

文章编号: 1000-0615(2019)10-2218-12

DOI: 10.11964/jfc.20190811931

饲料蛋白质水平对匙吻鲟生长、体组成及健康状况的影响

刘阳洋, 于海波, 吉红*, 武文一, 周继术, 张斌鑫

(西北农林科技大学动物科技学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探讨饲料蛋白质水平对匙吻鲟生长、体组成、消化酶活性、血清生化指标、抗氧化性能的影响。配制了5个不同蛋白质水平(35.44%、37.20%、39.19%、42.05%和45.30%)的等脂饲料, 将初始体质量为(158.00±0.29)g的匙吻鲟在室外养殖系统中进行56d的饲养。结果显示: ①随着饲料蛋白质水平的提高, 实验鱼的增重率(WGR)和特定生长率(SGR)呈先上升后下降的趋势, 其中39.19%、42.05%组的WGR和SGR显著高于35.44%、45.30%组; 45.30%饲料组的蛋白质效率(PER)显著低于其他各组。以WGR和SGR为参考指标, 回归分析结果表明, 匙吻鲟获得最佳生长时对饲料中蛋白质水平的要求分别为40.67%和40.84%。②随饲料蛋白质水平的提高, 实验鱼体成分没有显著性变化。③39.19%组蛋白质表观消化率显著高于其他组, 45.30%组脂肪表观消化率和干物质表观消化率显著高于39.19%组和42.05%组; 42.05%组肠蛋白酶活性和肝脏脂肪酶活性显著高于其他组; 42.05%组肝脏淀粉酶活性略高于其他组; 肝脏蛋白酶活性没有明显变化趋势。④饲料蛋白质水平对匙吻鲟血清生化指标有显著影响。39.19%、42.05%组实验鱼的谷丙转氨酶(ALT)显著低于其余各组; 37.20%、39.19%组的球蛋白(GLOB)含量显著高于其他组, 35.44%组白蛋白(ALB)含量显著低于其他组; 总蛋白(TP)含量39.19%、42.05%和45.30%组之间无显著性差异。⑤饲料蛋白质水平为39.19%以上时, 血清过氧化氢酶(CAT)活性显著高于低蛋白质水平组; 除37.20%组, 其余各组间超氧化物歧化酶(SOD)活性差异不显著; 丙二醛(MDA)含量各组之间没有显著性差异。研究表明, 在本实验条件下, 匙吻鲟适宜饲料蛋白质水平为40%~41%。

关键词: 匙吻鲟; 蛋白质水平; 生长; 体组成; 消化; 健康状况

中图分类号: S 963

文献标志码: A

蛋白质对鱼类有着重要的生理作用, 主要用于鱼体组织和器官的生长及修复, 既是体内各种激素和酶类的重要组成成分, 也是鱼体所需部分能量的来源, 在饲料成本中占有较大比例^[1]。当饲料中蛋白质水平不足时, 鱼类体质量增长缓慢甚至下降, 饲料消化率较低, 影响鱼类健康; 当饲料中蛋白质水平过高, 不仅会造成饲料蛋白质资源的浪费, 增加饲料成本, 还会导致氨氮排放增加, 增加池塘水质管理的压力^[2]。因此, 饲料蛋白质水平对于提升鱼类商品品质、降低养殖成本、提高经济效益, 减少环

境污染有着重要作用^[3]。迄今为止, 研究者已确定了史氏鲟(*Acipenser schrenckii*)^[4]、中华鲟(*A. sinensis*)^[5]、俄罗斯鲟(*A. gueldenstaedti*)^[6]、高首鲟(*A. transmontanus*)^[7]、西伯利亚鲟(*A. baeri*)^[8]的适宜饲料蛋白质含量为38%~42%。研究结果显示, 不同种类的鲟对饲料中蛋白质的需求比较接近^[9]。

匙吻鲟(*Polyodon spathula*)隶属于鲟形目(Acipenseriformes), 匙吻鲟科(Polyodontidae), 为现存匙吻鲟科仅有的2个物种之一^[10-11]。该鱼肉质细嫩、味道鲜美, 是美国重要的经济鱼类。

收稿日期: 2019-08-31 修回日期: 2019-09-28

资助项目: 陕西省科技统筹创新项目(2015KTTSNY01-05); 陕西省创新人才推进计划-科技创新团队(2018TD-021)

通信作者: 吉红, E-mail: jihong@nwsuaf.edu.cn

匙吻鲟适应性强、生长迅速、性情温顺、食物链短,是所有鲟中唯一以浮游动物为食的鱼类。其饵料来源广、易养易捕,适合于水库、湖泊和池塘等水域养殖。近年来,我国的许多地区已经开展匙吻鲟的养殖生产^[12]。有关匙吻鲟养殖的研究主要集中于生物学特性及生长规律、养殖及繁殖技术、消化率及消化酶的研究、肌肉品质改善及微生态制剂对生长的影响等^[13-23]方面,而对匙吻鲟饲料中适宜蛋白质水平的研究却鲜有报道。孙海涛等^[24]研究了饲料蛋白质水平对匙吻鲟幼鱼肌肉营养成分及消化酶活性的影响,发现饲料蛋白质水平对匙吻鲟肌肉粗蛋白含量、酸性蛋白酶、碱性蛋白酶和 α -淀粉酶都会产生显著影响,从而认为其饲料蛋白质水平为39.10%比较适宜,但不同饲料蛋白质水平对匙吻鲟生长、体成分及健康状况的影响尚未见详细报道,这在一定程度上制约了匙吻鲟专用饲料的开发及其养殖生产水平的进一步提高。

