

doi: 10.7541/2022.2021.0284

美洲鳗鲡幼鱼饲料中鱼油的适宜添加水平研究

瞿倩 赵盼月 蔡国鹤 翟少伟

(集美大学水产学院, 鳗鲡现代产业技术教育部工程研究中心, 厦门 361021)

摘要: 为研究饲料中鱼油添加水平对美洲鳗鲡(*Anguilla rostrata*)幼鱼生长性能、消化酶、体成分及肝脏脂肪代谢的影响, 以确定美洲鳗鲡幼鱼饲料中鱼油的适宜添加水平, 选用初始体重(8.34 ± 0.12) g的美洲鳗鲡幼鱼800尾, 随机分成5组, 每组4个重复, 每个重复40尾; 分别投喂添加0(对照组)、3%(FO3组)、6%(FO6组)、9%(FO9组)和12%(FO12组)鱼油的试验饲料, 试验期56d。结果表明, 饲料中添加鱼油显著影响美洲鳗鲡幼鱼生长性能, FO6组美洲鳗鲡幼鱼的增重率、投饵率和饲料效率显著高于其他处理组($P < 0.05$)。与对照组相比, 鱼油添加组美洲鳗鲡幼鱼肠道脂肪酶活性显著提高($P < 0.05$), 蛋白酶和淀粉酶活性显著降低($P < 0.05$); FO6组、FO9组和FO12组全鱼粗脂肪含量显著提高($P < 0.05$), 全鱼粗蛋白质含量在FO12组显著降低($P < 0.05$), 全鱼水分和灰分含量无显著变化($P > 0.05$); FO9组和FO12组脂肪酸合成酶活性显著降低($P < 0.05$), FO12组脂蛋白酯酶和肝脂酶活性显著升高($P < 0.05$)。综上, 饲料中添加适宜鱼油水平可以提高美洲鳗鲡幼鱼的生长性能, 调节肠道脂肪酶活性、全鱼粗脂肪含量和肝脏脂肪代谢酶水平或活性; 美洲鳗鲡幼鱼获得最佳增重率和饲料效率时, 饲料中鱼油添加水平推荐为6.43%—6.78%。

关键词: 鱼油; 生长性能; 消化酶; 体成分; 脂肪代谢; 美洲鳗鲡

中图分类号: S965.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2022)08-1215-08



鳗鲡(*Anguilla*), 俗称河鳗, 又称白鳢、青鳢等, 属鳗鱼目、鳗鲡科鱼类, 广泛分布于热带、亚热带和温带地区; 其肉质鲜美, 营养丰富, 具有一定药膳价值, 是公认的水产珍品, 一直享有“水中人参”的美誉^[1]。自20世纪90年代中期以来, 鳗鲡已经成为我国重要的水产养殖种类, 连续多年在单一出口创汇水产品品种中排名第一。当前我国鳗鲡的养殖主要分布在南方地区, 养殖品种以日本鳗鲡和美洲鳗鲡为主。其中, 日本鳗鲡多在广东省主要采用土池模式养殖, 美洲鳗鲡主要在福建省及其他省份采用水泥池精养模式, 一般在投喂前将粉状配合饲料制作成面团状饲料的过程中添加鱼油。

鱼油是鱼粉加工过程中产出的副产品, 富含二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)酸等n-3高不饱和脂肪酸(HUFA)。研究表明, 鱼类饲料中添加适量鱼油, 可以满足生长所需的能量和必需脂肪酸, 提高饲料利用率, 其在维持细胞膜的流动

性、增强免疫、提高抗氧化能力及调节脂类代谢等方面发挥着重要的作用^[2-5]。因此, 富含HUFA的鱼油一直被作为水产动物饲料优质脂肪源, 尤其是鳗鲡养殖中使用的最主要脂肪来源。由于鱼油中HUFA含量高, 极易氧化变质, 往往在鳗鲡养殖场将粉状配合饲料加水制作成面团状饲料时直接添加。目前, 已有日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)^[6]、欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)^[7]、澳洲鳗鲡(*Anguilla australis*)^[8]及花鳗鲡(*Anguilla marmorata*)^[9]饲料中适宜脂肪水平的报道。但美洲鳗鲡(*Anguilla rostrata*)饲料中适宜的鱼油添加水平还未确定, 也未见饲料中适宜脂肪水平的报道。因此, 本试验以我国主要的鳗鲡养殖品种-美洲鳗鲡幼鱼为试验对象, 通过研究饲料中添加不同水平鱼油对其生长性能、体成分及肝脏脂肪代谢酶的影响, 确定适宜的鱼油添加水平, 为鱼油在美洲鳗鲡养殖中的科学应用提供参考。

收稿日期: 2021-10-25; **修订日期:** 2022-02-14

基金项目: 财政部和农业农村部“国家现代农业产业技术体系”资助(CARS-46)资助 [Supported by China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-46)]

作者简介: 瞿倩(1995—), 女, 硕士研究生; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: 314788681@qq.com

通信作者: 翟少伟, 教授, 硕士生导师; E-mail: zhaisw@jmu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验动物与试验设计

试验用鱼为美洲鳗鲡幼鱼。挑选800尾规格一致、体格健壮,平均体重为 (8.34 ± 0.12) g的试验鱼,随机分为5个处理组,分别投喂基础饲料中添加0(对照组)、3%(FO3组)、6%(FO6组)、9%(FO9组)和12%(FO12组)鱼油的试验饲料,每组4个重复,每个重复40尾鱼。试验期56d。

