

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180709002

http://www.yykxjz.cn/

李本相, 卫育良, 梁萌青, 徐后国, 曲江波. 水解鱼蛋白对大菱鲆生长、体组成及肌纤维组织形态结构的影响. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 155-165

Li BX, Wei YL, Liang MQ, Xu HG, Qu JB. The effects of fish protein hydrolysate on the growth, body composition and morphological structure of muscle fiber of turbot (*Scophthalmus maximus* L.). Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(5): 155-165

## 水解鱼蛋白对大菱鲆生长、体组成及肌纤维组织形态结构的影响\*

李本相<sup>1,2</sup> 卫育良<sup>2</sup> 梁萌青<sup>2①</sup> 徐后国<sup>2</sup> 曲江波<sup>3</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071; 3. 烟台开发区天源水产有限公司 烟台 264006)

**摘要** 本实验设计6种等氮等脂的饲料, 研究水解鱼蛋白对大菱鲆(*Scophthalmus maximus* L.)生长、饲料利用、体组成和肌肉纤维组织形态结构的影响。实验设2个对照组, 正对照组鱼粉为44%, 负对照组鱼粉为22%; 设4个实验组, PH18A组为22%的鱼粉和18%的水解鱼蛋白, PH4.5A组为22%的鱼粉和4.5%的水解鱼蛋白, PH4.5B组为17%的鱼粉和4.5%的水解鱼蛋白, PH18B组为0.5%的鱼粉和18%的水解鱼蛋白。研究表明, PH4.5A组和PH18B组的特定增长率无显著差异( $P>0.05$ ), 但显著高于PH4.5B组和负对照组( $P<0.05$ ), 显著低于正对照组和PH18A组( $P<0.05$ ); PH18A组的特定生长率显著高于正对照组( $P<0.05$ )。正对照组和PH18A组的饲料效率、蛋白质效率和蛋白质沉积率无显著差异( $P>0.05$ ), 但依次显著高于PH18B组、PH4.5A组和负对照组( $P<0.05$ ); 摄食率的变化趋势则相反。PH4.5B组和负对照组的粗脂肪和粗蛋白含量无显著差异( $P>0.05$ ), 显著低于正对照组和PH18A组( $P<0.05$ )。6个处理组的大菱鲆肌肉总氨基酸、必需氨基酸和非必需氨基酸均无显著差异( $P>0.05$ )。PH18A组的肌纤维横截面积显著高于PH18B组、正对照组、PH4.5A组、负对照组和PH4.5B组( $P<0.05$ ), 而PH18B组显著高于PH4.5B组( $P<0.05$ )。PH18A组和PH18B组的肌纤维密度显著低于PH4.5B组( $P<0.05$ )。研究表明, 在高植物蛋白饲料中4.5%和18%的水解鱼蛋白, 均可以提高大菱鲆的饲料效率和蛋白沉积率, 促进大菱鲆的生长, 且18%的水解鱼蛋白好于4.5%; 同时, 18%的水解鱼蛋白促进大菱鲆肌肉纤维横截面积的增加, 促进大菱鲆的肌肉纤维密度的降低, 而4.5%的水解鱼蛋白对大菱鲆肌纤维的横截面积和肌纤维的密度均无显著的作用。

**关键词** 大菱鲆; 水解鱼蛋白; 生长性能; 肌肉纤维

中图分类号 S963 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2019)05-0155-11

水解鱼蛋白(Fish protein hydrolysate, FPH)是将水产品加工下脚料在一定条件下水解后获得的一种含游离氨基酸和不同肽链长度多肽的蛋白质寡肽

(Liaset *et al*, 2008; 王新星等, 2011)。目前, 国内外关于水解鱼蛋白对肉食性鱼类生长性能的影响开展了大量研究, 相关的研究表明, 将水解鱼蛋白以适当的

\* 中国博士后科学基金(2018M632751)、国家自然科学基金(31672663)和青岛市博士后应用研究项目共同资助 [This work was supported by China Postdoctoral Science Foundation (2018M632751), National Natural Science Foundation of China (31672663), and Applied Research Program for Post-Doctoral in Qingdao]. 李本相, E-mail: 1005786450@qq.com

① 通讯作者: 梁萌青, 研究员, E-mail: liangmq@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2018-07-09, 收修改稿日期: 2018-09-05

比例添加至高植物蛋白饲料中,能显著提高大部分肉食性鱼类的生长和饲料利用(Espe *et al.*, 1999; Zheng *et al.*, 2012; 卫育良等, 2014);但对于其如何影响肌纤维的形态结构却缺乏研究。多细胞动物的基本结构包括上皮组织、结缔组织、肌肉组织和神经组织4种,其中,具有收缩能力的肌肉组织是动物生存和运动的基本保障,也是水产品主要的可食部分,而肌纤维是肌肉的基本构成单位,肌纤维横截面积和肌纤维密度是描述肌纤维组织形态结构的2个主要特征。有研究报告,在一定范围内,随着饲料中水解鱼蛋白的增加,罗非鱼的肌纤维横截面积出现显著增加的趋势(Silva *et al.*, 2017),这表明,水解鱼蛋白对鱼类的肌纤维可能具有重要的调控作用。因此,有必要进一步开展水解鱼蛋白对肉食性鱼类肌肉纤维组织形态结构影响的研究。

作为我国北方工厂化养殖重要的肉食性海水鱼类,本团队先后开展了水解鱼蛋白对大菱鲆(*Scophthalmus maximus* L.)生长性能、蛋白质代谢、脂肪沉积、非特异性免疫等方面的研究工作(卫育良等, 2014; 牟玉超等, 2016; Wei *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2016; Zheng *et al.*, 2013a),然而,水解鱼蛋白如何影响大菱鲆肌肉纤维组织形态结构仍然缺乏研究。因此,本实验以大菱鲆为研究对象,通过在饲料中添加不同水平的水解鱼蛋白,研究水解鱼蛋白对大菱鲆生长、体组成和肌纤维组织形态结构的影响,以期在水解鱼蛋白在大菱鲆配合饲料的应用进一步提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 水解鱼蛋白的制备

水解鱼蛋白的制备以太平洋狭鳕鱼(*Theragra chalcogramma*)为原料,参照 Zheng 等(2012)的方法进行制备。水解鱼蛋白的化学组成及氨基酸组成见表1。

### 1.2 实验饲料

本实验饲料配方以鱼粉、水解鱼蛋白为主要动物蛋白源,以花生粕、大豆浓缩蛋白、谷朊粉和玉米蛋白为主要植物蛋白源,以鱼油和豆油为主要脂肪源;实验设2个对照组,正对照组鱼粉为44%,负对照组鱼粉为22%,设4个实验组,PH18A组为22%的鱼粉和18%的水解鱼蛋白,PH4.5A组为22%的鱼粉和4.5%的水解鱼蛋白,PH4.5B组为17%的鱼粉和4.5%的水解鱼蛋白,PH18B组为0.5%的鱼粉和18%的水解鱼蛋白。实验饲料配方及营养组成见表2,实验饲

表1 水解鱼蛋白的化学组成和氨基酸组成(%干物质)  
Tab.1 The proximate chemical composition and amino acid composition of fish protein hydrolysate (% Dry matter)