因此,本研究采用饲养实验的方式,探讨了同一脂肪水平下不同饲料蛋白质水平对匙吻鲟生长、体组成及血清生化指标等的影响,以期对匙吻鲟的营养学研究和专用饲料的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

以鱼粉、膨化大豆、豆粕和菜籽粕等为蛋白源,配制5个不同蛋白质水平的等脂饲料,饲料粗蛋白实测值分别为35.44%、37.20%、39.19%、42.05%和45.30%。所有原料粉碎后过80目筛,按配比称量后,膨化加工成直径为2.5 mm的膨化饲料,晾干,冰箱4℃备用保存。饲料配方和营养水平见表1。

1.2 实验鱼与饲养管理

养殖实验在西北农林科技大学安康水产试验示范站室外养殖系统进行。实验鱼来自安康水产试验示范站,选用同一批次,大小均匀、健康无病,体质量(158.00±0.29)g的匙吻鲟,随机分为5组,分别饲喂5组实验饲料,每组3个重复,每个重复18尾鱼,分别放养于3.54 m×4.42 m×0.90 m的水泥池中,控制水深0.60 m左右,水体积为9.39 m³,实验周期56 d。

正式实验前,将匙吻鲟在养殖系统中进行

2周的驯养,期间投喂粗蛋白质水平约42%的商品饲料。养殖过程控制水温在23~30.5℃,pH 7~8.2,溶解氧5~12 mg/L,氨氮<0.1 mg/L,亚硝酸盐<0.01 mg/L,硫化物<0.05 mg/L。每天饱食投喂3次(20:00、00:00、04:00),投喂1 h后,采用虹吸法收集残饵和粪便。统计残饵量,用于计算饲料系数、摄食率等;收集的粪便,先存于-20℃冰箱,冻干后用于测定表观消化率。

1.3 样品采集

养殖实验结束后,停止喂食24 h,所有实验鱼于取样前麻醉(MS222, 100 mg/kg),测定体质量、体长、全长,计算增重率、肥满度、特定生长率、增重率。每个重复随机抽取3尾鱼用作全鱼样品。

每个重复再随机抽取6尾鱼尾静脉采血,4℃冰箱静置12 h,4℃离心(4 000 r/min, 10 min),上清液先冻存于液氮中,后转-80℃冰箱保存;解剖取内脏团,分离肝脏、肾、脾及肠道,称重,计算脏体比、肝体比及肠体比,并取肌肉、肝脏于-20℃冰箱保存,用作常规成分分析。

最后每个重复随机抽取6尾鱼,不采血,解剖取肌肉、肝脏、肠道、胃、肾脏、脾脏先冻存于液氮中,后转-80℃冰箱保存,用作血清生化指标、消化酶及抗氧化酶活性的测定。

1.4 样品测定

饲料、组织的水分含量采用105℃烘干法测定;粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定;粗脂肪含量采用索氏抽提法测定;粗灰分含量采用550℃灼烧法测定。

表观消化率:引用高民等^[25]的方法,采用三氧化二铬比色法测定。

消化酶:肠蛋白酶、肝脏蛋白酶、肝脏脂肪酶、肝脏淀粉酶的活性使用南京建成生物工程研究所试剂盒测定,蛋白浓度用考马斯亮蓝染色法进行测定。

血清生化指标:总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、球蛋白(GLOB)、白球比(A/G)、谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、葡萄糖(GLU)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)的浓度采用全自动生化分析仪(日立7180)测定。

血清抗氧化指标:超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛(MDA)含量

表 1 饲料配方及营养组成(风干基础)
Tab. 1 Formulation and nutrient composition of the diets (air-dry basis) %

项目 items	饲料蛋白质水平/% dietary protein levels				
	35.44	37.20	39.19	42.05	45.30
原料 ingredients					
鱼粉 fish meal	19.00	27.60	36.20	44.80	53.30
豆粕 soybean meal	18.00	14.40	10.70	7.10	3.50
肉粉 meat meal	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
酒糟 DDGS	7.00	5.20	3.50	1.80	0.00
膨化大豆 extruded soybean	4.00	3.80	3.50	3.20	3.00
菜籽粕 rapeseed meal	7.00	5.90	4.90	3.80	2.80
米糠 rice bran	10.00	7.50	5.00	2.50	0.00
面粉 wheat meal	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00
鱼油 fish oil	2.94	2.20	1.46	0.07	0.00
豆油 soybean oil	0.06	0.80	1.54	2.30	3.00
纤维素 cellulose ¹	0.00	0.60	1.20	1.80	2.40
鲟预混料 premix ²	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
三氧化二铬 Cr ₂ O ₃	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
营养水平 nutrient levels³					
粗蛋白质 crude protein	35.44	37.20	39.19	42.05	45.30
粗脂肪 crude lipid	5.60	5.42	5.89	5.54	5.19
粗灰分 crude ash	10.54	11.25	11.75	12.76	13.43
水分 moisture	5.30	5.81	6.20	5.21	6.41

注: 1. 使用的纤维素是微晶纤维素。2. 特种水产动物预混料为每千克饲料提供(g/kg): 维生素A 20.1; 维生素D 0.405, 维生素E 7.4, 维生素K₃ 0.34, 维生素B₁ 0.67, 维生素B₂ 1, 维生素B₆ 0.8, 维生素B₁₂ 0.001 4, 维生素C 10, D-泛酸2.65, 叶酸0.33, 烟酰胺5.35, 氯化胆碱35, 生物素0.034, 肌醇8, 铁14, 五水硫酸铜0.35, 锌4, 锰0.001 4, 镁10, 钴0.03, 碘0.04, 硒0.035。3.均为实测值