1.2 试验饲料与饲养管理

基础饲料为福建正源饲料有限公司生产的黑仔鳗商品饲料,主要营养成分为粗蛋白47.60%、粗脂肪5.60%、粗灰分12.90%和粗纤维0.40%。鱼油购于福州开发区高龙实业有限公司。试验在福建正源饲料有限公司养殖实验室进行,1200尾试验鱼随机分到20个PVC养殖缸(注水量为250 L,每缸60尾)中暂养2周后,选择出规格接近的800尾用于养殖试验,每缸放鱼40尾。期间将基础饲料按料水重量比1:1.2混合制作成团状饲料投喂。正式试验每次投喂时,先将粉状商品饲料称重,再分别与饲料重量0%、3%、6%、9%和12%的鱼油,及饲料重量1.2倍左右的水一起混合均匀制成团状饲料投喂。每天饱食投喂2次(5:00和18:00),根据鱼体重、摄食情况及时调整投喂量。投喂30min后,将残饵吸出,收集并记录残饵重。在试验期间,每日检测水质、水温并记录试验鱼的摄食情况等,保持水温26—28℃,溶解氧浓度 >7.6 mg/L, pH为7.8—8.2,氨氮浓度 <0.25 mg/L。

1.3 样品采集与组织匀浆液的制备

在试验结束后,美洲鳗鲡幼鱼禁食24h,将每缸鱼捞出称总重并记录尾数,用丁香酚和无水乙醇按比例1:4配置成50 mg/L的混合液麻醉5min左右,每缸随机取6尾鱼,用纱布擦拭鱼体表面水分。在冰浴上用无菌剪刀解剖分别取出肠道和肝脏,用生理盐水漂洗装入灭菌的冻存管中,液氮速冻,保存于 -80°C 冰箱。用于测定肠道消化酶和肝脏脂肪代谢酶指标分析。将保存于 -80°C 冰箱中美洲鳗鲡幼鱼肠道和肝脏取出,在冰上解冻。按组织重(g)与0.86%生理盐水(mL)体积比1:9放入10 mL离心管中,用组织研磨仪(Tissuelyser-24,上海净信实业发展有限公司,中国)在冰浴条件下匀浆(匀浆时间30s/次,间隔20s,连续3—5次),将制备好的组织匀浆用4℃离心机离心(3000 r/min, 10min),取上清液分装到离心管中备用。每缸另随机取5尾鱼(去除内脏)装入标记分组自封袋中,置于 -20°C 保存,用于体成分的测定。

1.4 测定指标及方法

生长性能指标 生长性能指标计算公式如下:

增重率 (Weight gain rate, WGR , %)= $100\% \times (W_t - W_0) / W_0$

投饵率 (Feeding rate, FR , %)= $100\% \times FC / [W_0 + W_t / 2] / t$

饲料效率 (Feed efficiency, FE , %)= $100\% \times (W_t - W_0) / FC$

成活率 (Survival rate, SR , %)= $100\% \times N_f / N_i$

式中, W_0 (g)为平均每尾鱼初始体重; W_t (g)为平均每尾鱼末体重; FC (g)为平均每尾鱼摄食饲料总量(风干样重); t (d)为饲喂天数; N_i 为初始鱼尾数; N_f 为试验终末鱼尾数。

肠道消化酶活性 肠道蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶的活性均使用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行测定,操作步骤均按说明书进行。

全鱼体成分 试验鱼全鱼营养成分含量采用AOAC^[10]的方法测定,主要如下:水分含量测定采用105℃烘干恒重法,粗蛋白质含量的测定采用全自动定氮仪(Kjeltec8400, FOSS公司),粗脂肪含量测定采用索氏提取法,粗灰分含量测定采用550℃马弗炉灼烧法。

肝脏脂肪代谢酶水平或活性 脂肪酸合成酶(Fatty acid synthase, FAS)和乙酰辅酶A羧化酶(Acetyl CoA carboxylase, ACC)采用上海江莱生物科技有限公司生产的试剂盒测定;脂蛋白酯酶(Lipoprotein lipase, LPL)和肝脏肝脂酶(Hepatic lipase, HL)活性采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行测定,操作步骤均按说明书进行。

1.5 数据统计与分析

试验数据均以平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示,用SPSS 22.0分析软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA, LSD),若存在显著差异,则采用Duncan法进行多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。 WGR 、 FE 与饲料鱼油添加水平间的关系采用Linear Regression模块进行二次回归分析,显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 饲料中添加不同水平鱼油对美洲鳗鲡幼鱼生长性能的影响

由表1可知,饲料中添加鱼油显著影响美洲鳗鲡幼鱼 WGR 、 FR 和 FE ($P < 0.05$)。随着鱼油添加水平的提高, WGR 、 FR 和 FE 均呈先上升后下降的趋势,FO6组上述指标数值均为最高。将 WGR 、 FE 与饲料中鱼油添加水平进行二次回归分析,得出最佳 WGR 、 FE 时饲料中添加鱼油水平分别为6.78%和

6.43%(图 1和图 2), 此时鳗鲡配合饲料中脂肪水平分别为11.59%和11.30%。试验期间, 每组鳗鲡的成活率为100%。

2.2 饲料中添加不同鱼油水平对美洲鳗鲡幼鱼肠道消化酶活性的影响

由表 2可知, 饲料中鱼油添加水平对美洲鳗鲡幼鱼肠道蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶活性均有显著影响($P<0.05$)。饲料中添加鱼油, 可显著降低肠道蛋白酶和淀粉酶活性($P<0.05$), 不同鱼油添加组间两种酶活性无显著差异($P>0.05$); 可显著提高肠道脂肪酶活性($P<0.05$), FO6组、FO9组和FO12组间脂肪酶活性接近($P>0.05$)。

2.3 饲料中添加鱼油水平对美洲鳗鲡幼鱼体成分的影响

由表 3可知, 饲料中添加鱼油显著影响美洲鳗鲡幼鱼全鱼粗蛋白质和粗脂肪含量($P<0.05$)。随着

饲料中鱼油添加水平的增加, 美洲鳗鲡全鱼粗蛋白质的含量呈逐渐下降趋势, FO12组数值上最低; 全鱼粗脂肪含量呈逐渐上升趋势, FO12组数值上最高。饲料中添加鱼油对全鱼水分和粗灰分的影响不显著($P>0.05$)。