分析指标 Analysis index	水解鱼蛋白 Fish protein hydrolysate
化学组成 Chemical composition	
粗蛋白 Crude protein	82.20
粗脂肪 Crude lipid	0.36
氨基酸 Amino acid	
必需氨基酸 EAA	
苏氨酸 Thr	3.90
缬氨酸 Val	4.57
蛋氨酸 Met	2.78
异亮氨酸 Ile	3.90
亮氨酸 Leu	6.83
苯丙氨酸 Phe	4.29
赖氨酸 Lys	8.14
精氨酸 Arg	6.30
组氨酸 His	1.53
非必需氨基酸 NEAA	
牛磺酸 Tau	0.83
天冬氨酸 Asp	9.26
丝氨酸 Ser	3.92
谷氨酸 Glu	15.40
甘氨酸 Gly	5.95
丙氨酸 Ala	5.35
半胱氨酸 Cys	0.59
酪氨酸 Tyr	2.58
脯氨酸 Pro	2.73
必需氨基酸 EAA	42.24
非必需氨基酸 NEAA	46.61

料的氨基酸组成见表3。

首先,将所有饲料原料粉碎后过80目筛网,然后,根据实验配方将原料混合均匀后制作成等氮等脂的颗粒饲料,在烘箱内50℃烘干,存放在-20℃冷库备用。

### 1.3 实验鱼及养殖管理

本实验以初始体重为(11.98±0.03)g的大菱鲆为饲养对象,于2017年8~10月在山东烟台开发区天源水产有限公司进行为期56d的养殖实验。实验开始前,进行为期14d的暂养实验,使鱼体适应养殖环境,然后,对大菱鲆幼鱼饥饿24h,选取健康有活力的大菱鲆幼鱼随机分配到18个桶中(6个处理,3个重复),每桶25尾鱼。养殖期间,每天早(07:30)晚(16:30)进行人工饱食投喂。

表 2 实验饲料配方及营养组成(%干物质)  
Tab.2 Formulation and proximate chemical composition of experimental diets (% Dry matter)

原料组成 Ingredients (%)	正对照 Positive control	PH4.5A	PH4.5B	PH18A	PH18B	负对照 Negative control
鱼粉 Fish meal	44.00	22.00	17.00	22.00	0.50	22.00
花生粕 Peanut meal	6.00	11.00	12.00	6.00	12.00	12.00
大豆浓缩蛋白 Soybean protein concentrate	9.00	14.00	15.00	9.00	15.00	15.00
谷朊粉 Wheat gluten	4.00	8.00	10.00	4.00	10.00	10.00
玉米蛋白 Corn protein	6.00	10.00	12.00	6.00	12.00	12.00
水解鱼蛋白 Fish protein hydrolysate	0.00	4.50	4.50	18.00	18.00	0.00
小麦粉 Wheat meal	19.00	17.10	15.80	21.50	17.20	15.60
鱼油 Fish oil	3.50	4.90	5.20	5.00	6.80	4.90
豆油 Soybean oil	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
卵磷脂 Soybean lecithin	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
矿物质混合物 Mineral premix <sup>1</sup>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
维生素混合物 Vitamin premix <sup>2</sup>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
氯化胆碱 Choline chloride	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
维生素 C Vitamin C	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
总计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养组成 Proximate composition (%)						
干物质 Dry matter	94.52	93.52	93.52	93.79	93.49	92.92
灰分 Ash	10.86	9.05	8.18	9.76	7.38	8.40
粗蛋白 Crude protein	51.09	50.58	50.79	50.55	50.50	50.62
粗脂肪 Crude lipid	11.01	10.95	10.72	10.86	11.06	10.14

注: 1: 矿物质混合物(mg/kg 饲料): 氟化钠, 2 mg; 碘化钾, 0.8 mg; 氯化钴, 50 mg; 硫酸铜, 10 mg; 硫酸铁, 80 mg; 硫酸锌, 50 mg; 硫酸镁, 1200 mg; 磷酸二氢钙, 3000 mg; 氯化钠, 100 mg; 沸石粉, 5.51 g; 2: 维生素混合物(mg/kg 饲料): 硫胺素, 25 mg; 核黄素, 45 mg; 盐酸吡哆醇, 20 mg; 维生素 B<sub>12</sub>, 0.1 mg; 维生素 K<sub>3</sub>, 10 mg; 肌醇, 800 mg; 泛酸, 60 mg; 烟酸, 200 mg; 叶酸, 20 mg; 生物素, 1.20 mg; 维生素 A, 32 mg; 维生素 D, 5 mg; 维生素 E, 120 mg; 次粉 3.67 g

Note: 1: Mineral premix (mg/kg) diet: NaF 2 mg; KI 0.8 mg; CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 50 mg; CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 10 mg; FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 80 g; ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 50 mg; MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 1200 mg; Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 3000 g; NaCl 100 g; Mordenzeo 5.51 g; 2: Vitamin premix (mg/kg): thiamine 25 mg; riboflavin 45 mg; pyridoxine 20 mg; vitamin B<sub>12</sub> 0.1 mg; menadione 10 mg; inositol 800 mg; pantothenate 60 mg; tocopherol acetate 200 mg; folic acid 20 mg; biotin 1.20 mg; vitamin A 32 mg; vitamin D 5 mg; vitamin E 120 mg; wheat flour 3.67 g

实验养殖条件如下: 用体积为 150 L 的圆柱形养殖桶; 采用深井海水, 流速为 5 L/min, 连续充气, 溶氧高于 7 mg/L, 流水养殖模式; 采用自然光照, 水温为 13℃~16℃; 盐度为 32, pH 为 7.5~8.0。

#### 1.4 样品采集及生化指标测定

**1.4.1 样品采集** 实验开始时, 随机取 20 尾健康有活力的大菱鲆, 保存于-20℃, 用于后续鱼体成分分析。实验结束时, 禁食 24 h, 称取每桶鱼的总重量, 记录每桶鱼的尾数, 用于计算相关生长指标。然后, 每桶取 3 尾大菱鲆, 取背部相同位置的肌肉, 分成 2 份, 1 份放入 Davison 固定液中固定保存, 用于肌

肉组织切片的分析, 1 份放入液氮中速冻, 于-80℃下保存, 用于肌肉氨基酸的测定。最后, 每桶取 5 尾全鱼, 于-20℃冰箱保存, 用于鱼体成分分析。

**1.4.2 常规及生化指标测定** 饲料和全鱼样品在 105℃烘干至恒重, 采用凯氏定氮法(VELP, UDK142 automatic distillation unit, 意大利)测定粗蛋白质含量; 采用索氏抽提法测定粗脂肪含量(FOSS 脂肪测定仪 SOXTEC 2050, 瑞典), 采用失重法测定灰分含量, 样品在马福炉中灼烧 16 h (550℃)。测定饲料、肌肉及水解鱼蛋白中氨基酸及牛磺酸组成的前处理。首先进行冷冻干燥, 然后在 110℃下用 6 mol/L 的 HCl 水解 22~24 h; 测定饲料中游离氨基酸的前处理, 采用 8% 的三氯乙酸

溶解, 涡旋 3 min, 超声波 15 min, 12000 r/min 离心 15 min, 前处理完成后, 所有氨基酸及牛磺酸均采用

日立 L-8900 型氨基酸分析仪(Hitachi L-8900 automatic amino acid analyzer, Hitachi, 日本)测得。

表 3 实验饲料的氨基酸组成(%干物质)  
Tab.3 The amino acid composition of experimental diets (% Dry matter)