Notes: 1. the cellulose used was microcrystalline cellulose. 2. premixtures for special aquatic animal provided the following per kg of diets (g/kg): vitamin A 20.1, vitamin D 0.405, vitamin E 7.4, vitamin K₃ 0.34, vitamin B₁ 0.67, vitamin B₂ 1, vitamin B₆ 0.8, vitamin B₁₂ 0.001 4, vitamin C 10; D-pantothenic acid 2.65, folic acid 0.33, nicotinamide 5.35, choline chloride 35; biotin 0.034, inositol 8, Fe 14, CuSO₄·5H₂O 0.35, Zn 4, Mn 0.001 4, Mg 10, Co 0.03, I 0.04, Se 0.035. 3. P/E was a calculated value and others were measured values

使用南京建成生物工程研究所试剂盒测定。

1.5 数据分析

各参数按下列公式计算:

存活率(survival rate, SR, %) = $N_t/N_0 \times 100\%$

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

特定生长率(specific growth rate, SGR, %/d) = $(\ln W_t - \ln W_0)/t \times 100\%$

饲料系数(feed conversion ratio, FCR, %) = $F/(TW_t - TW_0) \times 100\%$

摄食率(feed intake, FI, %/d) = $F/[(TW_0 + TW_t)/2 \times t] \times 100\%$

蛋白质效率(protein efficiency ratio, PER, %) = $(TW_t - TW_0)/(F \times P_f) \times 100\%$

肝体比(hepatosomatic index, HSI, %) = $L_w/W_t \times 100\%$

脏体比(viscerosomatic index, VSI, %) = $[W_t - C_w]/W_t \times 100\%$

肠体比(intestine index, ISI, %) = $I_w/W_t \times 100\%$

鱼体肥满度(condition factor, CF, g/cm³) = $W_t/L_b^3 \times 100$

干物质表观消化率(matter ADC, %) = $(1 - Cr_f/Cr_e) \times 100\%$

粗蛋白质表观消化率(protein ADC, %) = $[1 -$

$$(Cr_f \times P_e) / (Cr_e \times P_f) \times 100\%$$

$$\text{粗脂肪表观消化率(lipid ADC, \%)} = [1 - (Cr_f \times L_e) / (Cr_e \times L_f)] \times 100\%$$

式中, N_t 为终末尾数, N_0 为初始尾数, W_t 为终末鱼体质量(g), W_0 为初始鱼体质量(g), TW_t 为实验结束时鱼体总重, TW_0 为实验开始时鱼体总重, F 为摄食量(g), t 为饲养天数(d), P_f 为饲料蛋白质含量(%), Cr_f 为饲料中 Cr_2O_3 含量(%), Cr_e 为粪便中 Cr_2O_3 含量(%), L_f 为饲料脂肪含量(%), P_e 为粪便中蛋白质含量(%), L_e 为粪便中脂肪含量(%), L_w 为肝脏重量, C_w 为胴体质量, I_w 为肠道重量, L_b 为体长。

实验所得数据采用SPSS 22.0软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 采用Duncan氏多重比较来检验实验处理均值间的差异显著性, 当 $P < 0.05$ 时表示均值间差异显著。所有数据以平均值 \pm 标准差(mean \pm SD)表示。

2 结果

2.1 饲料蛋白质水平对匙吻鲟生长性能的影响

随着饲料中蛋白质水平的增加, WGR和SGR呈先上升后下降的趋势, 39.19%、42.05%组WGR和SGR显著高于35.44%、45.30%组($P < 0.05$);

FI和FCR随着饲料蛋白质水平的增加呈现先下降后上升的趋势, 45.30%组FI和FCR显著高于39.19%、42.05%组($P < 0.05$); 45.30%组PER也显著低于其余各组($P < 0.05$)。HSI变化趋势不明显, 42.05%组略低于其他组($P > 0.05$); 肠体比39.19%、42.05%组显著高于37.20%和45.30%组($P < 0.05$); VSI随着饲料蛋白质水平的增加呈现下降趋势。不同蛋白质水平组间CF无显著性差异($P > 0.05$)(表2)。

饲料蛋白质水平与增重率及特定生长率的关系符合典型的二次曲线模型。以WGR为参考指标($Y = -0.547x^2 + 44.501x - 789.43$, $R^2 = 0.9409$)(图1), 通过分析得出当WGR最大时, 饲料蛋白质水平为40.67%; 以SGR为参考指标($Y = -0.0052x^2 + 0.4247x - 7.0688$, $R^2 = 0.9496$)(图2), 当SGR最大时, 饲料蛋白质水平为40.84%, 与WGR结果相近。

2.2 饲料蛋白质水平对匙吻鲟体组成的影响

饲料不同蛋白质水平对匙吻鲟体成分没有显著性影响($P > 0.05$)(表3)。37.20%、39.19%组的全鱼粗蛋白含量、肌肉粗蛋白含量和肝脏粗蛋白含量略高于其他组; 全鱼和肝脏的粗脂肪含量随饲料蛋白质水平增加呈上升趋势, 水分含量则呈下降趋势; 42.05%组肌肉粗灰分含量低于其他各组。

表 2 饲料蛋白质水平对匙吻鲟生长性能和生物学性状的影响

Tab. 2 Effects of dietary protein level on growth performance and biological characteristics of *P. spathula* %

