.01 <sup>a</sup>  | 1.64±0.03 <sup>ab</sup> | 1.53±0.08 <sup>bc</sup>  | 1.47±0.06 <sup>cd</sup>  | 1.41±0.03 <sup>d</sup>  | 1.40±0.09 <sup>d</sup>  |
| DHA                           | 18.03±0.17 <sup>a</sup> | 17.42±0.28 <sup>b</sup> | 16.8±0.19 <sup>c</sup>   | 14.17±0.11 <sup>d</sup>  | 12.91±0.26 <sup>e</sup> | 11.44±0.12 <sup>f</sup> |
| C <sub>18:2n-6</sub>          | 7.63±0.29 <sup>a</sup>  | 14.03±0.28 <sup>b</sup> | 17.54±0.17 <sup>c</sup>  | 22.54±0.21 <sup>d</sup>  | 27.88±0.44 <sup>e</sup> | 32.65±0.45 <sup>f</sup> |
| ARA                           | 3.34±0.05 <sup>a</sup>  | 3.15±0.03 <sup>b</sup>  | 3.04±0.05 <sup>c</sup>   | 2.63±0.03 <sup>d</sup>   | 2.36±0.05 <sup>e</sup>  | 2.10±0.01 <sup>f</sup>  |
| Σ PUFA                        | 43.06±0.42 <sup>a</sup> | 47.86±0.77 <sup>b</sup> | 49.44±0.19 <sup>c</sup>  | 49.58±0.35 <sup>c</sup>  | 52.65±0.38 <sup>d</sup> | 54.9±0.56 <sup>e</sup>  |
| Σ n-3PUFA                     | 31.86±0.07 <sup>a</sup> | 30.47±0.46 <sup>b</sup> | 28.69±0.20 <sup>c</sup>  | 24.27±0.20 <sup>d</sup>  | 22.32±0.16 <sup>e</sup> | 20.15±0.10 <sup>f</sup> |
| Σ n-6PUFA                     | 10.97±0.34 <sup>a</sup> | 17.18±0.31 <sup>b</sup> | 20.57±0.21 <sup>c</sup>  | 25.17±0.18 <sup>d</sup>  | 30.24±0.39 <sup>e</sup> | 34.75±0.46 <sup>f</sup> |
| n-3/n-6                       | 2.94±0.08 <sup>a</sup>  | 1.77±0.01 <sup>b</sup>  | 1.39±0.02 <sup>c</sup>   | 0.96±0.01 <sup>d</sup>   | 0.74±0.01 <sup>e</sup>  | 0.58±0.01 <sup>f</sup>  |
| EPA/DHA                       | 0.64±0.02 <sup>a</sup>  | 0.61±0.00 <sup>a</sup>  | 0.56±0.02 <sup>b</sup>   | 0.55±0.01 <sup>b</sup>   | 0.54±0.02 <sup>b</sup>  | 0.54±0.01 <sup>b</sup>  |
| C <sub>18:1n-9</sub> /n-3HUFA | 0.25±0.01 <sup>a</sup>  | 0.24±0.01 <sup>a</sup>  | 0.25±0.01 <sup>a</sup>   | 0.29±0.02 <sup>b</sup>   | 0.31±0.00 <sup>c</sup>  | 0.34±0.00 <sup>d</sup>  |

注: 表中数值为 3 个重复的均值及标准误, 同一行上标注字母不同表示差异显著( $P<0.05$ ).Note: Values are means and standard errors of three replicates. Means in each row with different superscripts show significant differences ( $P<0.05$ ).

表 8 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷血清生化指标的影响

Tab. 8 Effects of replacement of fish oil by wheat germ oil on plasma parameters of *Cynolossus semilaevis* $n=9$ ;  $\bar{x}\pm\text{SE}$ 