氨基酸 Amino acid	正对照 Positive control		PH4.5A		PH4.5B		PH18A		PH18B		负对照 Negative control	
	AA	FAA	AA	FAA	AA	FAA	AA	FAA	AA	FAA	AA	FAA
必需氨基酸 EAA												
苏氨酸 Thr	1.63	0.040	1.35	0.145	1.55	0.080	1.33	0.213	1.29	0.208	1.51	0.031
缬氨酸 Val	2.47	0.048	2.25	0.196	2.44	0.107	2.01	0.286	2.10	0.281	2.38	0.037
蛋氨酸 Met	0.98	0.022	0.77	0.190	0.76	0.079	0.73	0.293	0.76	0.277	0.74	0.015
异亮氨酸 Ile	1.94	0.030	1.88	0.124	1.90	0.064	1.56	0.183	1.67	0.177	1.88	0.022
亮氨酸 Leu	3.75	0.067	3.80	0.320	4.08	0.174	3.02	0.476	3.65	0.471	4.00	0.057
苯丙氨酸 Phe	2.33	0.102	2.57	0.512	2.64	0.270	2.88	0.802	3.38	0.788	2.78	0.088
赖氨酸 Lys	2.33	0.070	2.10	0.238	1.83	0.147	2.22	0.331	1.86	0.317	1.75	0.053
组氨酸 His	1.04	0.269	0.98	0.209	0.97	0.140	0.80	0.247	0.77	0.120	0.93	0.142
精氨酸 Arg	3.76	0.110	4.02	0.386	3.90	0.222	3.29	0.567	3.52	0.569	3.77	0.101
非必需氨基酸 NEAA												
牛磺酸 Tau	0.36	0.280	0.30	0.244	0.25	0.163	0.33	0.298	0.20	0.170	0.25	0.150
天冬氨酸 Asp	3.65	0.039	3.31	0.096	3.63	0.068	3.64	0.131	2.95	0.130	3.50	0.036
丝氨酸 Ser	1.72	0.030	1.68	0.091	1.97	0.055	1.49	0.131	1.74	0.128	1.90	0.025
谷氨酸 Glu	8.75	0.088	9.83	0.197	11.24	0.139	9.33	0.262	9.71	0.253	10.87	0.081
甘氨酸 Gly	2.12	0.034	1.94	0.078	1.90	0.046	1.78	0.116	1.76	0.106	1.83	0.025
丙氨酸 Ala	4.16	0.099	3.39	0.179	3.36	0.119	2.98	0.238	2.99	0.216	3.29	0.074
半胱氨酸 Cys	0.65	0.016	0.81	0.075	0.75	0.038	0.56	0.113	0.40	0.114	0.35	0.014
酪氨酸 Tyr	1.52	0.031	1.85	0.116	1.87	0.070	2.23	0.178	2.42	0.178	1.88	0.025
脯氨酸 Pro	2.22	0.033	2.70	0.064	2.84	0.043	2.13	0.079	2.70	0.077	2.90	0.036
总氨基酸 TAA	45.35	1.333	45.55	3.237	47.88	1.892	42.30	4.637	43.89	4.281	46.51	0.941
必需氨基酸 EAA	20.21	0.717	19.74	2.170	20.06	1.200	17.85	3.187	19.01	2.998	19.73	0.509
非必需氨基酸 NEAA	25.13	0.615	25.81	1.067	27.82	0.692	24.45	1.451	24.88	1.283	26.78	0.432
EAA/TAA(%)	44.57	53.839	43.34	67.048	41.90	63.403	42.19	68.715	43.31	70.029	42.42	54.072
EAA/NEAA(%)	80.40	116.635	76.49	203.472	72.10	173.245	72.99	219.645	76.41	233.652	73.67	117.734

注: AA: 氨基酸; TAA: 总氨基酸; FAA: 游离氨基酸; EAA: 必需氨基酸; NEAA: 非必需氨基酸。下同

Note: AA: Amino acid; TAA: Total amino acid; FAA: Free amino acid; EAA: Essential amino acid; NEAA: Non-essential amino acid. The same as below

## 1.5 样本切片制备及测量方法

**1.5.1 石蜡切片的制备** 肌肉样本按常规 H.E 染色, 石蜡包埋后用石蜡切片机切片, 注意包埋时肌纤维长轴与蜡块切片垂直, 制成横切片(厚度为 6 μm)。

**1.5.2 肌纤维横截面积和密度的测定** 本实验主要针对肌纤维横截面积和密度进行统计分析。于 10×20 倍镜下拍照, 测其肌纤维横截面积, 每个处理 3 个重复, 每个重复选取 6 条肌纤维, 用 Photoshop 软件根据标尺测定肌纤维长径(沿各个方向测定的肌纤维横截面轮廓两边界间平行线之间距离的最大值)

和短径(沿各个方向测定的肌纤维横截面轮廓两边界间平行线之间距离的最小值), 并根据椭圆面积计算公式(面积=0.25×π×长径×短径)计算肌肉纤维横截面积。其次, 将切片于 10×4 倍镜下随机选取视野, 每个处理 3 个重复, 每个重复选取 6 个视野, 拍照后用 Photoshop 软件根据标尺计算 0.088 mm<sup>2</sup> 内肌肉纤维个数, 并换算成 1 mm<sup>2</sup> 内肌肉纤维的个数, 得到肌肉纤维密度。

## 1.6 数据计算与统计方法

成活率(Survival rate, SR,%)=100×实验结束每桶鱼尾数/实验开始每桶鱼尾数

特定生长率(Specific growth rate, SGR, %/d)= $100 \times [\ln(\text{终末体重}) - \ln(\text{初始体重})] / \text{实验天数}$

摄食率(Feed intake, FI, %/d)= $100 \times \text{每尾鱼摄食的饲料干物质重} / [(\text{实验结束时鱼体重} + \text{实验开始时鱼体重}) / 2 \times \text{养殖实验天数}]$

饲料效率(Feed efficiency, FE)=(终末体重-初始体重)/每尾鱼摄食的饲料干物质重

增重率(Weight gain rate, WGR, %)= $100 \times (\text{终末体重} - \text{初始体重}) / \text{初始体重}$

蛋白质效率(Protein efficiency ratio, PER)=(终末体重-初始体重)/蛋白摄入量

蛋白沉积率(Protein productive value, PPV, %)= $100 \times [(\text{实验终鱼体蛋白含量} - \text{实验初鱼体蛋白含量}) / \text{蛋白摄入量}]$

所有实验数据均用平均值±标准误(Mean±SE)表示, 数据采用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 差异显著( $P < 0.05$ )后, 进行 Tukey 多重比较(Tukey's multiple comparison tests)。

## 2 实验结果

### 2.1 水解鱼蛋白对大菱鲆生长性能及饲料利用的影响

不同饲料处理对大菱鲆生长及饲料利用的影响见表 4。6 个处理组的存活率均无显著差异( $P > 0.05$ )。与正对照组相比, 除 PH18A 组的特定生长率显著高于正对照组外( $P < 0.05$ ), PH4.5A 组、PH4.5B 组和 PH18B 组显著低于正对照组( $P < 0.05$ ), 饲料效率、蛋白质沉积率和蛋白质效率变化趋势与特定生长率相似; 摄食率除 PH18A 组和 PH18B 组与正对照组无显著差异外( $P > 0.05$ ), PH4.5A 组和 PH4.5B 组的摄食率显著高于正对照组( $P < 0.05$ )。与负对照组相比, PH4.5A 组、PH4.5B 组、PH18A 组和 PH18B 组的特定生长率显著高于负对照组( $P < 0.05$ ); 饲料效率、蛋白质效率和蛋白质沉积率的变化趋势与特定生长率相似; 摄食率在 PH4.5B 组显著高于负对照组( $P < 0.05$ ), PH4.5A 组的摄食率与负对照组无显著差异( $P > 0.05$ ), PH18A 组和 PH18B 组的摄食率均显著低于负对照组( $P < 0.05$ )。

表 4 水解鱼蛋白对大菱鲆生长和饲料利用的影响(平均值±标准误)