2.4 饲料中鱼油添加水平对美洲鳗鲡幼鱼肝脏脂肪代谢酶活性的影响

由表 4可知, 饲料中添加鱼油显著影响美洲鳗鲡幼鱼肝脏FAS、LPL和HL活性($P<0.05$)。随着饲料中鱼油添加水平的增加美洲鳗鲡幼鱼肝脏FAS活性呈降低趋势, FO9组和FO12组FAS活性显著降低($P<0.05$); LPL和HL活性呈升高趋势, 仅FO12组两种酶活性显著降低($P<0.05$)。饲料中添加鱼油对

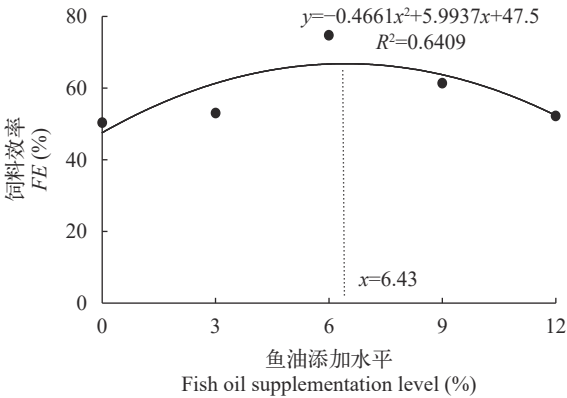


图 2 美洲鳗鲡幼鱼饲料效率与饲料中鱼油添加水平的关系
Fig. 2 Relationship between *FE* and dietary fish oil supplementation level of juvenile American eels

表 2 不同处理组美洲鳗鲡幼鱼的肠道消化酶活性

Tab. 2 Intestinal digestive enzyme activities of juvenile American eels in different treatment groups (mean±SD, $n=4$; U/mg prot)

项目Item	组别Group				
	对照组	FO3组	FO6组	FO9组	FO12组
蛋白酶 Protease	72.50± 9.42 ^b	48.28± 4.36 ^a	46.99± 3.77 ^a	41.55± 6.24 ^a	40.45± 5.60 ^a
脂肪酶 Lipase	25.57± 3.80 ^a	35.70± 2.30 ^b	40.34± 3.21 ^c	41.61± 1.37 ^c	43.02± 2.33 ^c
淀粉酶 Amylase	0.82± 0.07 ^b	0.56± 0.09 ^a	0.55± 0.19 ^a	0.40± 0.12 ^a	0.38± 0.08 ^a

表 3 不同处理组美洲鳗鲡幼鱼的体成分

Tab. 3 Body composition of juvenile American eels in different treatment groups (mean±SD, $n=4$; %)

项目Item	组别 Group				
	对照组	FO3组	FO6组	FO9组	FO12组
水分Moisture	71.42± 0.19	71.89± 0.38	71.48± 0.33	71.25± 0.29	71.56± 0.37
粗蛋白质Crude protein	17.63± 0.89 ^b	17.76± 0.26 ^b	16.59± 0.89 ^{ab}	16.53± 0.30 ^{ab}	15.86± 0.66 ^a
粗脂肪Crude lipid	6.61± 0.56 ^a	6.62± 0.32 ^a	8.42± 0.07 ^b	8.43± 0.18 ^b	8.52± 0.43 ^b
灰分Ash	2.78± 0.09	2.67± 0.10	2.57± 0.05	2.56± 0.04	2.65± 0.04

表 1 不同处理组美洲鳗鲡幼鱼生长性能

Tab. 1 Growth performance of juvenile American eels in different treatment groups (mean±SD, $n=4$)

项目Item	组别Group				
	对照组	FO3组	FO6组	FO9组	FO12组
初始体重IBW (g)	6.97± 0.65	6.67± 0.32	6.93± 0.15	7.03± 0.21	6.77± 0.40
终末体重FBW (g)	10.36± 1.45 ^a	10.43± 0.76 ^a	15.43± 1.14 ^c	12.78± 1.11 ^b	11.18± 1.41 ^{ab}
增重率WGR (%)	48.36± 8.22 ^a	56.46± 10.14 ^a	122.36± 11.48 ^c	81.58± 12.35 ^b	64.78± 11.60 ^{ab}
投饵率FR (%)	0.77± 0.02 ^a	0.83± 0.06 ^{ab}	1.02± 0.11 ^c	0.94± 0.06 ^{bc}	0.94± 0.05 ^{bc}
饲料效率FE (%)	50.37± 5.86 ^a	53.04± 7.65 ^a	74.72± 5.16 ^b	61.36± 2.65 ^a	52.20± 9.36 ^a
成活率SR (%)	100	100	100	100	100

注: 同行数据肩标相同小写字母或无字母表示差异不显著 ($P>0.05$), 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同

Note: In the same row, vales with the same superscripts or no superscripts mean no significant difference ($P>0.05$), while vales with different superscripts mean significant difference ($P<0.05$). The same applies below

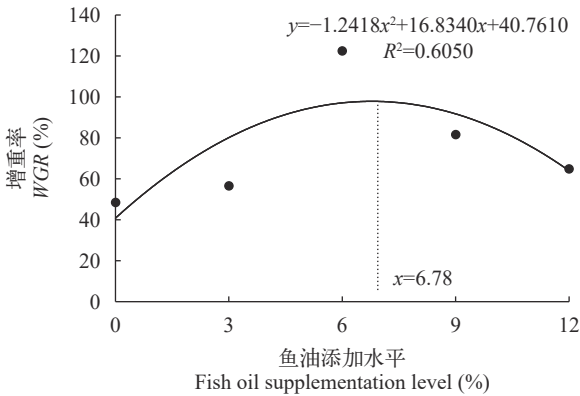


图 1 美洲鳗鲡幼鱼增重率与饲料中鱼油添加水平的关系
Fig. 1 Relationship between *WGR* and dietary fish oil supplementation level of juvenile American eels

表 4 不同处理组美洲鳗鲡幼鱼的肝脏脂肪代谢酶水平或活性
Tab. 4 Levels or activities of enzymes related to lipid metabolism in liver of juvenile American eels in different treatment groups (mean $\pm$ SD, $n=4$)