| 指标 index                          | 组别 group                |                         |                         |                         |                        |                        |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
|                                   | D0                      | D20                     | D40                     | D60                     | D80                    | D100                   |
| 谷丙转氨酶/(U·L <sup>-1</sup> ) ALT    | 29.97±3.84              | 27.53±1.84              | 29.00±1.36              | 26.43±2.98              | 30.10±1.42             | 30.13±2.79             |
| 谷草转氨酶/(U·L <sup>-1</sup> ) AST    | 157.00±29.64            | 139.70±13.47            | 160.70±28.01            | 157.35±22.90            | 170.65±27.31           | 165.50±31.60           |
| 甘油三酯/(mmol·L <sup>-1</sup> ) TG   | 3.36±0.18 <sup>a</sup>  | 3.41±0.09 <sup>a</sup>  | 3.39±0.13 <sup>a</sup>  | 3.57±0.10 <sup>ab</sup> | 3.75±0.15 <sup>b</sup> | 3.85±0.11 <sup>b</sup> |
| 总胆固醇/(mmol·L <sup>-1</sup> ) TCHO | 2.22±0.25 <sup>a</sup>  | 2.25±0.23 <sup>a</sup>  | 2.43±0.27 <sup>a</sup>  | 2.75±0.31 <sup>ab</sup> | 3.05±0.21 <sup>b</sup> | 3.29±0.13 <sup>b</sup> |
| 碱性磷酸酶/(U·L <sup>-1</sup> ) ALP    | 28.50±1.50              | 26.33±6.85              | 25.00±4.00              | 27.50±3.50              | 26.00±4.00             | 28.00±6.00             |
| 溶菌酶/(U·mL <sup>-1</sup> ) LZM     | 682.16±33.38            | 838.66±58.15            | 723.55±92.03            | 720.58±108.45           | 721.68±102.27          | 828.41±18.13           |
| 丙二醛/(nmol·mL <sup>-1</sup> ) MDA  | 17.13±0.40 <sup>a</sup> | 16.86±1.20 <sup>a</sup> | 13.35±0.78 <sup>b</sup> | 8.22±0.79 <sup>c</sup>  | 7.67±0.71 <sup>c</sup> | 5.58±0.57 <sup>d</sup> |

注: 表中数值为 3 个重复的均值及标准误, 同一行上标注字母不同表示差异显著( $P<0.05$ ).Note: Values are means and standard errors of three replicates. Means in each row with different superscripts show significant differences ( $P<0.05$ ).

表 9    小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷脂肪代谢酶活性的影响  
Tab. 9    Effects of replacement of fish oil by wheat germ oil on lipid metabolism enzyme activities of *Cynolossus semilaevis*  
n=9;  $\bar{x} \pm SE$

| 指标 index                           | 组别 group                  |                            |                             |                             |                            |                           |
|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
|                                    | D0                        | D20                        | D40                         | D60                         | D80                        | D100                      |
| 肝 liver                            |                           |                            |                             |                             |                            |                           |
| 脂蛋白酯酶/(U·mg <sup>-1</sup> ) LPL    | 12.65±1.19 <sup>a</sup>   | 13.20±1.73 <sup>ab</sup>   | 14.26±1.30 <sup>abc</sup>   | 15.55±1.45 <sup>bc</sup>    | 16.40±1.88 <sup>bc</sup>   | 17.20±1.71 <sup>c</sup>   |
| 肝酯酶/(U·mg <sup>-1</sup> ) HL       | 22.43±0.86 <sup>a</sup>   | 23.75±1.67 <sup>ab</sup>   | 24.54±2.32 <sup>abc</sup>   | 26.00±0.89 <sup>abc</sup>   | 27.59±2.04 <sup>bc</sup>   | 29.36±3.70 <sup>c</sup>   |
| 总酯酶/(U·mg <sup>-1</sup> ) TL       | 35.08±1.70 <sup>a</sup>   | 36.95±2.88 <sup>ab</sup>   | 38.90±3.14 <sup>abc</sup>   | 41.55±2.34 <sup>abc</sup>   | 43.99±3.89 <sup>bc</sup>   | 46.56±5.22 <sup>c</sup>   |
| 脂肪酸合成酶/(nmol·g <sup>-1</sup> ) FAS | 3.81±0.14 <sup>a</sup>    | 3.93±0.20 <sup>ab</sup>    | 4.10±0.20 <sup>abc</sup>    | 4.19±0.12 <sup>abc</sup>    | 4.30±0.16 <sup>bc</sup>    | 4.36±0.13 <sup>c</sup>    |
| 肠道 gut                             |                           |                            |                             |                             |                            |                           |
| 脂肪酶/(U·g <sup>-1</sup> ) LPS       | 314.97±26.10 <sup>a</sup> | 326.51±14.76 <sup>ab</sup> | 348.17±20.41 <sup>abc</sup> | 362.72±16.08 <sup>bcd</sup> | 381.11±11.75 <sup>cd</sup> | 396.14±18.86 <sup>d</sup> |

注: 表中数值为 3 个重复的均值及标准误, 同一行上标注字母不同表示差异显著( $P<0.05$ ).  
Note: Values are means and standard errors of three replicates. Means in each row with different superscripts show significant differences ( $P<0.05$ ).