Tab.4 The effects of fish protein hydrolysate on the growth and feed utilization of turbot (Mean±SE)

项目 Items	正对照 Positive control	PH4.5A	PH4.5B	PH18A	PH18B	负对照 Negative control
初始体重 Initial body weight(g)	11.98±0.03	11.98±0.03	11.98±0.03	11.98±0.03	11.98±0.03	11.98±0.03
存活率 Survival rate (%)	100.00	100.00	97.33±2.67	96.67±3.06	98.67±1.33	100.00
特定生长率 Special growth rate(%/d)	2.26±0.03 <sup>d</sup>	1.69±0.09 <sup>c</sup>	1.09±0.03 <sup>b</sup>	2.51±0.01 <sup>e</sup>	1.88±0.02 <sup>c</sup>	0.83±0.04 <sup>a</sup>
增重率 Weight gain rate(%)	255.04±6.08 <sup>c</sup>	158.76±13.70 <sup>b</sup>	83.95±3.03 <sup>a</sup>	307.88±3.64 <sup>d</sup>	186.68±3.20 <sup>b</sup>	59.04±3.88 <sup>a</sup>
饲料效率 Feed efficiency ratio	1.26±0.02 <sup>d</sup>	0.74±0.04 <sup>b</sup>	0.41±0.00 <sup>a</sup>	1.28±0.03 <sup>d</sup>	1.03±0.02 <sup>c</sup>	0.42±0.03 <sup>a</sup>
摄食率 Feed intake(%/d)	1.59±0.03 <sup>a</sup>	2.13±0.02 <sup>b</sup>	2.52±0.07 <sup>c</sup>	1.65±0.03 <sup>a</sup>	1.67±0.03 <sup>a</sup>	1.96±0.05 <sup>b</sup>
蛋白质效率 Protein efficiency ratio	2.46±0.04 <sup>d</sup>	1.46±0.08 <sup>b</sup>	0.82±0.01 <sup>a</sup>	2.54±0.01 <sup>d</sup>	2.04±0.05 <sup>c</sup>	0.82±0.05 <sup>a</sup>
蛋白质沉积率 Protein productive value(%)	35.89±0.71 <sup>d</sup>	20.48±1.52 <sup>b</sup>	10.5±0.48 <sup>a</sup>	37.05±0.43 <sup>d</sup>	29.33±1.04 <sup>c</sup>	9.17±0.59 <sup>a</sup>

注: 同行数据上标不同字母表示存在显著差异( $P < 0.05$ )。下同

Note: Values in the same row with different superscripts were significantly different ( $P < 0.05$ ). The same as below

### 2.2 水解鱼蛋白对鱼体体组成及肌肉氨基酸组成的影响

不同饲料处理对大菱鲆体组成的影响见表 5。与正对照组相比, 除 PH4.5B 组的粗蛋白含量显著低于正对照组外( $P < 0.05$ ), PH4.5A 组、PH18A 组和 PH18B 组的粗蛋白与正对照组无显著差异( $P > 0.05$ ), 粗脂肪变化趋势与粗蛋白相同; 除 PH18A 组和 PH18B 组的水分含量与正对照组无显著差异外( $P > 0.05$ ), PH4.5B 组和 PH4.5A 组的水分含量显著高于正对照组( $P < 0.05$ ), 灰分含量变化趋势与水分相似。与负对照组相比, 除 PH4.5B 组和负对照组的粗蛋白差异不显著外( $P > 0.05$ ),

PH4.5A 组、PH18A 组和 PH18B 组的粗蛋白显著高于负对照组( $P < 0.05$ ); 除 PH18A 组的粗脂肪显著高于负对照组外( $P < 0.05$ ), PH4.5A 组、PH4.5B 组和 PH18B 组的粗脂肪含量与负对照组无显著差异( $P > 0.05$ ); 除 PH4.5A 组、PH4.5B 组的水分和负对照组无显著外( $P > 0.05$ ), PH18A 组和 PH18B 组的水分含量显著低于负对照组( $P < 0.05$ ), 灰分含量变化趋势与水分相似。

水解鱼蛋白对大菱鲆肌肉氨基酸组成的影响见表 6。6 个处理组之间总氨基酸含量无显著差异( $P > 0.05$ ); 必需氨基酸总量也无显著差异( $P > 0.05$ ), 但精氨酸在 PH4.5A 组的含量显著高于 PH18A 组、PH18B 组、

正对照组和负对照组( $P<0.05$ )。非必需氨基酸总量也无显著差异( $P>0.05$ ),但牛磺酸在 PH18B 组的含量显著低于 PH4.5B 组和负对照组( $P<0.05$ ),丙氨酸在 PH4.5A 组的含量显著低于 PH4.5B 组、PH18A 组、PH18B 组、

正对照组和负对照组( $P<0.05$ ),半胱氨酸在 PH4.5A 组、PH4.5B 组、PH18A 组、正对照组和负对照组的含量均存在显著差异( $P<0.05$ ),由高到低依次为正对照组、PH4.5A 组、PH18A 组、负对照组和 PH4.5B 组。

表 5 水解鱼蛋白对大菱鲆体成分的影响(平均值±标准误)  
Tab.5 The effects of fish protein hydrolysate on body composition of turbot (Mean±SE)

项目 Items	正对照 Positive control	PH4.5A	PH4.5B	PH18A	PH18B	负对照 Negative control
粗脂肪 Crude lipid (%)	4.01±0.32 <sup>c</sup>	2.88±0.22 <sup>abc</sup>	2.17±0.13 <sup>a</sup>	4.03±0.33 <sup>c</sup>	3.59±0.34 <sup>bc</sup>	2.36±0.13 <sup>ab</sup>
粗蛋白 Crude protein (%)	14.33±0.20 <sup>c</sup>	13.87±0.22 <sup>bc</sup>	13.33±0.21 <sup>ab</sup>	14.37±0.10 <sup>c</sup>	14.14±0.23 <sup>bc</sup>	12.77±0.10 <sup>a</sup>
水分 Moisture (%)	77.46±0.36 <sup>a</sup>	79.00±0.29 <sup>bc</sup>	79.85±0.12 <sup>bc</sup>	77.50±0.38 <sup>a</sup>	78.52±0.45 <sup>ab</sup>	80.03±0.05 <sup>c</sup>
灰分 Ash (%)	3.36±0.07 <sup>ab</sup>	3.61±0.11 <sup>b</sup>	4.16±0.04 <sup>c</sup>	3.38±0.07 <sup>ab</sup>	3.20±0.07 <sup>a</sup>	4.32±0.04 <sup>c</sup>

表 6 水解鱼蛋白对大菱鲆肌肉氨基酸组成的影响(平均值±标准误)(%干物质)  
Tab.6 The effects of fish protein hydrolysate on amino acid composition of turbot muscle (Mean±SE) (% Dry matter)