项目 items	饲料蛋白质水平/% dietary protein level				
	35.44	37.20	39.19	42.05	45.30
初始均重/g IBW	157.95 \pm 0.48	158.07 \pm 0.24	158.01 \pm 0.13	158.14 \pm 0.21	157.83 \pm 0.43
终末均重/g FBW	316.89 \pm 8.38 ^b	331.83 \pm 9.58 ^{ab}	335.14 \pm 16.14 ^{ab}	342.20 \pm 7.74 ^a	320.98 \pm 10.73 ^{ab}
存活率/% SR	92.59 \pm 12.83	98.13 \pm 3.23	100.00 \pm 0.00	100.00 \pm 0.00	100.00 \pm 0.00
增重率/% WGR	100.63 \pm 2.39 ^e	109.93 \pm 1.41 ^b	112.10 \pm 1.55 ^b	116.38 \pm 2.33 ^a	103.38 \pm 2.13 ^c
特定生长率(/%/d) SGR	1.42 \pm 0.05 ^c	1.51 \pm 0.04 ^{abc}	1.53 \pm 0.04 ^{ab}	1.57 \pm 0.05 ^a	1.45 \pm 0.05 ^{bc}
摄食率(/%/d) FI	1.21 \pm 0.03 ^b	1.20 \pm 0.01 ^b	1.22 \pm 0.04 ^b	1.17 \pm 0.09 ^b	1.36 \pm 0.03 ^a
饲料系数/% FCR	0.92 \pm 0.06 ^{ab}	0.86 \pm 0.08 ^{ab}	0.84 \pm 0.06 ^b	0.80 \pm 0.07 ^b	1.01 \pm 0.10 ^a
蛋白质效率/% PER	3.08 \pm 0.22 ^a	3.14 \pm 0.27 ^a	3.05 \pm 0.20 ^a	2.99 \pm 0.26 ^a	2.21 \pm 0.22 ^b
肝体比/% HSI	1.54 \pm 0.10	1.52 \pm 0.04	1.62 \pm 0.18	1.49 \pm 0.05	1.64 \pm 0.19
肠体比/% ISI	0.97 \pm 0.19 ^{ab}	0.91 \pm 0.03 ^b	1.12 \pm 0.16 ^a	1.25 \pm 0.13 ^a	0.77 \pm 0.09 ^b
脏体比/% VSI	12.56 \pm 2.11	11.84 \pm 1.27	11.70 \pm 1.21	11.32 \pm 0.38	11.10 \pm 1.61
肥满度/(g/cm ³) CF	0.43 \pm 0.02	0.42 \pm 0.02	0.43 \pm 0.02	0.44 \pm 0.02	0.43 \pm 0.01

注: 同列标注不同字母表示差异显著($P < 0.05$), 下同

Notes: the same column marked with different letters showed significant differences ($P < 0.05$), the same below

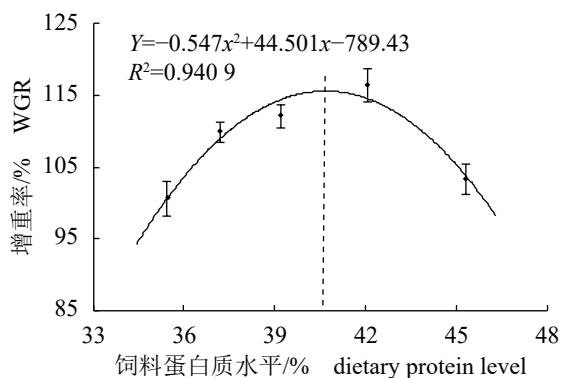


图1 饲料蛋白质水平与匙吻鲟增重率的二次回归分析

Fig. 1 Second-order regression analysis between weight gain rate and dietary protein levels for *P. spathula*

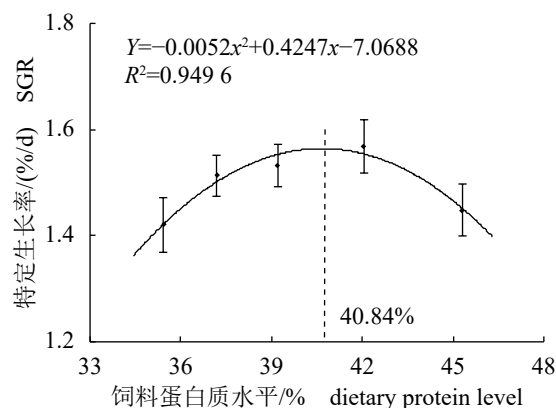


图2 饲料蛋白质水平与匙吻鲟特定生长率的二次回归分析

Fig. 2 Second-order regression analysis between specific growth rate and dietary protein levels for *P. spathula*

表3 饲料蛋白质水平对匙吻鲟体组成的影响(湿重基础)
Tab. 3 Effects of dietary protein level on body composition of *P. spathula* (wet weight) %