够提高仔鱼脂肪酶的活性。翘嘴红鲌(*Erythroculter ilishaeformis*)<sup>[21]</sup>上的研究也显示, 富含 n-3HUFA 的饲料能提高鱼体蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶的活性。n-3HUFA 主要有二十二碳六烯酸(DHA)和二十碳五烯酸(EPA), 为海水鱼类必需脂肪酸, 对海水鱼类生长、健康和繁殖有重要作用<sup>[19]</sup>。海水鱼类转化 C<sub>18</sub> 多不饱和脂肪酸为 n-3HUFA 的能力有限, 饲料中补充适量的 n-3HUFA 才能保证其正常生长和发育<sup>[20]</sup>。不同鱼类对 n-3HUFA 的需求不同, 大菱鲆幼鱼 n-3HUFA 需求量为 0.8%<sup>[21]</sup>; 星斑川鲷幼鱼为 0.9%<sup>[22]</sup>; 牙鲆幼鱼为 0.8%~1%<sup>[23]</sup>; 而黄盖鲷对 n-3HUFA 的需求量为 2.5%或更高<sup>[24]</sup>; 半滑舌鲷 n-3HUFA 需求量未见有报道。研究认为, 海水鱼摄入过多植物油会造成体内 n-3HUFA 含量下降而抑制鱼体生长<sup>[25]</sup>。本实验中, 小麦胚芽油富含 n-6PUFA, 而缺乏 n-3HUFA, 随小麦胚芽油替代水平的升高, n-3HUFA 含量显著降低, 各组饲料 n-3HUFA 含量依次为 2.48%、2.34%、2.00%、1.71%、1.33%和 0.98%, 由此推测, 在本实验条件下, 半滑舌鲷幼鱼对 n-3HUFA 需求量可能大于 1.33%, 从而由于饲料 n-3HUFA 含量降低造成生长抑制及饲料利用率的降低, 但其对 n-3HUFA 需求量及机理还需进一步研究。

3.2 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷体组成的影响

本研究结果显示, 小麦胚芽油替代鱼油显著

降低鱼体脂肪含量, 提高肝脂肪含量, 其原因可能是小麦胚芽油含有丰富的 PUFA 会抑制脂肪酸合成酶基因的表达, 促进脂肪氧化分解基因的表达, 从而抑制脂类合成, 加速脂类分解, 使鱼体脂肪含量降低<sup>[26]</sup>; 同时, 由于小麦胚芽油含有大量的 C<sub>18:2n-6</sub>(高达 60.7%), 使饲料 n-3/n-6(PUFA)比值显著下降, PUFA 出现不平衡, 从而使鱼肝细胞膜对脂肪的交换能力减弱, 脂肪在肝中的沉积速度加快, 肝脂含量升高<sup>[27]</sup>。肌肉、肝和肠道等组织是鱼体储存脂肪的主要器官。研究表明, 植物油替代鱼油会降低鱼体脂肪含量<sup>[28-30]</sup>, 在本实验中, 鱼体脂肪含量出现降低, 但肌肉脂肪含量没有变化。半滑舌鲷鱼体脂肪含量为 4.79%~5.65%, 而肌肉脂肪含量很低只有 1.28%~1.50%, 推测半滑舌鲷肌肉可能不是其储存脂肪的主要器官, 因此, 肌肉脂肪含量受饲料的影响较小; 还有可能是因为肌肉中脂肪含量低, 实验误差掩盖了其原有的变化趋势, 使测得的肌肉脂肪含量没有差异。必需脂肪酸在细胞膜磷脂中的浓度是最高的, 其存在保证了鱼体组织对水分及其他物质的不透性, 而当必需脂肪酸不足时就会引起细胞膜通透性的增强<sup>[31]</sup>。海水硬骨鱼生活在高渗透压的海水环境中, 为了保持体内水分和渗透压的稳定, 会进行低渗调节, 即大量吞饮海水, 在保存水分的同时, 由鳃上的氯细胞主动排出过多的一价离子(Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>), 肾排出二价离子(Mg<sup>2+</sup>、

$\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ )和少量水分,以维持渗透压的稳定<sup>[32]</sup>。实验鱼体水分含量在替代水平达到 80%后出现显著升高的现象,推测这可能是由于鱼油替代过量后,必需脂肪酸不足导致细胞膜通透性增强,鳃上氯细胞和肾更容易排出一价和二价离子,使低渗调节得到加强,鱼体为了保持水分的充足就会加大对海水的吞饮,使鱼体水分含量有所增加,其具体机制还有待进一步研究与证实。