氨基酸 Amino acid	正对照 Positive control	PH4.5A	PH4.5B	PH18A	PH18B	负对照 Negative control
必需氨基酸 EAA						
苏氨酸 Thr	34.39±2.02	39.95±2.03	33.65±4.40	35.36±2.51	37.00±2.75	35.51±2.81
缬氨酸 Val	42.79±3.08	52.82±1.97	37.84±3.86	39.27±2.83	41.88±2.84	39.62±2.96
蛋氨酸 Met	21.17±1.79	30.87±2.60	19.53±2.31	21.07±2.01	20.20±2.30	20.31±2.76
异亮氨酸 Ile	36.98±2.01	45.07±1.85	37.20±3.96	38.03±2.65	39.08±2.28	36.58±2.81
亮氨酸 Leu	70.00±3.97	78.95±3.24	64.65±4.75	65.08±4.30	67.63±3.83	63.67±4.93
苯丙氨酸 Phe	41.93±3.05	50.41±4.48	49.40±2.83	42.19±4.86	45.27±3.19	39.22±2.30
赖氨酸 Lys	70.65±1.63	79.84±2.46	78.10±5.18	77.20±4.88	77.73±3.78	73.10±5.52
组氨酸 His	16.42±2.04	17.83±0.24	16.59±1.68	17.18±1.21	16.92±1.06	15.58±1.32
精氨酸 Arg	43.09±3.02 <sup>a</sup>	86.04±4.06 <sup>c</sup>	74.52±2.32 <sup>bc</sup>	58.82±0.34 <sup>ab</sup>	51.70±3.52 <sup>a</sup>	49.60±4.09 <sup>a</sup>
非必需氨基酸 NEAA						
牛磺酸 Tau	6.40±0.93 <sup>ab</sup>	7.33±0.27 <sup>ab</sup>	10.23±1.33 <sup>b</sup>	6.38±0.98 <sup>ab</sup>	5.53±0.67 <sup>a</sup>	9.96±0.46 <sup>b</sup>
天冬氨酸 Asp	81.92±1.35	84.89±3.29	72.25±6.63	80.55±5.72	83.89±6.93	80.47±6.56
丝氨酸 Ser	30.23±5.18	35.43±1.99	29.82±3.79	31.44±2.20	32.11±2.49	31.76±2.54
谷氨酸 Glu	131.29±0.73	132.82±1.04	141.68±6.27	132.25±8.88	136.30±10.03	131.86±10.34
甘氨酸 Gly	40.17±5.13	50.42±3.11	41.18±3.26	42.67±2.26	40.16±2.93	43.47±3.85
丙氨酸 Ala	43.10±5.13 <sup>a</sup>	79.55±2.49 <sup>b</sup>	48.88±4.40 <sup>a</sup>	49.74±2.80 <sup>a</sup>	51.55±3.17 <sup>a</sup>	49.93±3.71 <sup>a</sup>
半胱氨酸 Cys	9.68±0.28 <sup>c</sup>	8.58±0.20 <sup>d</sup>	3.73±0.19 <sup>a</sup>	6.31±0.09 <sup>c</sup>	5.71±0.30 <sup>bc</sup>	5.00±0.18 <sup>b</sup>
酪氨酸 Tyr	26.91±3.93	34.11±1.28	35.90±1.43	32.45±2.38	33.81±0.49	31.34±1.67
脯氨酸 Pro	28.08±2.92	31.94±0.82	27.77±2.35	30.02±1.61	29.93±1.74	31.28±2.12
总氨基酸 TAA	775.21±74.51	946.88±25.35	822.94±59.07	806.01±46.35	816.39±47.40	788.25±60.02
必需氨基酸 EAA	377.42±50.93	481.79±13.79	411.48±30.42	394.20±21.83	397.42±19.46	373.19±29.30
非必需氨基酸 NEAA	397.79±24.28	465.08±11.71	411.46±28.87	411.81±25.25	418.97±28.05	415.07±30.73

### 2.3 水解鱼蛋白对大菱鲆肌纤维组织形态结构的影响

水解鱼蛋白对大菱鲆肌纤维组织形态结构的影响见表 7。不同处理组 10×4 倍及 10×20 倍光学显微镜下大菱鲆肌纤维横截面切片视野见图 1。对于大菱鲆肌肉纤维长径和短径, PH18A 组的肌纤维长径显著高于 PH4.5B 组( $P<0.05$ ), 6 个处理组的肌纤维短径无显著差

异( $P>0.05$ )。对于大菱鲆肌肉纤维的横截面积, PH18A 组显著高于 PH18B 组、正对照组、PH4.5A 组、负对照组和 PH4.5B 组( $P<0.05$ ), 而 PH18B 组显著高于 PH4.5B 组( $P<0.05$ ), 与正对照组、PH4.5A 组、负对照组无显著差异( $P>0.05$ )。对于大菱鲆肌肉纤维密度, PH4.5B 组显著高于 PH18A 组和 PH18B 组( $P<0.05$ ), 但与正对照组、负对照组和 PH4.5A 组无显著差异( $P>0.05$ )。

表 7 水解鱼蛋白对大菱鲆肌纤维组织形态结构的影响(平均值±标准误)  
Tab.7 The effects of fish protein hydrolysate on morphological structure of muscle fiber of turbot(Mean±SE)

项目 Items	正对照 Positive control	PH4.5A	PH4.5B	PH18A	PH18B	负对照 Negative control
长径 Long diameter(μm)	88.46±7.66 <sup>ab</sup>	74.64±7.12 <sup>ab</sup>	70.87±5.33 <sup>a</sup>	107.23±10.77 <sup>b</sup>	90.49±5.85 <sup>ab</sup>	78.73±6.40 <sup>ab</sup>
短径 Short diameter(μm)	57.19±4.01	58.20±8.61	51.86±3.63	66.87±3.08	62.19±7.45	54.10±4.41
横截面积 Cross-sectional area(μm <sup>2</sup> )	3726.99±146.63 <sup>ab</sup>	3621.52±164.02 <sup>ab</sup>	2917.14±417.68 <sup>a</sup>	5822.84±160.72 <sup>c</sup>	4441.25±255.05 <sup>b</sup>	3244.97±416.54 <sup>ab</sup>
密度 Density(n/mm <sup>2</sup> )	459.54±9.10 <sup>ab</sup>	483.85±47.99 <sup>ab</sup>	619.56±59.04 <sup>b</sup>	417.38±51.53 <sup>a</sup>	428.61±23.76 <sup>a</sup>	560.54±18.68 <sup>ab</sup>