项目 items	饲料蛋白质水平/% dietary protein levels				
	35.44	37.20	39.19	42.05	45.30
全鱼组成 whole body composition					
粗蛋白质 crude protein	10.49 ± 0.44	11.65 ± 0.87	11.45 ± 0.93	10.79 ± 1.05	11.44 ± 0.77
粗脂肪 crude lipid	4.74 ± 0.75	4.90 ± 1.61	5.61 ± 0.53	5.39 ± 0.23	6.58 ± 0.42
粗灰分 crude ash	1.59 ± 0.26	1.80 ± 0.17	1.83 ± 0.40	1.81 ± 0.19	1.70 ± 0.06
水分 moisture	82.79 ± 1.93	81.65 ± 1.70	80.65 ± 0.97	81.80 ± 0.63	79.21 ± 0.36
肌肉组成 muscle composition					
粗蛋白质 crude protein	19.30 ± 2.23	20.16 ± 0.87	19.88 ± 1.07	19.42 ± 0.30	18.53 ± 1.89
粗脂肪 crude lipid	2.59 ± 1.47	2.63 ± 1.66	2.58 ± 1.10	2.75 ± 1.16	1.31 ± 0.31
粗灰分 crude ash	1.11 ± 0.02	1.13 ± 0.08	1.11 ± 0.05	1.06 ± 0.12	1.09 ± 0.06
水分 moisture	78.71 ± 0.82	78.70 ± 1.51	78.25 ± 1.06	78.77 ± 1.19	80.10 ± 0.78
肝脏组成 liver composition					
粗蛋白质 crude protein	10.52 ± 1.05	11.05 ± 1.80	10.55 ± 0.76	10.09 ± 0.83	9.94 ± 1.14
粗脂肪 crude lipid	9.73 ± 1.95	10.15 ± 2.90	9.21 ± 0.92	12.07 ± 3.48	12.89 ± 1.82
粗灰分 crude ash	1.11 ± 0.02	1.13 ± 0.08	1.11 ± 0.05	1.06 ± 0.12	1.09 ± 0.06
水分 moisture	70.09 ± 2.90	70.40 ± 2.73	70.04 ± 1.78	69.27 ± 1.37	68.28 ± 3.95

2.3 饲料蛋白质水平对匙吻鲟营养物质表观消化率及消化酶活性的影响

39.19%组蛋白质表观消化率显著高于其他组, 45.30%组脂肪表观消化率和干物质表观消化率显著高于39.19%和42.05%组($P < 0.05$)(表4)。42.05%组肠蛋白酶活性和肝脏脂肪酶活性显著高

于其他组($P < 0.05$), 肝脏淀粉酶活性略高于其他组($P > 0.05$); 肝脏蛋白酶活性没有明显变化趋势($P > 0.05$)(表5)。

2.4 饲料蛋白质水平对匙吻鲟血清生化指标的影响

投喂不同蛋白质水平的饲料显著影响了匙

表 4 饲料蛋白质水平对匙吻鲟营养物质表观消化率的影响

Tab. 4 Effects of dietary protein levels on nutrients apparent digestibility coefficient of *P. spathula*

项目 items	饲料蛋白质水平/% dietary protein levels				
	35.44	37.20	39.19	42.05	45.30
粗蛋白质 crude protein	54.67 ± 0.06 ^d	53.51 ± 0.08 ^d	72.05 ± 1.44 ^a	58.55 ± 0.11 ^c	67.81 ± 0.08 ^b
粗脂肪 crude lipid	89.93 ± 1.51 ^b	91.07 ± 0.48 ^{ab}	86.93 ± 1.67 ^c	90.20 ± 1.50 ^b	92.77 ± 0.45 ^a
干物质 dry matter	62.33 ± 5.66 ^{ab}	61.27 ± 2.09 ^{ab}	42.54 ± 7.37 ^c	59.95 ± 6.16 ^b	68.74 ± 1.94 ^a

表 5 饲料蛋白质水平对匙吻鲟消化酶活性的影响

Tab. 5 Effects of dietary protein level on digestive enzyme activities of *P. spathula*

项目 items	饲料蛋白质水平/% dietary protein levels				
	35.44	37.20	39.19	42.05	45.30
肠蛋白酶/(U/mg prot) enteric protease	0.69 ± 0.17 ^c	1.06 ± 0.26 ^b	0.79 ± 0.10 ^{bc}	1.49 ± 0.04 ^a	1.14 ± 0.05 ^b
肝脏蛋白酶/(U/mg prot) hepatic protease	0.66 ± 0.10	0.57 ± 0.10	0.58 ± 0.02	0.64 ± 0.18	0.59 ± 0.11
肝脏淀粉酶/(U/mg prot) α-amylase	1.50 ± 0.28	1.15 ± 0.09	1.58 ± 0.27	1.61 ± 0.38	1.19 ± 0.12
肝脏脂肪酶/(U/g prot) lipase	6.65 ± 1.77 ^{bc}	5.55 ± 1.65 ^c	10.35 ± 0.35 ^b	14.47 ± 3.14 ^a	5.22 ± 1.57 ^c

吻鲟部分血清生化指标。37.20%、39.19%组的GLOB含量显著高于其他组($P < 0.05$), 35.44%组ALB含量显著低于其他组($P < 0.05$); 39.19%、42.05%和45.30%组间TP含量没有显著差异($P > 0.05$), 但均高于35.44%组($P < 0.05$); 37.20%、39.19%组的HDL-C含量显著高于其他组($P < 0.05$), TC含量35.44%组略低于其他组($P < 0.05$), TG含量37.20%、39.19%、42.05%组显著低于其他组($P < 0.05$); AST活性各

组之间差异不显著($P > 0.05$), ALT活性则在39.19%和42.05%组最低($P < 0.05$); 各组间A/G、GLU和LDL-C含量无显著性差异($P > 0.05$)(表6)。