### 3.3 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷肌肉和肝脂肪酸组成的影响

半滑舌鲷鱼体组织脂肪酸组成明显受饲料脂肪酸组成的影响。随着替代水平的升高,鱼体组织 SFA、MUFA、n-3HUFA 随饲料中相应含量的降低而显著降低,亚油酸、亚麻酸和 PUFA 随之升高而显著升高。鱼体组织中  $\text{C}_{18:1n-9}/\text{n-3HUFA}$  可以作为衡量鱼类必需脂肪酸需求的指标<sup>[33]</sup>。刘新旺等<sup>[37]</sup>研究也表明,饲料较低水平的 n-3HUFA 会导致肌肉和肝有较高的  $\text{C}_{18:1n-9}/\text{n-3 HUFA}$ ,而随着 n-3HUFA 的补充,  $\text{C}_{18:1n-9}/\text{n-3 HUFA}$  的比值逐渐降低。本实验中,随着饲料 n-3 HUFA 含量的降低,鱼体和组织中  $\text{C}_{18:1n-9}/\text{n-3HUFA}$  升高。半滑舌鲷肝中  $\text{C}_{18:1n-9}/\text{n-3HUFA}$  要明显低于鱼体和肌肉,这可能与其优先积累 EPA、DHA 和 ARA 于肝中并利用  $\text{C}_{18:1n-9}$  产生能量有关。替代水平低于 60%时,肌肉和肝  $\text{C}_{18:1n-9}/\text{n-3HUFA}$  各组间无显著差异,而当替代水平达到 60%时,  $\text{C}_{18:1n-9}/\text{n-3HUFA}$  显著升高。由此可见,小麦胚芽油替代水平超过 60%时,饲料中 n-3HUFA 含量的降低可能导致了必需脂肪酸的缺乏。

随着饲料中 EPA 和 DHA 含量的降低,半滑舌鲷鱼体和肌肉中 EPA/DHA 在 0.55~0.60,变化不显著,而肝中 EPA/DHA 由 0.64 降低到 0.54,推测半滑舌鲷幼鱼可能具有一定的从 EPA 转化到 DHA 的能力,或是 DHA 在肝中的沉积速度要优于 EPA。半滑舌鲷肝 EPA/DHA 比值降低到 0.54 后就不在降低,而鱼体和肌肉 EPA/DHA 比值一直维持在 0.55 左右,说明鱼体需要维持一定的 EPA/DHA 比值。ARA 作为鱼类类二十烷酸的主要前体脂肪酸,可促进鱼体生长、成活、抵抗压

力以及繁殖<sup>[35]</sup>。半滑舌鲷肝中 ARA 含量比鱼体和肌肉中高很多,表明半滑舌鲷幼鱼生长可能需要 ARA 衍生的二十烷类化合物,而使肝储存较多的 ARA。

### 3.4 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷血清生化指标的影响

鱼体血清生化指标的变化在一定程度上反映了鱼体生理或病理上的变化。谷草转氨酶(AST)和谷丙转氨酶(ALT)主要存在于肝细胞内,当肝细胞受损时,转氨酶就会被释放到血液里,而使血清转氨酶升高。本实验中,各组间转氨酶活性无显著差异,说明小麦胚芽油的添加对半滑舌鲷的肝没有产生损害。血清胆固醇含量随替代水平的升高呈上升趋势,这可能与高不饱和脂肪酸的降低有关,有研究表示,高不饱和脂肪酸尤其是 EPA 和 DHA 对降低血清胆固醇有很大作用<sup>[36]</sup>。甘油三酯是机体重要的储能和供能物质,半滑舌鲷血清甘油三酯含量随替代水平的升高而升高,这与高露姣等<sup>[40]</sup>在施氏鲷幼鱼上的研究一致。碱性磷酸酶(ALP)是生物体内碱性环境下水解磷酸酯的一组重要代谢调控酶,在机体非特异性免疫反应中发挥重要作用<sup>[38]</sup>。溶菌酶(LZM)是机体非特异性免疫的重要指标。本实验中,半滑舌鲷血清 ALP 和 LZM 活性均无显著性差异,这说明小麦胚芽油的添加没有影响半滑舌鲷的非特异免疫,这从实验鱼存活率数据也能看出来。MDA 是机体脂质过氧化作用的主要产物之一,可以反应机体细胞受自由基攻击的严重程度<sup>[39]</sup>。本实验中,血清 MDA 含量随替代水平的升高而逐渐降低,说明小麦胚芽油可能也具有抑制鱼体脂质过氧化的作用。

### 3.5 小麦胚芽油替代鱼油对半滑舌鲷脂肪代谢酶的影响

肝是鱼类脂肪酸  $\beta$ -代谢和脂肪合成的主要器官,其脂肪分解酶主要包括脂蛋白脂酶(LPL)和肝脂酶(HL),合称总脂酶。LPL 能催化极低密度脂蛋白和乳糜微粒所携带的甘油三酯水解成为甘油和脂肪酸供组织储存和利用<sup>[40]</sup>。HL 具多种脂酶活性,可作为配体促进低密度脂蛋白和乳糜微