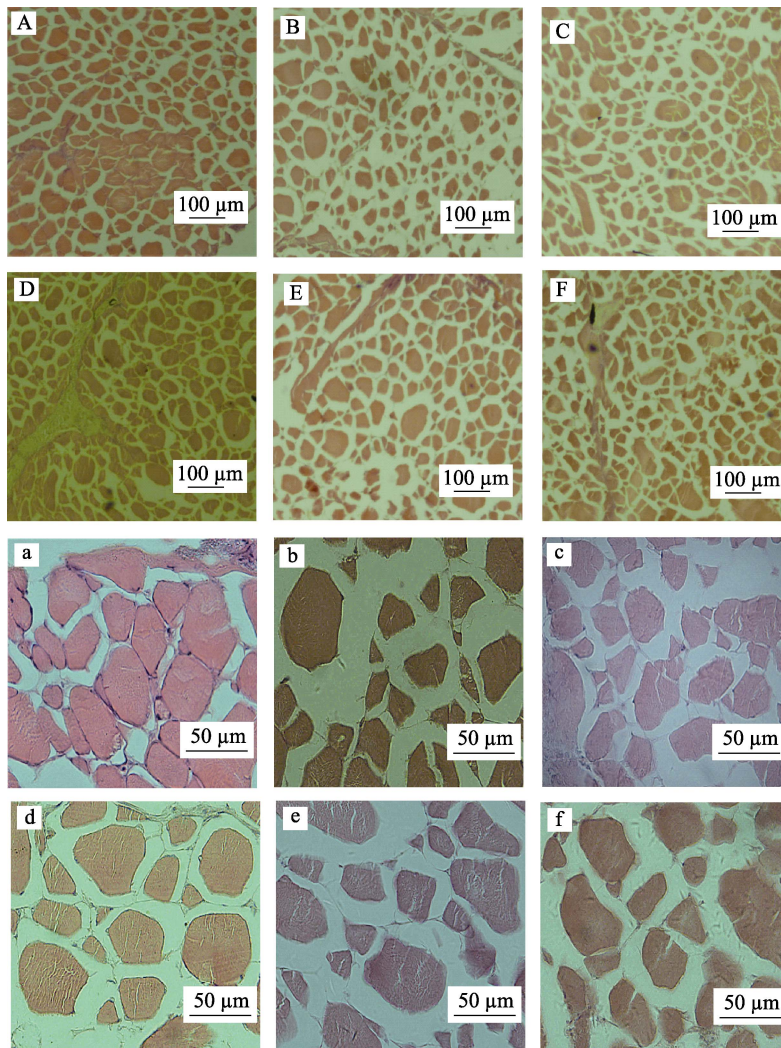


图 1 光学显微镜下大菱鲆肌纤维横截面示例图

Fig.1 Cross section of turbot muscle fibers under an optical microscope

- A: 正对照组(10×4); B: PH4.5A 组(10×4); C: PH4.5B 组(10×4);  
 D: PH18A 组(10×4); E: PH18B 组(10×4); F: 负对照组(10×4)  
 a: 正对照组(10×20); b: PH4.5A 组(10×20); c: PH4.5B 组(10×20);  
 d: PH18A 组(10×20); e: PH18B 组(10×20); f: 负对照组(10×20)  
 A: Positive control group(10×4); B: PH4.5A group(10×4); C: PH4.5B group(10×4);  
 D: PH18A group(10×4); E: PH18B group(10×4); F: Negative control group(10×4)  
 a: Positive control group(10×20); b: PH4.5A group(10×20); c: PH4.5B group(10×20);  
 d: PH18A group(10×20); e: PH18B group(10×20); f: Negative control group(10×20)

### 3 讨论

#### 3.1 水解鱼蛋白对大菱鲆生长性能及饲料利用的影响

在之前水解鱼蛋白影响大菱鲆生长性能的研究上发现,低水平水解鱼蛋白替代鱼粉,有利于大菱鲆生长,而高水平替代则显著抑制大菱鲆生长(Wei *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2016)。但是,在随后本团队尚未发表的研究中发现,饲料鱼粉水平相同的情况下,添加18%的水解鱼蛋白,与不添加和4.5%的水解鱼蛋白添加组相比,生长和饲料利用显著提高。然而,该研究是在饲料中鱼粉水平相同情况下进行的,增加饲料中水解鱼蛋白的水平相比对照组,相当于用水解鱼蛋白替代了饲料中的混合植物蛋白,因而,生长和饲料利用的提高可以认为主要是大菱鲆对水解鱼蛋白的利用优于混合植物蛋白,而不一定是高水平水解鱼蛋白促进了大菱鲆的生长。因此,为进一步研究水解鱼蛋白对大菱鲆生长的作用规律,本实验设计了鱼粉相同条件下,设计4.5%和18%的水解鱼蛋白添加入饲料中及4.5%和18%水解鱼蛋白替代相同蛋白的鱼粉2种情况开展研究。结果显示,在鱼粉含量相同(22%鱼粉)的条件下,将添加4.5%的水解鱼蛋白的PH4.5A组、18%水解鱼蛋白的PH18A组和未添加水解鱼蛋白的负对照组大菱鲆的生长及饲料利用进行对比,3组的生长和饲料利用依次为PH18A组>PH4.5A组>负对照组且均产生显著差异,这与本团队尚未发表的在相同鱼粉条件下,添加水解鱼蛋白对大菱鲆生长的研究结果相似。在水解鱼蛋白替代等蛋白的鱼粉时,即在鱼粉为22%的负对照组中,用4.5%和18%的水解鱼蛋白分别替代5%和21.5%的等蛋白鱼粉PH4.5B组和PH18B组,将这2组的生长结果及饲料利用与负对照组进行对比,结果显示,PH4.5B组和PH18B组的生长和饲料利用相比负对照组均显著提高。同样,在鱼粉为44%的正对照组中,用水解鱼蛋白替代22%的鱼粉PH18A组,也有相似的结果,这进一步表明18%和4.5%的水解鱼蛋白对大菱鲆的生长、饲料利用可能均具有显著促进作用。此外,本实验中水解鱼蛋白的添加量18%虽然已经超过之前认为的12%高水平水解鱼蛋白组的抑制大菱鲆生长的添加量,但是却并没有发现对大菱鲆生长和饲料利用有明显的抑制作用。这一结果不但与之前在大菱鲆上的研究结果相反(Wei *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2016),而且也与在牙鲆(*Paralichthys olivaceus*) (Zheng *et al.*, 2012; Zheng *et al.*, 2013b; 许团辉等, 2012)、大西洋鲑鱼(*Gadus morhua*) (Aksnes *et al.*, 2006a; Bakke *et al.*, 2010)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*) (Aksnes *et al.*, 2006b)、大西洋

鲑(*Salmo salar*) (Espe *et al.*, 2012; Hevrøy *et al.*, 2005; Refstie *et al.*, 2004; Kousoulaki *et al.*, 2009)、军曹鱼(*Rachycentron canadum*) (Mach *et al.*, 2011)等肉食性鱼类上的研究结果相反。高水平水解鱼蛋白之所以会显著抑制鱼类的生长,其主要原因是水解鱼蛋白中含有大量的游离氨基酸,这些游离氨基酸在肠道的吸收利用上与完整蛋白不同步,这样导致大量的氨基酸被用于分解提供能量,而不是用于蛋白质合成,从而降低了肉食性鱼类对含高水平水解鱼蛋白饲料中蛋白质的吸收和利用(Espe *et al.*, 1999; Hevrøy *et al.*, 2005)。但是,对于大菱鲆,Peres等(2005)报道,饲料中添加13.8%的晶体氨基酸,相比无添加的鱼粉组,大菱鲆的生长和饲料利用均无显著差异,这表明大菱鲆可以耐受较高的晶体氨基酸。而Wei等(2016)在对比添加晶体氨基酸和高水平水解鱼蛋白的生长结果后猜测,高水平水解鱼蛋白抑制大菱鲆生长的原因,可能并不主要是因为水解鱼蛋白中含有高比例的游离氨基酸。因此,由于本实验所用水解鱼蛋白的制作方法与之前的完全一致(Xu *et al.*, 2016),而本实验出现18%的水解鱼蛋白仍促进鱼类的生长,一方面可能是大菱鲆本身对水解鱼蛋白中的晶体氨基酸具有较强的适应能力;另一方面,2次实验所用的大菱鲆可能因为来源不同,存在品种的差异,而18%的水解鱼蛋白可能仍然是本实验所用大菱鲆的适宜含量,而不会产生抑制作用。因此,接下来需要再次通过更高水平的水解鱼蛋白验证这一假设。

#### 3.2 水解鱼蛋白对大菱鲆体组成及肌肉氨基酸组成的影响

鱼类在食物不充足的条件下,为维持生命活动,不同程度消耗脂肪、糖原和蛋白质3类贮能物质,而多数鱼类优先消耗糖原和脂肪,其次消耗蛋白质(Stirling, 1976; Kutty, 1978),随着鱼体大量消耗贮能物质,水分的相对含量增加(Love, 1970)。由大菱鲆体成分相关数据表分析可知,对比PH18B组、PH4.5B组与负对照组,粗蛋白和粗脂肪的变化趋势由高到低为PH18B组、PH4.5B组与负对照组,水解鱼蛋白提高了大菱鲆体内粗脂肪和粗蛋白的含量,促进了大菱鲆的生长。对比正对照组与PH18A组鱼体组成数据,在低植物蛋白饲料中,18%的水解鱼蛋白促进大菱鲆的生长,却未改变大菱鲆体成分,这表明18%的水解鱼蛋白和22%的鱼粉不但对大菱鲆生长产生的相似的作用效果,而且不影响鱼体的营养组成。