项目 Item	组别 Group				
	对照组	FO3组	FO6组	FO9组	FO12组
脂肪酸合成酶 FAS (ng/mg prot)	39.42 $\pm$ 0.61 ^b	38.80 $\pm$ 0.78 ^b	39.77 $\pm$ 0.73 ^b	32.42 $\pm$ 0.22 ^a	32.26 $\pm$ 0.64 ^a
乙酰辅酶A羧化酶 ACC (ng/mg prot)	0.27 $\pm$ 0.05	0.28 $\pm$ 0.02	0.29 $\pm$ 0.01	0.28 $\pm$ 0.01	0.26 $\pm$ 0.03
脂蛋白酯酶 LPL (U/mg prot)	0.67 $\pm$ 0.11 ^a	0.76 $\pm$ 0.10 ^{ab}	0.88 $\pm$ 0.19 ^{ab}	0.91 $\pm$ 0.15 ^{ab}	0.93 $\pm$ 0.18 ^b
肝脂酶 HL (U/mg prot)	0.72 $\pm$ 0.15 ^a	0.74 $\pm$ 0.12 ^a	0.89 $\pm$ 0.08 ^{ab}	0.89 $\pm$ 0.09 ^{ab}	1.14 $\pm$ 0.29 ^b

ACC活性无显著影响($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 饲料中鱼油添加水平对美洲鳗鲡幼鱼生长性能的影响

目前还鲜见不同鱼油添加水平对鳗鲡生长性能影响的报道。在本试验中, 适量添加鱼油显著提高美洲鳗鲡幼鱼WGR、FR和FE, 且随饲料中鱼油添加水平增加, WGR、FR和FE呈先升高后下降的趋势。这种适量添加鱼油促进生长, 过量添加鱼油抑制生长的现象在斑石鲷(*Oplegnathus punctatus*)^[11]、黄鳢(*Monopterus albus*)^[12]、半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)^[13]、芙蓉鲤鲫(*Furong crucian carp*)^[14]、斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)^[15]、异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)^[16]、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[17]和褐菖鲉(*Sebastiscus marmoratus*)^[18]等研究中也类似的报道。而在花鳗鲡^[9]、三倍体虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[19]、杂交黄颡鱼(*Peltebagnus fulvidraco*×*P. vachelli*)^[20]、泰国草鱼(*Puntius gonionotus*)^[21]、黄姑鱼(*Nibea albiflora*)^[22]和大黄鱼(*Larimichthys croceus*)^[23]等研究中, 随着饲料中鱼油添加水平升高, 鱼类生长未出现降低现象。导致这些差异的原因可能与试验鱼类品种、脂肪需要量、鱼油添加水平、鱼油组成、基础饲料脂肪水平、养殖环境等方面的差异有关, 具体情况还有待进一步查明。从上述不同鱼类添加鱼油的研究中可以看出, 饲料中适量添加鱼油大都促进鱼体生长, 可能与饲料中添加的鱼油为鱼类提供充足且高效的能量, 减少蛋白质供能的消耗, 发挥“脂肪节约蛋白质效应”有关^[24-26]。

在本试验中, 美洲鳗鲡饲料中鱼油添加水平6.78%和6.43%时, WGR和FE达最高值。此时饲料中脂肪水平为11.59%和11.30%, 这与欧洲鳗鲡适宜脂肪水平为20%^[7]、日本鳗鲡适宜脂肪水平为

16%^[6]和澳洲鳗鲡适宜脂肪水平为15%^[8]相比, 美洲鳗鲡幼鱼适宜脂肪水平相对较低; 但高于花鳗鲡的8%适宜脂肪水平^[27]。上述研究中不同品种鳗鲡饲料中适宜脂肪水平的变化情况与于海振^[28]报道250 g、500 g两个规格不同品种鳗鲡肌肉中粗脂肪含量高低的顺序一致, 从高到低依次为欧洲鳗鲡>日本鳗鲡>美洲鳗鲡>花鳗鲡。可见, 鳗鲡饲料中适宜的脂肪水平与肌肉中粗脂肪含量密切相关。

此外, 与适宜鱼油添加水平组相比, 添加高水平的鱼油(9%和12%)显著抑制美洲鳗鲡生长性能。这种现象在斑石鲷^[11]、黄鳢^[12]、半滑舌鲷^[13]、芙蓉鲤鲫^[14]、斜带石斑鱼^[15]、异育银鲫^[16]、尼罗罗非鱼^[17]和褐菖鲉^[18]等饲料添加过量鱼油的研究中也有类似报道。研究表明, 鱼类与陆生动物一样为能而食, 其摄食量与饲料能量含量成反比; 当饲料脂肪水平升高时, 饲料的能量含量也相应增加, 鱼类的摄食量则减少, 降低了鱼类肠道对营养素的消化和吸收效率, 尤其是吸收过多的脂肪导致蛋白质利用率下降, 鱼类生长减缓^[29]。这也说明鱼类对脂肪的利用有一定限度, 脂肪节约蛋白质的本质仅限于把蛋白质的分解供能降低到最低限度, 而对于蛋白质的其他功能则是脂肪无法替代^[29, 30]。