粒进入肝细胞,并直接参与高密度脂蛋白胆固醇的逆转运和高密度脂蛋白的分解<sup>[41]</sup>。本研究表明,小麦胚芽油替代鱼油导致鱼体肝 LPL 和 HL 活性升高,说明小麦胚芽油的添加可能促进了鱼体脂肪代谢。梁旭方等<sup>[45]</sup>研究表明,脂肪酸不饱和度的增加,可促进 LPL 基因的表达,从而使肝 LPL 的合成增加,HL 活性升高原因可能与此类似。半滑舌鲷肝脂肪酸合成酶(FAS)活性随替代水平的升高而升高,这可能是饲料中 n-3PUFA 含量的降低有关。研究表明,饲料多不饱和脂肪酸可抑制 FAS 基因的表达<sup>[43]</sup>,而 n-3PUFA 对 FAS 基因转录的抑制比 n-6PUFA 更有效<sup>[44]</sup>,Clarke<sup>[48]</sup>研究认为,鱼油在抑制脂肪酸合成酶基因转录上比植物油更为有效。肠道脂肪酶活性的高低直接反映了肠道对脂肪的消化吸收能力,半滑舌鲷肠道脂肪酶(LPS)活性随替代水平的升高而升高,这表明在本实验条件下,小麦胚芽油的添加可能促进脂肪的消化吸收,本实验鱼体脂肪含量的降低也说明了这一点。

#### 4 结论

本实验条件下,小麦胚芽油可部分替代(60%)饲料鱼油而不影响半滑舌鲷幼鱼的生长和存活,且能促进鱼体脂肪代谢,抑制脂质过氧化作用,但显著改变了鱼体脂肪酸组成。

#### 参考文献:

- [1] Thanuthong T, Francis D S, Senadheera S D, et al. Fish oil replacement in rainbow trout diets and total dietary PUFA content: I) Effects on feed efficiency, fat deposition and the efficiency of a finishing strategy[J]. Aquaculture, 2011, 320(1-2): 82-90.
- [2] Ng W K, Chong C Y, Wang Y, et al. Effects of dietary fish and vegetable oils on the growth, tissue fatty acid composition, oxidative stability and vitamin E content of red hybrid tilapia and efficacy of using fish oil finishing diets[J]. Aquaculture, 2013, 373-375: 97-110.
- [3] Tocher D R, Bell J G, Dick J R, et al. Polyunsaturated fatty acid metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar*) undergoing parr-smolt transformation and the effects of dietary linseed and rapeseed oils[J]. Fish Physiol Biochem, 2000, 23(1): 59-73.
- [4] Benedito-Palos L, Saera-Vila A, Calduch-Giner J A, et al. Combined replacement of fish meal and oil in practical diets for fast growing juveniles of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.): Networking of systemic and local components of GH/IGF axis[J]. Aquaculture, 2007, 267(1-4): 199-212.
- [5] Xie D Z, Wang S Q, You C H, et al. Influencing factors and mechanisms on HUFA biosynthesis in teleosts[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(2): 456-466.[谢蒂芝, 王树启, 游翠红, 等. 鱼类高度不饱和脂肪酸合成的影响因素及其机理[J]. 中国水产科学, 2013, 20(2): 456-466.]
- [6] Qin C J, Xie J, Wang Y M, et al. The effect of vegetable oil replacement of fish oil on lipid metabolism in fish[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2013(4): 89-100.[覃川杰, 颀江, 王永明, 等. 植物油替代鱼油影响鱼类脂肪代谢的研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2013(4): 89-100.]
- [7] Hu P, Cai R B, Wang W L, et al. Advances in extraction process of wheat germ oil[J]. Food and Nutrition in China, 2009(2): 35-37.[胡鹏, 蔡荣宝, 王文亮, 等. 小麦胚芽油提取工艺研究进展[J]. 中国食物与营养, 2009(2): 35-37.]
- [8] Zhu K X, Zhu Z, Zhou H M. Review of research progress on oil and protein in wheat germ[J]. Cereals & Oils, 2006(7): 6-9.[朱科学, 朱振, 周慧明. 小麦胚芽油及胚芽蛋白质国内外研究进展[J]. 粮食与油脂, 2006(7): 6-9.]
- [9] Gorusupudi A, Baskaran V. Wheat germ oil: A potential facilitator to improve lutein bioavailability in mice[J]. Nutrition, 2013, 29(5): 790-795.
- [10] Chang C L, Haas E, Mina A M M, et al. Dietary wheat germ oil and age influences fatty acid compositions in adult oriental fruit flies[J]. J Asia-Pac Entomol, 2013, 16(3): 285-292.
- [11] Li S Z, Wang H M. Fauna Sinica Ostichthyes Pleuronectiforms[M]. Beijing: Science Press, 1995, 68: 94-98.[李思忠, 王惠民. 中国动物志: 硬骨鱼纲、鲽形目[M]. 北京: 科学出版社, 1995, 68: 94-98.]
- [12] Chang Q. Studies on the nutritional physiology and development of artificial microdiets of tongue sole (*Cynolossus semilaevis*) larvae and post-larvae[D]. Qindao: Ocean University of China, 2006.[常青. 半滑舌鲷仔稚鱼营养生理与开口饲料的开发研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.]
- [13] Folch J, Lees M, Stanley G H S. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues[J]. J Biol Chem, 1957, 226: 497-509.
- [14] Metcalfe L D, Schmitz A A, Pelka J R. Rapid preparation of fatty acid esters from lipides for gas chromatographic analysis[J]. Anal Chem, 1966, 38(3): 514-515.
- [15] Ma J J, Wang J Y, Sun J Z, et al. Effect of dietary DHA to EPA ratios on growth performance, body composition and serum physiological parameters in juvenile *Platichthys stel-*