2.5 饲料蛋白质水平对匙吻鲟血清抗氧化性能的影响

39.19%、42.05%和45.30%组血清CAT活性显著高于其他组($P < 0.05$); MDA含量各组之间没有

表 6 饲料蛋白质水平对匙吻鲟血清生化指标的影响

Tab. 6 Effects of dietary protein level on serum biochemical indexes of *P. spathula*

项目 items	饲料蛋白质水平/% dietary protein levels				
	35.44	37.20	39.19	42.05	45.30
球蛋白/(g/L) GLOB	11.25 ± 1.34 ^b	18.90 ± 1.41 ^a	17.35 ± 2.48 ^a	13.30 ± 0.72 ^b	13.50 ± 1.70 ^b
白蛋白/(g/L) ALB	6.20 ± 0.14 ^b	9.83 ± 1.39 ^a	9.63 ± 1.18 ^a	8.03 ± 0.65 ^a	8.47 ± 0.40 ^a
白球比 A/G	0.57 ± 0.04	0.60 ± 0.08	0.58 ± 0.01	0.60 ± 0.04	0.58 ± 0.04
总蛋白/(g/L) TP	17.45 ± 1.48 ^c	29.50 ± 1.98 ^a	22.55 ± 2.76 ^b	21.33 ± 1.27 ^b	21.97 ± 1.48 ^b
葡萄糖/(mmol/L) GLU	2.98 ± 0.54	2.89 ± 0.39	1.67 ± 0.41	2.45 ± 0.41	1.96 ± 0.46
高密度脂蛋白胆固醇/(mmol/L) HDL-C	0.16 ± 0.00 ^c	0.68 ± 0.08 ^a	0.69 ± 0.01 ^a	0.47 ± 0.05 ^b	0.52 ± 0.04 ^b
低密度脂蛋白胆固醇/(mmol/L) LDL-C	1.13 ± 0.56	1.42 ± 0.35	1.70 ± 0.48	1.64 ± 0.20	1.68 ± 0.24
总胆固醇/(mmol/L) TC	2.44 ± 0.83 ^b	3.64 ± 0.85 ^{ab}	4.04 ± 1.11 ^a	3.87 ± 0.44 ^{ab}	4.42 ± 0.43 ^a
甘油三酯/(mmol/L) TG	8.68 ± 0.05 ^a	7.16 ± 0.60 ^b	6.31 ± 0.83 ^b	6.95 ± 0.51 ^b	8.63 ± 0.04 ^a
谷草转氨酶/(U/L) AST	143.95 ± 33.45	122.77 ± 13.27	108.40 ± 12.14	106.50 ± 19.37	135.65 ± 11.10
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	46.00 ± 3.39 ^a	44.45 ± 4.45 ^a	32.60 ± 2.26 ^b	35.15 ± 2.47 ^b	47.60 ± 2.83 ^a

显著性差异($P>0.05$);除37.20%组,其他组之间SOD活性差异不显著($P>0.05$)(表7)。

3 讨论

3.1 饲料蛋白质水平对匙吻鲟生长和体成分的影响

本研究表明,饲料不同蛋白质水平对匙吻鲟SR、HSI、VSI及CF无显著影响,而实验鱼生长与饲料蛋白质水平之间的关系符合二次曲线模型,即低饲料蛋白质水平时,鱼类生长随饲料蛋白质水平的上升而加快,当超过鱼类的最适需求量后则会降低^[26],这种数学分析方法已广泛应用于确定鱼类对某种营养物质最适需求量方面^[27]。用蛋白质含量29.57%~52.68%的饲料投喂中华鲟,在整个蛋白质水平梯度范围内,幼鲟增重率与饲料蛋白质含量成二次曲线关系。由抛物线回归法得出回归方程: $Y=-1.084x^2+86.722x-1178.2(R^2=0.9203, P<0.01)$,抛物线的顶点可认为是幼鲟饲料蛋白质适宜含量的低限(40.00%)^[5]。用蛋白质水平32.20%~61.85%的饲料饲喂红点石斑鱼(*Epinephelus akaara*),增重率随着饲料蛋白质水平的增加而增加,当蛋白质水平高于52.45%时增重率开始下降,即当饲料蛋白质水平为52.45%时增重率最大^[28]。本研究中饲料蛋白质水平与匙吻鲟增重率的关系符合典型的二次曲线模型,从生长结果分析,当饲料粗蛋白质含量达到40.67%时生长最快。研究表明,中华鲟^[5]、高首鲟^[8]、美洲鲟(*A. baeri*)^[29]和史氏鲟^[30]的饲料粗蛋白质适宜含量分别为40.0%~43.0%、40.5%±1.6%、40%±2%和40%,可见匙吻鲟虽属于滤食性鱼类,但和其他肉食性的鲟对蛋白的需求相近。

另外,在本实验中,随着饲料蛋白质水平的持续上升,蛋白质效率呈现下降趋势,表明

在饲料蛋白质含量低于最适需求水平时,匙吻鲟对饲料中蛋白质及其他营养物质利用率更高,当蛋白质含量过高,匙吻鲟仅能将摄取的蛋白质的有限部分加以积累,其他部分被代谢用作能量或转化为脂肪,从而导致了蛋白质效率的下降^[6,8]。

有研究表明,在一定范围内,鱼体蛋白质含量随饲料蛋白质含量的升高而升高,孙海涛等^[24]对匙吻鲟饲料蛋白质水平的研究也说明了这一点。但本研究中饲料蛋白质水平变化时,鱼体蛋白质变化不大,与中华鲟^[5]、西伯利亚鲟^[18]的蛋白质营养需求实验结果一致,这可能与鱼种类、养殖环境、饲料组成、饲养方法等有关^[31]。匙吻鲟全鱼和肝脏体脂含量随着饲料中蛋白质水平的增加呈现上升趋势,全鱼脂肪含量与水分含量呈负相关,这一现象已在星斑川鲮(*Platichthys stellatus*)^[27]中有过报道,具体原因有待进一步研究。