3.2 饲料中鱼油添加水平对美洲鳗鲡幼鱼肠道消化酶活性的影响

在本试验中, 添加鱼油使美洲鳗鲡幼鱼肠道脂肪酶活性显著升高。这与斜带石斑鱼^[15]、三倍体虹鳟^[19]饲料中添加不同水平的鱼油研究结果一致。随着鱼油添加水平的上升美洲鳗鲡幼鱼肠道脂肪酶活性先升高后趋于相对稳定, 在斜带石斑鱼^[15]、褐菖鲉^[18]、巴丁鱼(*Pangasianodon hypophthalmus*)^[31]和细鳞鲱(*Brachymystax lenok*)^[32]等饲料中添加不同水平鱼油后肠道脂肪酶活性也有类似的变化。而三倍体虹鳟随着鱼油添加水平增加肠道脂肪酶活性呈先升高后降低趋势^[19]; 吉富罗非鱼饲料中添加过量鱼油水平可显著降低前、中肠脂肪酶活性^[33]。本试验中添加较高鱼油水平未观察到美洲鳗鲡幼鱼脂肪酶活性受到明显抑制, 可能与鱼类对鱼油利用的能力、鱼油添加水平和脂肪需求量等方面的差异有关; 添加鱼油使美洲鳗鲡幼鱼肠道蛋白酶和淀粉酶活性降低, 与点篮子鱼(*Siganus guttatus*)饲料中添加鱼油后降低肠道蛋白酶和淀粉酶研究结果类似^[34]; 在幼鱼和成鱼阶段石斑鱼添加9%和12%鱼油后降低肠道淀粉酶也有相同的结果^[15]。然而不同鱼油添加水平间美洲鳗鲡幼鱼肠道蛋白酶和淀粉酶活性接近, 类似的结果在黄颡鱼^[20]和丝尾鲮(*Hemibagrus wyckoides*)^[35]饲料中添加鱼油研究中

出现。这说明在一定鱼油水平基础上继续添加对鱼类肠道蛋白酶和淀粉酶活性影响不大。从添加鱼油对鱼类肠道消化酶影响的变化情况来看, 肉食性鱼类尤其是幼鱼阶段在脂肪源充足时, 优先利用脂肪作为能量来源, 通过提高脂肪酶的活力而增加对脂肪的消化吸收; 减少蛋白质氨基酸及碳水化合物作为能量的消耗, 相应降低肠道蛋白酶和淀粉酶的活性。

3.3 饲料中鱼油添加水平对美洲鳗鲡幼鱼体成分的影响

鱼体组成是反映鱼类生理状态和营养水平的重要指标。饲料中主要营养素水平的变化都会对鱼体组成产生影响。在本试验中, 添加6%、9%和12%鱼油显著提高美洲鳗鲡幼鱼全鱼粗脂肪含量, 而添加3%、6%和9%鱼油对全鱼粗蛋白质含量无显著影响。这些结果与尼罗罗非鱼^[17]、泰国草鱼^[21]、黄姑鱼^[22]和大黄鱼^[23]添加鱼油对全鱼体成分影响的报道相似, 说明在饲料中添加一定水平的鱼油可促进全鱼脂肪沉积^[36], 而不影响鱼体中蛋白质的沉积。但本试验中仅添加12%的高水平鱼油显著降低美洲鳗鲡幼鱼全鱼粗蛋白含量, 与黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)饲料中添加10%鱼油后全鱼粗蛋白含量变化相同^[37], 说明添加过高鱼油添加可减少鱼体蛋白质的蓄积。

3.4 饲料中鱼油添加水平对美洲鳗鲡幼鱼肝脏脂肪代谢酶水平或活性的影响

FAS在鱼类肝脏合成脂肪酸的过程中起着重要作用^[38], 其水平随着饲料脂肪水平的升高而降低^[39]。在本试验中, 添加9%和12%水平的鱼油显著降低美洲鳗鲡幼鱼肝脏FAS水平, 与黑鲷添加10.0%鱼油^[37]、道氏虹鳟添加10.95%和14.09%鱼油^[40]和尼罗罗非鱼添加3.0%、6.0%、9.0%、12.0%和15.0%鱼油^[17]后FAS水平降低的结果一致。研究表明, 鱼油富含EPA和DHA, 属于n-3系列不饱和脂肪酸, 是FAS酶及相关基因的抑制剂^[39, 41]。在道氏虹鳟添加7.86%、10.95%和14.09%鱼油^[39], 斜带石斑鱼添加7.0%、10.5%和14.0%鱼油^[42], 及大黄鱼添加12%鱼油也发现肝脏FAS基因表达丰度显著降低^[43]。此外, 高水平n-3系列不饱和脂肪酸还可通过降低乙酰辅酶A氧化酶和提高激素敏感脂肪酶的活性^[44], 降低脂类合成相关基因和蛋白的表达水平^[45], 从而抑制脂质合成。

LPL和HL是鱼类肝脏中参与脂肪分解代谢过程中的两个关键酶。LPL主要催化血浆中乳糜颗粒和极低密度酯蛋白, 将甘油三酯分解成脂肪酸和甘油^[46]。HL主要参与高密度脂蛋白的重构和乳糜微粒残骸、低密度脂蛋白的代谢以及胆固醇的逆

向转运^[47]。在本试验中, 仅12%鱼油添加水平显著提高美洲鳗鲡幼鱼肝脏LPL和HL活性, 与道氏虹鳟添加10.95%和14.09%鱼油^[40]、许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)添加9.0%和12.0%鱼油^[48]、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)添加12.94%鱼油^[49]、梭鱼(*Chelon haematocheilus*)添加12%和15%^[26]和尼罗罗非鱼添加6.0%、9.0%、12.0%和15.0%^[17]鱼油后, 肝脏LPL和HL活性与对照组相比的变化情况类似。而幼鱼和成鱼阶段石斑鱼添加高水平鱼油使这两种酶的活性显著降低^[15]; 在尼罗罗非鱼和多鳞鳕(*Sillago sihama*)等饲料中添加高水平鱼油也发现, LPL和HL活性与适宜鱼油添加水平组相比显著下降^[17, 50]。这可能是不同品种鱼类在脂肪利用能力、脂肪需要量、鱼油添加水平和基础饲料脂肪水平等方面差异导致的。但总的来看, 添加一定水平的鱼油可提高肝脏脂肪分解酶的活性, 可能是饲料中添加鱼油使高水平的n-3多不饱和脂肪酸通过激活PPAR α 上调LPL靶基因表达所致^[51]。鱼油调节鱼类肝脏HL活性的研究鲜见报道, 具体机制还有待进一步研究。