- latus[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(2): 244–256.[马晶晶, 王际英, 孙建珍, 等. 饲料中 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼生长、体组成及血清生理指标的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(2): 244–256.]
- [16] Izquierdo M S, Montero D, Robaina L, et al. Alterations in fillet fatty acid profile and flesh quality in gilthead seabream (*Sparus aurata*) fed vegetable oils for a long term period. Recovery of fatty acid profiles by fish oil feeding[J]. Aquaculture, 2005, 250(1–2): 431–444.
- [17] Bowyer J N, Qin J G, Smullen R P, et al. Replacement of fish oil by poultry oil and canola oil in yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) at optimal and suboptimal temperatures[J]. Aquaculture, 2012, 356–357: 211–222.
- [18] Turchini G M, Torstensen B E, Ng W K. Fish oil replacement in finfish nutrition[J]. Rev Aquac, 2009, 1(1): 10–57.
- [19] Xu Y Q, Zhong M, Ding Z K. Influence and mechanism of poly unsaturated fatty acids on fish feed conversion ratio[J]. Feed Industry, 2010, 31(8): 46–50.[许友卿, 钟鸣, 丁兆坤. 多不饱和脂肪酸对鱼饲料转化率的影响及其机理[J]. 饲料工业, 2010, 31(8): 46–50.]
- [20] Moraes S, Caballero M J, Conceição L E C, et al. Dietary neutral lipid level and source in Senegalese sole (*Solea senegalensis*) larvae: Effect on growth, lipid metabolism and digestive capacity[J]. Comp Biochem Physiol B: Biochem Mol Biol, 2006, 144: 57–69.
- [21] Xiang X, Zhou X H, Chen J, et al. Effects of dietary lipid levels on the activity of digestive enzymes of juvenile Erythroculter ilishaeformis[J]. Journal of Beijing Fisheries, 2008(5): 35–38.[向象, 周兴华, 陈建, 等. 饲料中脂肪含量对翘嘴红鲌幼鱼消化酶活性的影响[J]. 北京水产, 2008(5): 35–38.]
- [22] Sargent J, Bell G, McEvoy L, et al. Recent developments in the essential fatty acid nutrition of fish[J]. Aquaculture, 1999, 177(1–4): 191–199.
- [23] Sargent J R, Bell J G, Henderson R J, et al. Origins and function of n-3 polyunsaturated fatty acids in marine organisms[M]//Ceve G, Palatauf F, Ed. Phospholipids: Characterization, Metabolism and Novel Biological Applications. Champaign: American Oil Chemical Society Press, 1995: 248–259.
- [24] Gatesoupe F J, Leger C, Boudon M, et al. Lipid feeding of turbot (*Scophthalmus maximus* L.): 2. Influence on growth of supplementation with methyl-esters of linolenic acid and fatty acids of  $\omega$  9 series[J]. Ann Hydrobiol, 1977, 8(2): 247–254.
- [25] Lee S M, Lee J H, Kim K D. Effect of dietary essential fatty acids on growth, body composition and blood chemistry of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*)[J]. Aquaculture, 2003, 225(1–4): 269–281.
- [26] Kim K D, Lee S M. Requirement of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids for juvenile flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. Aquaculture, 2004, 229(1–4): 315–323.
- [27] Liu X W, Mai K S, Ai Q H. Advances in nutrition physiology of flatfish[J]. China Feed, 2011(14): 32–37.[刘新旺, 麦康森, 艾庆辉. 鲆鲷鱼营养生理研究进展[J]. 中国饲料, 2011(14): 32–37.]
- [28] Li M Z, Ma H M. Essential fatty acid synthesis ability of marine fish[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(Sup.): 59–64.[李明珠, 马洪明. 海水鱼类必需脂肪酸的合成能力[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(增刊): 59–64.]
- [29] Ye H, Wang J W, Luo H. Effect and mechanism of PUFA on the expression of lipid metabolism gene[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2006, 34(15): 3689–3691.[叶华, 王继文, 罗辉. PUFA 对脂肪代谢基因表达的影响及其作用机制[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(15): 3689–3691.]
- [30] Zhu Q G, Lin J B, Huang Z C, et al. Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth and muscle fatty acid composition of juvenile grouper (*Epinephelus coioides*) [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2012, 32(4): 20–28.[朱庆国, 林建斌, 黄种持, 等. 饲料中不同水平 n-3 HUFA 对斜带石斑鱼幼鱼生长及肌肉脂肪酸组成的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2012, 32(4): 20–28.]
- [31] Gao C R, Lei J L. Effects of different lipids on growth, survival and tissue fatty acid composition of juvenile Pagrosomus major[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1999, 6(3): 55–60.[高淳仁, 雷霖霖. 不同脂肪源对真鲷幼鱼生长、存活及体内脂肪酸组成的影响[J]. 中国水产科学, 1999, 6(3): 55–60.]
- [32] Peng M, Xu W, Mai K S, et al. Growth performance, fatty acids composition and lipid deposition in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) fed diets with various fish oil substitution levels by linseed oil[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(8): 1131–1139.[彭墨, 徐玮, 麦康森, 等. 亚麻籽油替代鱼油对大菱鲆幼鱼生长、脂肪酸组成及脂肪沉积的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(8): 1131–1139.]
- [33] Bell J G, Tocher D R, Farndale B M, et al. The effect of dietary lipid on polyunsaturated fatty acid metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar*) undergoing parr-smolt transformation[J]. Lipids, 1997, 32(5): 515–525.
- [34] Han F F, Wang Y Z. The application of essential fatty acids in the feed of fish and shrimp[J]. Feed Research, 2004(1): 15–19.[韩菲菲, 汪以真. 必需脂肪酸在鱼虾饲料中的应用[J]. 饲料研究, 2004(1): 15–19.]
- [35] Zhang C J, Shi Z H, Wang J G, et al. On salinity-related