3.2 饲料蛋白质水平对匙吻鲟消化吸收及代谢的影响

测定饲料营养物质消化率,并结合饲料系数、体成分能更准确评价某些饲料的营养价值。Yan等^[32]表示尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)饲料蛋白质水平可以显著影响饲料及饲料成分的蛋白质和能量表观消化率^[32]。本研究中蛋白质表观消化率随饲料蛋白质水平的增加呈先上升后下降趋势,39.19%组显著高于45.30%组,而45.30%组的摄食率最高,可以看出饲料蛋白质水平过高时,匙吻鲟摄入的饲料量虽然相对于体质量较高,但不利于对蛋白质的消化和吸收,一定程度上限制了生长,这与Yan等^[32]的观点一致。本实验中饲料蛋白质水平45.30%组脂肪表观消化率和干物质表观消化率显著高于39.19%和42.05%组($P<0.05$),有研究表明笛鲷(*Lutjanus*

表7 饲料蛋白质水平对匙吻鲟血清抗氧化性能的影响

Tab. 7 Effects of dietary protein level on serum and liver antioxidant indexes of *P. spathula*

项目 items	饲料蛋白质水平/% dietary protein levels				
	35.44	37.20	39.19	42.05	45.30
超氧化物歧化酶/(U/mL) SOD	119.40 ± 28.83 ^b	182.01±13.80 ^a	142.04 ± 13.15 ^b	118.26 ± 33.39 ^b	133.32 ± 3.83 ^b
丙二醛/(nmol/mL) MDA	48.89 ± 3.64	47.82 ± 3.50	50.21 ± 2.92	48.56 ± 2.78	48.15 ± 2.19
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	8.57 ± 1.70 ^b	7.29 ± 2.87 ^b	13.07 ± 2.78 ^a	13.39 ± 1.78 ^a	13.03 ± 2.02 ^a

argentimaculatus)干物质和能量的表观消化率随着饲料中小麦粉添加量的减少而增加, 蛋白质水平最高时, 达到最大值^[33]。在本研究中干物质表观消化率出现类似的结果, 可能和随着蛋白质水平的上升, 饲料中的植物蛋白的添加量逐渐减少有关, 鱼粉量在不断增加, 更有利于消化^[34]。另一方面, 尽管该组表现出较高的脂肪和干物质表观消化率, 但蛋白质表观消化率并非最高, 导致该组终末体质量虽与生长最佳组没有显著差异, 但略有下降的趋势。

消化酶活性能够反映鱼类的消化机能, 决定鱼类对营养物质的消化和吸收能力, 从而影响鱼类的生长速率, 蛋白酶活性的高低与饲料蛋白质水平关系紧密^[35]。本研究中, 42.05%组肠蛋白酶活性和肝脏脂肪酶活性显著高于其他组, 这与血鸚鵡(*Amphilophus citrinellus* × *Cichlasoma synspilum*)^[26]、鳊(*Siniperca chuatsi*)^[36]等研究结果类似, 肠蛋白酶活性随饲料蛋白质水平的增加, 表现出先升后降的变化趋势。石英等^[26]认为, 在适宜范围内, 肠蛋白酶活性随着饲料蛋白质水平的增加而增加; 而过高的饲料蛋白质水平可能会对蛋白酶的分泌产生负反馈调节, 但与孙海涛等^[24]研究结果相反。研究认为, 消化酶活性受摄食行为和饲料化学组成的影响^[37], 饲料蛋白质水平对鱼类蛋白酶活性影响与否和鱼的种类、饲料原料、化学组成等有关^[38]。

血清TP在一定程度上代表了日粮中蛋白质的营养水平及动物对蛋白质的消化吸收程度。Zhang等^[39]认为血浆TP水平也会在肝脏出现异常时下降, 同时也反映了鱼体内的蛋白质代谢和生长状况。本研究中39.19%水平以上组与35.44%组相比, 血清TP含量虽有上升, 但趋于平稳, 这与血清ALT活性的结果一起说明了饲料蛋白质水平过高会引起匙吻鲟肝功能损伤, 从而对部分血清生化指标造成影响。从GLOB和ALB的检测结果显示, TP含量变化趋势主要是由于ALB含量的波动所致, 这与Wang等^[28]的研究结果一致。

血清中的脂类物质含量是反映鱼体脂肪代谢的指标。当饲料蛋白质水平过高时, 过量的脂类物质会转移到肝脏组织中, 也会通过血液转运到外部; 而饲料蛋白质水平不足时, 鱼类会继续摄食来维持自身的生长和活动, 导致更多的脂肪积累。本实验中血清TC和TG含量的结

果说明适宜的饲料蛋白质水平有利于鱼体脂肪代谢功能的稳定^[40]。HDL-C具有清洁、疏通动脉的功能, 本研究中匙吻鲟37.20%、39.19%组血液中HDL-C含量显著高于其他组($P < 0.05$), 这与Jiang等^[41]的结果一致。