4 结论

在本试验条件下, 饲料中适量添加鱼油可提高美洲鳗鲡幼鱼生长性能、肠道脂肪酶活性和全鱼粗脂肪含量, 调节肝脏脂肪代谢酶水平或活性; 美洲鳗鲡幼鱼饲料中适宜的鱼油添加水平推荐为6.43%—6.78%, 此时饲料中脂肪水平为11.30%—11.59%。

参考文献:

- [1] Yu H Z, Liu Q Y, Zhang K. Nutrition of eels, breeding status and the countermeasures [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(20): 6632-6633. [于海振, 李秋云, 张坤. 鳗鲡的营养成分·养殖现状与对策 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(20): 6632-6633.]
- [2] Xie R T, Amenogbe E, Chen G, et al. Effects of feed fat level on growth performance, body composition and serum biochemical indices of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* × *Epinephelus polyphekadion*) [J]. *Aquaculture*, 2021(530): 735813.
- [3] Jin M, Lu Y, Yuan Y, et al. Regulation of growth, antioxidant capacity, fatty acid profiles, hematological characteristics and expression of lipid related genes by different dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*) [J]. *Aquaculture*, 2017(471): 55-65.
- [4] Qiu H, Jin M, Li Y, et al. Dietary lipid sources influence fatty acid composition in tissue of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) by regulating triacylglycerol syn-

- thesis and catabolism at the transcriptional level [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(1): e0169985.
- [5] Chen Y S, Su H. Effect of the use of fish oil in European eel (*Anguilla anguilla*) culture [J]. *Feed Research*, 2001(7): 18-19. [陈优胜, 苏洪. 鱼油在欧洲鳗鲡养殖中的使用效果 [J]. 饲料研究, 2001(7): 18-19.]
- [6] Han X P. Eel Culture [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1990: 16-19. [韩先朴. 鳗鲡养殖 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1990: 16-19.]
- [7] Gallego M G, Hidalgo M C, Suarez M D, *et al.* Feeding of the European eel *Anguilla anguilla* II. Influence of dietary lipid level [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1993, **105**(1): 171-175.
- [8] De Silva S S, Gunasekera R M, Gooley G, *et al.* Growth of Australian shortfin eel (*Anguilla australis*) elvers given different dietary protein and lipid levels [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2001, **7**(1): 53-57.
- [9] Chen S J, Liu P, Jia Y M, *et al.* Dietary lipid concentrations influence growth, body composition, morphology of the liver and mid-intestine, and antioxidant status of marbled eel (*Anguilla marmorata*) [J]. *Aquaculture International*, 2020, **28**(6): 2287-2302.
- [10] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 17th ed [Z]. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA, USA, 2003: 920.39-2001.11.
- [11] Wang J T, Liu T, Zheng P Q, *et al.* Effect of dietary lipid levels on growth performance, body composition, and feed utilization of juvenile spotted knifejaw *Oplegnathus punctatus* [J]. *Aquaculture Reports*, 2021, **21**(7): 100797.
- [12] Yue H M, Huang X Q, Ruan R, *et al.* Effect of dietary lipid on growth, body composition, serum biochemistry and hepatic metabolite alteration in Chinese rice field eel (*Monopterus albus*) fingerlings [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, **27**(1): 63-76.
- [13] Yuan Y H, Li S L, Zhang L, *et al.* Influence of dietary lipid on growth performance and some lipogenesis-related gene expression of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) larvae [J]. *Aquaculture Research*, 2017, **48**(3): 767-779.
- [14] He Z G, Wang J L, Wu Y A, *et al.* Effect of dietary lipid levels on serum biochemical indices, immune responses and antioxidant capability of juvenile furong crucian carp (Furong carp♀ × red crucian carp♂) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(4): 655-662. [何志刚, 王金龙, 伍远安, 等. 饲料脂肪水平对芙蓉鲤鲫幼鱼血清生化指标、免疫反应及抗氧化能力的影响 [J]. 水生生物学报, 2016, **40**(4): 655-662.]
- [15] Dong X H, Yang J J, Tan B P, *et al.* Dietary lipid requirements of orange-spotted grouper (*Epinephelus coioides*) in juvenile and grow out stages [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, **27**(1): 133-146. [董晓慧, 杨俊江, 谭北平, 等. 幼鱼和养成阶段斜带石斑鱼对饲料中脂肪的需要量 [J]. 动物营养学报, 2015, **27**(1): 133-146.]
- [16] Wang A M, Yang W P, Shen Y L, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth performance, whole body composition and fatty acid composition of juvenile gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Aquaculture Research*, 2015, **46**(11): 2819-2828.
- [17] Tu W, Tian J, Wen H, *et al.* Optimal dietary lipid requirement of advanced juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, **19**(3): 436-444. [涂玮, 田娟, 文华, 等. 尼罗罗非鱼幼鱼饲料的适宜脂肪需要量 [J]. 中国水产科学, 2012, **19**(3): 436-444.]
- [18] Yue Y F, Peng S M, Shi Z H, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth, intestinal digestive enzyme and main lipid metabolic enzyme activities of *Sebastiscus marmoratus* [J]. *South China Fisheries Science*, 2012, **8**(6): 50-56. [岳彦峰, 彭士明, 施兆鸿, 等. 饲料脂肪水平对褐菖鲉生长、肠道消化酶及主要脂代谢酶活力的影响 [J]. 南方水产科学, 2012, **8**(6): 50-56.]
- [19] Meng Y Q, Qian K K, Ma R, *et al.* Effects of dietary lipid levels on sub-adult triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): growth performance, digestive ability, health status and expression of growth-related genes [J]. *Aquaculture*, 2019(513): 734394.
- [20] Gobeng Likambo Seme Mamuru. Dietary lipid levels requirements of hybrid yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco* × *P. vachelli*) [D]. Nanjing: Agricultural University, 2019: 13-28. [Gobeng Likambo Seme Mamuru. 杂交黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco* × *P. vachelli*)饲料脂质需要量研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 13-28.]
- [21] Nayak M, Saha A, Pradhan A, *et al.* Dietary fish oil replacement by linseed oil: Effect on growth, nutrient utilization, tissue fatty acid composition and desaturase gene expression in silver barb (*Puntius gonionotus*) fingerlings [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part B Biochemistry & Molecular Biology*, 2017(205): 1-12.
- [22] Wang L G, Lu Q, Luo S Y, *et al.* Effect of dietary lipid on growth performance, body composition, plasma biochemical parameters and liver fatty acids content of juvenile yellow drum *Nibea albiflora* [J]. *Aquaculture Reports*, 2016(4): 10-16.
- [23] Yi X W, Zhang F, Xu W, *et al.* Effects of dietary lipid content on growth, body composition and pigmentation of large yellow croaker *Larimichthys croceus* [J]. *Aquaculture*, 2014(434): 355-361.
- [24] Lee S M, Jeon I G, Lee J Y. Effects of digestible protein and lipid levels in practical diets on growth, protein utilization and body composition of juvenile rockfish (*Sebastes schlegelii*) [J]. *Aquaculture*, 2002, **211**(1-4): 227-239.
- [25] Skalli A, Hidalgo M C, Abellán E, *et al.* Effects of the dietary protein/lipid ratio on growth and nutrient utilization in common dentex (*Dentex dentex* L.) at different growth