- effects on osmoregulation mechanism in marine teleost[J]. Marine Fisheries, 2013, 35(1): 108–116.[张晨捷, 施兆鸿, 王建刚, 等. 盐度影响海水硬骨鱼类渗透压调节机理的研究与展望[J]. 海洋渔业, 2013, 35(1): 108–116.]
- [36] Watanabe T, Takeuchi T, Arakawa T, et al. Requirement of juvenile striped jack *Longirostris delicatissimus* for n-3 highly unsaturated fatty acids[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1989, 55: 1111–1117.
- [37] Liu X W, Tan B P, Mai K S, et al. Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth and fatty acid composition of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2007, 31(2): 190–196.[刘新旺, 谭北平, 麦康森, 等. 饲料中不同水平 n-3HUFA 对军曹鱼生长及脂肪酸组成的影响[J]. 水生生物学报, 2007, 31(2): 190–196.]
- [38] Zhu M, Yu J L. Application of arachidonic acid in aquatic feed[J]. China Feed, 2005(5): 29–31.[朱敏, 余江龙. 花生四烯酸在水产饲料中的应用[J]. 中国饲料, 2005(5): 29–31.]
- [39] Tang C H, Xu J X, Peng Z Y. Recent research of fatty acids nutrition and function[J]. China Oils and Fats, 2000, 25 (6): 20–25.[唐传核, 徐建祥, 彭志英. 脂肪酸营养与功能的最新研究[J]. 中国油脂, 2000, 25 (6): 20–25.]
- [40] Gao L J, Shi Z H, Ai C X. Effect of dietary lipid sources on the serum biochemical indices of *Acipenser schrenckii* juvenile[J]. Marine Fisheries, 2005, 27(4): 319–323.[高露姣, 施兆鸿, 艾春香. 不同脂肪源对施氏鲟幼鱼血清生化指标的影响[J]. 海洋渔业, 2005, 27(4): 319–323.]
- [41] Yano T. The non-specific immune system: humoral defense[C]//Iwama G, Nakanishi T, Eds. The fish immune system: organism, pathogen and environment, San Diego: Academic Press, 1996: 105–107.
- [42] Wang C M, Luo L, Zhang G Z, et al. Effect of dietary lipid level on growth, body composition and antioxidant capacity of juvenile Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus*)[J]. Freshwater Fisheries, 2010, 40(5): 47–53.[王朝明, 罗莉, 张桂众, 等. 饲料脂肪水平对胭脂鱼幼鱼生长、体组成和抗氧化能力的影响[J]. 淡水渔业, 2010, 40(5): 47–53.]
- [43] Zechner R. The tissue-specific expression of lipoprotein lipase: implications for energy and lipoprotein metabolism [J]. Curr Opin Lipidology, 1997, 8(2): 77–88.
- [44] Choi S Y, Goldberg I J, Curtiss L K, et al. Interaction between ApoB and hepatic lipase mediates the uptake of ApoB-containing lipoproteins[J]. J Biol Chem, 1998, 273(32): 20456–20462.
- [45] Liang X F, Li Y Q, Li G S, et al. Cis-acting element and in vivo regulation of lipoprotein lipase gene of red sea bream *pagrosomus major*[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(4): 49–55.[梁旭方, 李月琴, 李贵生, 等. 真鲷脂蛋白脂肪酶基因顺式元件 PPPE 及在肝活体调控作用[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(4): 49–55.]
- [46] Gélinau A, Corraze G, Boujard T, et al. Relation between dietary lipid level and voluntary feed intake, growth, nutrient gain, lipid deposition and hepatic lipogenesis in rainbow trout[J]. Reprod Nutr Dev, 2001, 41: 487–503.
- [47] Smith D R, Knabe D A, Smith S B. Depression of lipogenesis in swine adipose tissue by specific dietary fatty acids[J]. J Anim Sci, 1996, 74: 975–983.
- [48] Clarke S D. Regulation of fatty acid synthase gene expression: an approach for reducing fat accumulation[J]. J Anim Sci, 1993, 71: 1957–1966.