本实验在对肌肉18种氨基酸分析发现,必需氨基酸中除精氨酸,非必需氨基酸中除牛磺酸、丙氨酸、



半胱氨酸有显著差异外,其他氨基酸成分、总氨基酸、必需氨基酸总量均无显著差异,这与卫育良等(2014)的研究结果相似。这说明本实验中的饲料由于采用复合植物蛋白源,大部分的必需氨基酸含量可能已经能满足大菱鲂对饲料中必需氨基酸的需要,因而在添加水解鱼蛋白的处理组并未引起鱼体大部分氨基酸含量的显著变化(卫育良等, 2014)。

### 3.3 水解鱼蛋白对大菱鲂肌纤维组织形态结构的影响

肌肉是动物的基本结构组织,肌肉根据其结构不同,可以分为心肌、平滑肌和横纹肌,大菱鲂作为一种经济鱼类,具有很高的食用价值,因此,其横纹肌的肌纤维成为本次实验的研究重点。肌纤维横截面积是描述肌肉组织形态结构的重要参数,营养状况和运动量对肌纤维横截面积的大小有重要影响(Johnston *et al.*, 2000a、2000b、2003)。大菱鲂作为底栖冷水性生物,运动量较少,因此,在本实验中,饲料营养成分成为影响其肌肉纤维横截面积的一个主要因素。大菱鲂的肌纤维呈椭圆或多边形等不规则形状,本实验以肌纤维形状最多的椭圆形为标准,计算其横截面积。结果显示,添加18%水解鱼蛋白的PH18B组和PH18A组的肌纤维横截面积比PH4.5B组、PH4.5A组、正对照组、负对照组明显增大,说明18%水解鱼蛋白在促进大菱鲂生长的同时,也促进了肌纤维增粗;添加4.5%水解鱼蛋白PH4.5B组和PH4.5A的肌纤维横截面积与不添加水解与蛋白的负对照组的肌纤维横截面积无显著差异,说明在高植物蛋白饲料中,4.5%水解鱼蛋白对大菱鲂肌肉的肌纤维横截面积无显著影响。

畜禽动物出生的最初阶段,其肌纤维增生过程占据其主导地位,即其肌纤维总数量在后期生长发育过程中变化不大(de Almeida *et al.*, 2010),然而,在鱼类上,Silva等(2017)在对罗非鱼的研究中认为,营养素等因素会影响鱼类整个生长过程中的肌纤维增生机制,进而影响肌纤维总数量。在无其他外界条件影响下,动物出生后肌肉体积的增加主要是由于已经存在的肌纤维体积的增大,随着肌纤维的增粗,肌肉间结缔组织与脂肪组织的增加,肌纤维密度下降,即随着机体体重的增加,肌纤维横截面积增大,肌纤维密度降低(Macintosh *et al.*, 2006; 秦召等, 2006; Johnston *et al.*, 2000a、2000b、2003)。研究表明,鱼体的生长与肌纤维横截面积成正比例关系,与肌纤维密度成反比例关系(Johnston *et al.*, 2000a、2000b、2003)。在本实验中,添加18%水解鱼蛋白的PH18B组和PH18A组的肌纤维密度比PH4.5B组、PH4.5A组、正对照组

和负对照组明显降低,说明18%水解鱼蛋白在促进大菱鲂生长的同时,降低了肌纤维密度。而添加4.5%水解鱼蛋白PH4.5B组和PH4.5A的肌纤维密度与不添加水解鱼蛋白的负对照组的肌纤维横密度无显著差异,说明在高植物蛋白饲料中,4.5%水解鱼蛋白对肌肉的肌纤维密度也无显著影响。

## 4 结论

在高植物蛋白饲料中添加18%和4.5%的水解鱼蛋白,均可以提高大菱鲂的饲料效率和蛋白沉积率,促进其生长,且18%的水解鱼蛋白优于4.5%;18%的水解鱼蛋白促进了大菱鲂肌肉纤维横截面积增加,降低了大菱鲂的肌肉纤维密度,而4.5%的水解鱼蛋白在高植物蛋白饲料中,对大菱鲂肌纤维横截面积和肌纤维密度均无显著的影响。

## 参 考 文 献

- Aksnes A, Hope B, Høstmark Ø, *et al.* Inclusion of size fractionated fish hydrolysate in high plant protein diets for Atlantic cod, *Gadus morhua*. *Aquaculture*, 2006a, 261(3): 1102–1110
- Aksnes A, Hope B, Jönsson E, *et al.* Size-fractionated fish hydrolysate as feed ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed high plant protein diets. I: Growth, growth regulation and feed utilization. *Aquaculture*, 2006b, 261(1): 305–317
- de Almeida FLA, Pessotti NS, Pinhal D, *et al.* Quantitative expression of myogenic regulatory factors MyoD and myogenin in pacu (*Piaractus mesopotamicus*) skeletal muscle during growth. *Micron*, 2010, 41(8): 997–1004
- Bakke S, Jordal AEO, Gomez-Requeni P, *et al.* Dietary protein hydrolysates and free amino acids affect the spatial expression of peptide transporter PepT1 in the digestive tract of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Comparative Biochemistry and Physiology, Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2010, 156(1): 48–55
- Espe M, Sveier H, Hogoy I, *et al.* Nutrient absorption and growth of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed fish protein concentrate. *Aquaculture*, 1999, 174(1–2): 119–137
- Espe M, Ruohonen K, El-Mowafi A. Hydrolysed fish protein concentrate (FPC) reduces viscera mass in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed plant-protein-based diets. *Aquaculture Nutrition*, 2012, 18(6): 599–609
- Hevrøy EM, Espe M, Waagbø R, *et al.* Nutrient utilization in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed increased levels of fish protein hydrolysate during a period of fast growth. *Aquaculture Nutrition*, 2005, 11(4): 301–313
- Johnston IA, Alderson R, Sandham C, *et al.* Patterns of muscle growth in early and latematuring populations of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture*, 2000a, 189(3–4): 307–333
- Johnston IA, Alderson R, Sandham C, *et al.* Muscle fibre density in relation to the colour and texture of smoked Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture*, 2000b, 189(3–4): 335–349