- stages [J]. *Aquaculture*, 2004, **235**(1-4): 1-11.
- [26] Zhang C N, Wang A M, Liu W B, *et al.* Effects of dietary lipid levels fat deposition, lipid metabolize enzyme and antioxidant activities of *Chelon haematocheilus* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, **20**(1): 108-115. [张春暖, 王爱民, 刘文斌, 等. 饲料脂肪水平对梭鱼脂肪沉积、脂肪代谢酶及抗氧化酶活性的影响 [J]. *中国水产科学*, 2013, **20**(1): 108-115.]
- [27] Cheng W, Lai C S, Lin Y H. Quantifying the dietary protein and lipid requirements of marble eel, *Anguilla marmorata*, with different body weight [J]. *Journal of the Fisheries Society of Taiwan*, 2013, **40**(2): 135-142.
- [28] Yu H Z. Comparative study of nutrition composition of *Anguilla marmorata* [D]. Xiamen: Jimei University, 2014: 14-18. [于海振. 花鳗鲡营养成分比较研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2014: 14-18.]
- [29] Xiao W W. Effects of dietary lipid and protein levels on growth, body composition, non-specific immunity and hematological parameters of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021: 17-20. [肖温温. 饲料中脂肪与蛋白质水平对大口黑鲈生长、体组成、非特异性免疫和血液学的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012: 17-20.]
- [30] Qin C J, Chen L Q, Li E C *et al.* A review: Effects of dietary lipid levels on growth and lipid metabolism in fish [J]. *Fisheries Science*, 2013, **32**(8): 485-491. [覃川杰, 陈立侨, 李二超, 等. 饲料脂肪水平对鱼类生长及脂肪代谢的影响 [J]. *水产科学*, 2013, **32**(8): 485-491.]
- [31] Sivaramakrishnan T, Sahu N P, Jain K K, *et al.* Optimum dietary lipid requirement of *Pangasianodon hypophthalmus* juveniles in relation to growth, fatty acid profile, body indices and digestive enzyme activity [J]. *Aquaculture International*, 2017, **25**(2): 941-954.
- [32] Chang J, Niu H X, Jia Y D, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, digestive tract enzyme activity and lipid deposition of juvenile Manchurian trout, *Brachymystax lenok* (Pallas) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(2): 694-701.
- [33] Han G M, Wang A M, Xu P, *et al.* Effects of dietary lipid levels on fat deposition and fatty acid profiles of GIFT, *Oreochromis niloticus* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, **18**(2): 338-349. [韩光明, 王爱民, 徐跑, 等. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼体脂沉积及脂肪酸组成的影响 [J]. *中国水产科学*, 2011, **18**(2): 338-349.]
- [34] Zhang L Z, Zhu W, Wang S, *et al.* Effects of dietary lipid levels on activities of digestive enzymes and blood biochemical parameters of *Siganus guttatus* [J]. *Marine Fisheries*, 2014, **36**(2): 170-176. [章龙珍, 朱卫, 王好, 等. 饲料脂肪水平对点篮子鱼消化酶活性和血液主要生化指标的影响 [J]. *海洋渔业*, 2014, **36**(2): 170-176.]
- [35] Deng J M, Zhang X D, Sun Y, *et al.* Optimal dietary lipid requirement for juvenile Asian red-tailed catfish (*Hemibagrus wyckioides*): Dietary lipid level for *Hemibagrus wyckioides* [J]. *Aquaculture Reports*, 2021(20): 100666.
- [36] Fu S J, Xie X J, Zhang W B, *et al.* The nutrition of *silurus meridionalis*: III. Protein-sparing effect of dietary lipid [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, **25**(1): 70-75. [付世建, 谢小军, 张文兵, 等. 南方鲇的营养学研究: III. 饲料脂肪对蛋白质的节约效应 [J]. *水生生物学报*, 2001, **25**(1): 70-75.]
- [37] Pan T T, Qiu H, Zhu T T, *et al.* Dietary lipid level affects growth performance, antioxidant capacity, hematological characteristics and lipid metabolism in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*) [J]. *Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2018(70): 1521.
- [38] Tian J J, Ji H, Oku H, *et al.* Effects of dietary arachidonic acid (ARA) on lipid metabolism and health status of juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *Aquaculture*, 2014(430): 57-65.
- [39] Wang A M. Effects of dietary lipid levels on growth and fat metabolism of GIFT strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011: 22-24. [王爱民. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼生长及脂肪代谢调节的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 22-24.]
- [40] Zhang J, Li Y, Sun G X, *et al.* Effects of lipid levels on growth, fatty acid enzymatic activity and gene expression of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in a recirculating aquaculture system [J]. *Marine Sciences*, 2017, **41**(10): 24-32. [张静, 李勇, 孙国祥, 等. 脂肪营养对封闭循环水养殖道氏虹鳟生长、相关代谢酶及基因表达的影响 [J]. *海洋科学*, 2017, **41**(10): 24-32.]
- [41] An W Q. Effects of lipid sources, n-3 HUFA levels and DHA/EPA ratios on growth performance and lipid metabolism of juvenile hybrid grouper ($\text{♀} \textit{Epinephelus fuscoguttatus} \times \text{♂} \textit{Epinephelus lanceolatus}$) [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020: 41-42. [安文强. 脂肪源、n-3 HUFA水平及DHA/EPA比值对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼生长性能和脂肪代谢的影响 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020: 41-42.]
- [42] Li S L, Mai K S, Xu W, *et al.* Effects of dietary lipid level on growth, fatty acid composition, digestive enzymes and expression of some lipid metabolism related genes of orange-spotted grouper larvae (*Epinephelus coioides* H.) [J]. *Aquaculture Research*, 2016, **47**(8): 2481-2495.
- [43] Yan J, Liao K, Mai K S, *et al.* Dietary lipid levels affect lipoprotein clearance, fatty acid transport, lipogenesis and lipolysis at the transcriptional level in muscle and adipose tissue of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Aquaculture Research*, 2017, **48**(7): 3925-3934.
- [44] Li F N, Duan Y H, Li Y H *et al.* Effects of dietary n-6: n-3 PUFA ratio on fatty acid composition, free amino acid profile and gene expression of transporters in finishing pigs [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2015, **113**(5): 739-748.