## Effects of replacing fish oil with wheat germ oil on growth performance, body composition, serum biochemical indices, and lipid metabolic enzymes in juvenile *Cynoglossus semilaevis* Günter

HUANG Yu<sup>1,2</sup>, WANG Jiying<sup>2</sup>, LI Baoshan<sup>2</sup>, HAO Tiantian<sup>2,3</sup>, XIA Bin<sup>2</sup>, SUN Yongzhi<sup>2</sup>, WEI Jiali<sup>1,2</sup>, WANG Shixin<sup>2</sup>, ZHANG Limin<sup>2</sup>

1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Resources and Environment Research Institute, Yantai 264006, China;

3. Shengsuo Fishery Feed Research Centre of Shangdong Province, Yantai 265500, China

**Abstract:** A 68-d feeding trial was conducted to investigate the effects of replacing fish oil with dietary wheat germ oil on growth, body composition, serum biochemical indices, and lipid metabolic enzymes in juvenile *Cynoglossus semilaevis* Günter [initial body weight, (3.70±0.01) g]. Six isonitrogenous and isoenergetic experimental diets were formulated with 0, 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% replacement of the fish oil with wheat germ oil. Survival rate was similar among the fish fed the different diets ( $P>0.05$ ). Specific growth rate and the protein efficiency ratio decreased with increasing replacement level; the 80% and 100% replacement groups were significantly lower than the control group ( $P<0.05$ ), whereas the feed conversion ratio showed a reverse trend [80% and 100% replacement groups were significantly higher than control group ( $P<0.05$ )]. No significant differences were observed in the viscerosomatic index, hepatosomatic index, or condition factor ( $P>0.05$ ). Liver fat content increased with increasing replacement level, whereas whole fish fat content decreased; whole fish water content in the 80% and 100% replacement groups was significantly higher than that in the control group ( $P<0.05$ ). Muscle and liver  $C_{18:3n-3}$  and  $C_{18:2n-6}$  concentrations increased significantly with increasing wheat germ oil level ( $P<0.05$ ), whereas  $C_{20:5n-3}$  and  $C_{22:6n-3}$  concentrations decreased significantly ( $P<0.05$ ). No differences in serum glutamic-pyruvate transaminase, glutamic-oxaloacetic transaminase, or alkaline phosphatase ( $P>0.05$ ) were detected. Serum triglyceride and total cholesterol levels decreased with increasing replacement level; the 80% and 100% replacement groups were significantly higher than the control group ( $P<0.05$ ). No significant difference was found in serum lysozyme activity ( $P>0.05$ ), but serum malondialdehyde content decreased. Hepatopancreas lipoprotein lipase, hepatic lipase, fatty acid synthase, and intestinal lipase activities increased with increasing replacement level. These results suggest that wheat germ oil can replace 60% of fish oil without significantly affecting growth of juvenile *C. semilaevis* Günter. Wheat germ oil promoted body fat metabolism and inhibited lipid peroxidation but significantly changed fatty acid composition in tissues.

**Key words:** *Cynoglossus semilaevis* Günter; wheat germ oil; fish oil; growth; body composition; serum biochemistry; fat-metabolizing enzymes

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