- Johnston IA, Manthri S, Alderson R, *et al.* Freshwater environment affects growth rate and muscle fibre recruitment in seawater stages of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(8): 1337–1351
- Kousoulaki K, Albrektsen S, Langmyhr E, *et al.* The water soluble fraction in fish meal (stickwater) stimulates growth in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) given high plant protein diets. *Aquaculture*, 2009, 289(1–2): 74–83
- Kutty MN. Ammonia quotient in sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1978, 35(7): 1003–1005
- Liaset B, Espe M. Nutritional composition of soluble and insoluble fractions obtained by enzymatic hydrolysis of fish-raw materials. *Process Biochemistry*, 2008, 43(1): 42–48
- Love M. The chemical biology of fishes. *Quarterly Review of Biology*, 1970
- Mach DTN, Nortvedt R. Free amino acid distribution in plasma and liver of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*) fed increased levels of lizardfish silage. *Aquaculture Nutrition*, 2011, 17(2): 644–656
- Macintosh R, Gardiner F, Mccomas J. *Skeletal muscle: Form and function*. Champaign: Human Kinetics, 2006
- Mu YC, Liang MQ, Zheng KK, *et al.* Effects of small molecule weight fish protein hydrolysate in high plant protein diets on the expression of liver IGF-I receptor and the growth of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(3): 50–57 [牟玉超, 梁萌青, 郑珂珂, 等. 高植物蛋白饲料中不同水平低分子水解鱼蛋白对大菱鲆(*Scophthalmus maximus* L.) 幼鱼生长及肝脏 IGF-I 受体表达的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(3): 50–57]
- Peres H, Oliva-Teles A. The effect of dietary protein replacement by crystalline amino acid on growth and nitrogen utilization of turbot *Scophthalmus maximus* juveniles. *Aquaculture*, 2005, 250(3–4): 755–764
- Qin Z, Kang XT, Li GX. Relationship between histological characteristics of muscle fiber and meat quality. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(22): 5872–5873, 5878 [秦召, 康相涛, 李国喜. 肌纤维组织学特性与肌肉品质的关系. *安徽农业科学*, 2006, 34(22): 5872–5873, 5878]
- Refstie S, Olli JJ, Standal H. Feed intake, growth, and protein utilization by post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar*) in response to graded levels of fish protein hydrolysate in the diet. *Aquaculture*, 2004, 239(1–4): 331–349
- Silva TCD, Rocha JDAM, Moreira P, *et al.* Fish protein hydrolysate in diets for Nile tilapia post-larvae. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2017, 52(7): 485–492
- Stirling HP. Effects of experimental feeding and starvation on the proximate composition of the European bass *Dicentrarchus labrax*. *Marine Biology*, 1976, 34(1): 85–91
- Wang XX, Kong FH, Xu TH, *et al.* Evaluation on the nutritional composition of fish protein hydrolysate. *Progress in Fishery Sciences*, 2011, 32(3): 104–110 [王新星, 孔凡华, 许团辉, 等. 水解鱼蛋白营养组成及评价. *渔业科学进展*, 2011, 32(3): 104–110]
- Wei YL, Liang MQ, Mu YC, *et al.* The effect of ultrafiltered fish protein hydrolysate level on growth performance, protein digestibility and mRNA expression of PepT1 in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). *Aquaculture Nutrition*, 2016, 22: 1006–1017
- Wei YL, Liang MQ, Zheng KK, *et al.* The effects of fish protein hydrolysate on the digestibility of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38(5): 910–920 [卫育良, 梁萌青, 郑珂珂, 等. 水解鱼蛋白对大菱鲆幼鱼消化率的影响. *水生生物学报*, 2014, 38(5): 910–920]
- Xu HG, Mu YC, Zhang Y, *et al.* Graded levels of fish protein hydrolysate in high plant diets for turbot (*Scophthalmus maximus*): Effects on growth performance and lipid accumulation. *Aquaculture*, 2016, 454: 140–147
- Xu TH, Gao XP, Liang MQ, *et al.* Effects of small size-fractionated fish protein hydrolysate substitution of fish meal in high plant protein diets on the growth performance and non-specific immunity of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(3): 60–69 [许团辉, 高湘潭, 梁萌青, 等. 高植物蛋白饲料中以低分子水解蛋白替代鱼粉对牙鲆生长性能及非特异性免疫的影响. *渔业科学进展*, 2012, 33(3): 60–69]
- Zheng KK, Liang MQ, Yao HB, *et al.* Effect of dietary fish protein hydrolysate on growth, feed utilization and IGF-I levels of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Aquaculture Nutrition*, 2012, 18(3): 297–303
- Zheng KK, Liang MQ, Yao HB, *et al.* Effect of size-fractionated fish protein hydrolysate on growth and feed utilization of turbot (*Scophthalmus maximus* L.). *Aquaculture Research*, 2013a, 44(6): 895–902
- Zheng KK, Xu TH, Qian CS, *et al.* Effect of low molecular weight fish protein hydrolysate on growth performance and IGF-I expression in Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) fed high plant protein diets. *Aquaculture Nutrition*, 2013b, 20(4): 372–380

(编辑 陈辉)

## The Effects of Fish Protein Hydrolysate on the Growth, Body Composition and Morphological Structure of Muscle Fiber of Turbot (*Scophthalmus maximus* L.)

LI Benxiang<sup>1,2</sup>, WEI Yuliang<sup>2</sup>, LIANG Mengqing<sup>2①</sup>, XU Houguo<sup>2</sup>, QU Jiangbo<sup>3</sup>

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 3. Yantai Tianyuan Aquatic Product Co., Ltd. Yantai 264006)

**Abstract** This experiment was to investigate the effects of fish protein hydrolysate on growth, feed utilization, body composition, and morphological structure of muscle fibers in turbot (*Scophthalmus maximus* L.). Six isonitrogenous and isolipidic diets were formulated and fed to fish. The experimental diets contained two control groups with no fish protein hydrolysate, positive control group including 44% fish meal, negative control group including 22% fish meal. Four experimental groups with different levels of fish protein hydrolysate and fish meal, PH4.5A group contained 22% fish meal and 4.5% fish protein hydrolysate, PH4.5B group contained 17% fish meal and 4.5% fish protein hydrolysate, PH18A group contained 22% fish meal and 18% fish protein hydrolysate, and PH18B group contained 0.5% fish meal and 18% fish protein hydrolysate. The results showed that there were no significant differences in the weight gain rate and specific growth rate between PH4.5A and PH18B groups ( $P>0.05$ ), while PH4.5A group and PH18B group were significantly higher than that of PH4.5B group and negative control group ( $P<0.05$ ) and significantly lower than that of PH18A and positive control groups ( $P<0.05$ ). There were no significant differences in the feed efficiency, protein efficiency and protein retention efficiency between PH18A and positive control groups ( $P>0.05$ ), while PH18A and positive control groups were significantly higher than that of PH18B, PH4.5A and negative control group ( $P<0.05$ ). Contrary to feed efficiency, there were no significant differences in the feed intake among PH18A, PH18B and positive control groups ( $P>0.05$ ), while these groups were significantly lower than that of PH4.5A, PH4.5B and negative control groups ( $P<0.05$ ). There were no differences in the contents of crude protein and crude lipid between PH4.5B and negative control groups ( $P>0.05$ ), while these groups were significantly lower than that of PH18A and positive control groups ( $P<0.05$ ). There were no significant differences in total amino acids, essential amino acids and non-essential amino acids in the muscles among six groups ( $P>0.05$ ). The muscle fiber cross-sectional area in PH18A group was significantly higher than that of PH18B, positive control, PH4.5A, negative control, PH4.5B groups ( $P<0.05$ ), and PH18B group was significantly higher than PH4.5B group ( $P<0.05$ ). The muscle fiber density of PH18A group and PH18B group was significantly lower than that of PH4.5B group ( $P<0.05$ ). The above results show that both 18% and 4.5% fish protein hydrolysate added to high plant protein feeds can promote the growth of turbot and increase the feed efficiency and protein deposition rate of turbot, and growth and feed utilization in fish given 18% fish protein hydrolysate diet showed better than that of fish given 4.5% fish protein hydrolysate diets. For the morphological structure of muscle fiber, 18% fish protein hydrolysate in diets can increase the cross-sectional area of muscle fiber and reduce the muscle fiber density, while 4.5% of the fish protein hydrolysate did not affect significantly the cross-sectional area of the muscle fiber and the fiber density.

**Key words** Turbot; Fish protein hydrolysate; Growth performance; Muscle fiber

① Corresponding author: LIANG Mengqing, E-mail: liangmq@ysfri.ac.cn