- [45] Duan Y H, Li F N, Li L L, *et al.* n-6: n-3 PUFA ratio is involved in regulating lipid metabolism and inflammation in pigs [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2014, **111**(3): 445-451.
- [46] Lou G, Xu J H, Teng Y J, *et al.* Effects of dietary lipid levels on the growth, digestive enzyme, feed utilization and fatty acid composition of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus* L.) reared in freshwater [J]. *Aquaculture Research*, 2010, **41**(2): 210-219.
- [47] Perret B, Mabile L, Martinez L, *et al.* Hepatic lipase: structure/function relationship, synthesis, and regulation [J]. *Journal of Lipid Research*, 2002, **43**(8): 1163-1169.
- [48] Song L P, Mao S Q, Ma G H, *et al.* Effects of dietary lipid level on lipid deposition, blood biochemistry indices and lipid metabolic enzyme activities of *Sebastes schlegeli* [J]. *Journal of Fishries China*, 2014, **38**(11): 1879-1888. [宋理平, 冒树泉, 马国红, 等. 饲料脂肪水平对许氏平鲷脂肪沉积、血液生化指标及脂肪代谢酶活性的影响 [J]. 水产学报, 2014, **38**(11): 1879-1888.]
- [49] Sun J Z, Wang J Y, Ma J J, *et al.* Effects of dietary bile acids on growth, body composition and lipid metabolism of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) at different lipid levels [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, **45**(3): 617-625. [孙建珍, 王际英, 马晶晶, 等. 不同脂肪水平下添加胆汁酸对大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)幼鱼生长、体组成和脂肪代谢的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2014, **45**(3): 617-625.]
- [50] Liu H, Dong X H, Tan B P, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth, body composition, enzymes activity, expression of IGF-1 and TOR of juvenile northern whiting, *Sillago sihama* [J]. *Aquaculture*, 2021(533): 736166.
- [51] Peng M. The effects of dietary lipid level and fatty acids composition on lipid deposition in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 41-42. [彭墨. 饲料脂肪水平和脂肪酸组成对大菱鲆幼鱼脂肪沉积的影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 41-42.]

OPTIMAL LEVEL OF FISH OIL SUPPLEMENTATION IN DIET OF JUVENILE AMERICAN EELS (*ANGUILLA ROSTRATA*)

QU Qian, ZHAO Pan-Yue, CAI Guo-He and ZHAI Shao-Wei

(Engineering Research Center of the Modern Industry Technology for Eel, Ministry of Education, Fisheries College of Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This experiment was conducted to achieve the optimal dietary fish oil supplementation level of juvenile American eels (*Anguilla rostrata*) by evaluating the parameters of growth performance, digestive enzymes activities, body composition, and lipid metabolism enzymes in the liver. 800 juvenile American eels with an average body weight of (8.34 ± 0.12) g per fish were randomly divided into 4 treatment groups with 5 replicates per group and 40 fish per replicate. The basal diets were supplemented with 0 (control group), 3% (FO3 group), 6% (FO6 group), 9% (FO9 group), and 12% (FO12 group) fish oil, respectively. The trial lasted for 56 days. Dietary fish oil supplementation significantly affected the growth performance of juvenile American eels. The weight gain rate, feeding rate, and feed efficiency of juvenile American eels in FO6 group were significantly higher than those in other groups ($P < 0.05$). Compared with the control group, intestinal lipase activities increased significantly in fish oil supplementation groups ($P < 0.05$). The activities of protease and amylase decreased significantly by fish oil supplementation ($P < 0.05$), and there was no significant difference in the activities of protease and amylase among different fish oil supplementation groups ($P > 0.05$). Compared with the control group, the contents of crude lipid of the whole body increased significantly in FO6 group, FO9 group, and FO12 group ($P < 0.05$). The content of crude protein decreased significantly only in FO12 group ($P < 0.05$). The contents of moisture and ash were similar among all the fish oil supplementation groups ($P > 0.05$). The activities of fatty acid synthase decreased significantly only in FO9 and FO12 groups ($P < 0.05$), the activities of lipoprotein esterase and liver lipase increased significantly only in FO12 group ($P < 0.05$). In conclusion, the adequate supplementation level of fish oil in diet might improve the growth performance by regulating the intestinal digestive enzymes activities, lipid content in whole fish and lipid metabolism enzymes levels or activities in the liver. The recommended level of fish oil supplementation in the diet was 6.43% to 6.78% for the highest weight gain rate and feed efficiency of juvenile American eels.

Key words: Fish oil; Growth performance; Digestive enzymes; Body composition; Lipid metabolism; *Anguilla rostrata*