3.3 饲料蛋白质水平对匙吻鲟健康状况的影响

鱼类血液生化指标被广泛用来评价鱼类的健康、营养和对环境的适应状况。ALT和AST主要分布于机体的肝脏。正常情况下, 血清ALT、AST的活性很低, 当组织细胞受损或通透性增大时, 大量的ALT、AST释放进入血液, 使血清ALT、AST活性升高, 因此血液中这2种酶可作为诊断肝肾病变的重要参考指标^[42]。Kim等^[43]发现低蛋白质水平组的血浆AST和ALT活性最高, 表明肝脏的正常功能受损。本实验中, 匙吻鲟血清中AST活性并未随着饲料蛋白质水平的变化而呈现显著性差异, ALT活性则在39.19%和42.05%组最低, 可能是由于饲料蛋白质水平过高或过低会对肝脏部分功能造成不利影响, 进而影响血液中ALT活性。

SOD是生物机体内重要的抗氧化酶之一, 是一种特异性消除超氧自由基的循环酶, 其活性越高, 说明清除自由基的能力越强^[44]。SOD和CAT等组成的抗氧化酶系统可清除自由基, 减少脂质过氧化损伤^[45]。MDA是脂质过氧化物的最终分解产物之一, 其含量能直接反映机体脂质过氧化程度, 并间接反映机体抗氧化能力和细胞损伤程度^[46]。周朝伟等^[47]检测到大鳞副泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus*)幼鱼的肝胰脏CAT活性随着饲料蛋白质水平升高, 呈先升高后降低的变化趋势, 在饲料蛋白质含量为35%时达最大值。本研究中当饲料蛋白质水平达到39.19%后, 血清CAT活性就不再升高, 同样说明饲料蛋白质水平的提高, 可以增加匙吻鲟血清抗氧化酶活性, 但当蛋白质水平达到一定程度后, 其对匙吻鲟抗氧化能力的影响便趋于稳定。

4 结论

综上所述, 在本实验条件下, 初始体质量为 (158.00 ± 0.29) g的匙吻鲟在饲料蛋白质水平为39.19%、42.05%时个体生长速率明显较快, 消化吸收能力高于其他组, 健康状况较好, 而体成分变化不大。结合增重率和特定生长率与饲料

蛋白质水平之间二次回归分析的结果, 推荐匙吻鲟饲料中蛋白质水平为40%~41%。

参考文献:

- [1] 李爱杰. 水产动物营养与饲料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 12.
Li A J. Nutrition and feed of aquatic animals[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996: 12(in Chinese).
- [2] McGoogan B B, Gatlin III D M. Dietary manipulations affecting growth and nitrogenous waste production of red drum, *Sciaenops ocellatus* I. Effects of dietary protein and energy levels[J]. *Aquaculture*, 1999, 178(3-4): 333-348.
- [3] 王孟乐、陈乃松、李松林, 等. 大口黑鲈饲料中2种植物性蛋白质混合物替代鱼粉的研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(1): 37-47.
Wang M L, Chen N S, Li S L, *et al.* Study on replacement of fish meal by two plant protein mixtures in diets for largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(1): 37-47(in Chinese).
- [4] 李同庆, 郝玉江, 安瑞永, 等. 饲料蛋白水平对史氏鲟幼体消化率的影响[J]. *淡水渔业*, 2002, 32(5): 51-54.
Li Y Q, Hao Y J, An R Y, *et al.* Effect of feed protein content on digestibility of juvenile *Acipenser schrencki* for various nutritive components[J]. *Freshwater Fisheries*, 2002, 32(5): 51-54(in Chinese).
- [5] 陈喜斌, 庄平, 曾翠平, 等. 中华鲟幼鲟蛋白质营养最适需要量[J]. *中国水产科学*, 2002, 9(1): 60-64.
Chen X B, Zhuang P, Zeng C P, *et al.* Optimum protein level of diets for juvenile *Acipenser sinensis*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2002, 9(1): 60-64(in Chinese).
- [6] 邢西谋. 饲料蛋白质水平对俄罗斯鲟幼鲟生长的影响[J]. *淡水渔业*, 2003, 33(4): 14-16.
Xing X M. Effects of feeds with different protein levels on growth of juvenile *Acipenser guldenstadti*[J]. *Freshwater Fisheries*, 2003, 33(4): 14-16(in Chinese).
- [7] Moore B J, Hung S S O, Medrano J F. Protein requirement of hatchery-produced juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*)[J]. *Aquaculture*, 1988, 71(3): 235-245.
- [8] Kaushik S J, Breque J, Blanc D. Requirement for protein and essential amino acids and their utilization by Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*)[C]//Williot P. Proceeding of the First International Symposium on the Sturgeon. France: CEMAGREF, 1991.
- [9] 张海涛, 王安利. 鲟鱼的营养需求与仔鱼投饵技术[J]. *科学养鱼*, 2003(2): 53-54.
Zhang H T, Wang A L. Nutrition requirement and feeding technique of larval fish of Sturgeon[J]. *Scientific Fish Farming*, 2003(2): 53-54(in Chinese).
- [10] Barton B A, Rahn A B, Feist G, *et al.* Physiological stress responses of the freshwater chondrosteian paddlefish (*Polyodon spathula*) to acute physical disturbances[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 1998, 120(2): 355-363.
- [11] Bemis W E, Findeis E K, Grande L. An overview of Acipenseriformes[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1997, 48(1-4): 25-71.
- [12] 沈硕, 周继成, 赵思明, 等. 匙吻鲟的营养成分及肌肉营养评价[J]. *营养学报*, 2009, 31(3): 295-297.
Shen S, Zhou J C, Zhao S M, *et al.* The nutritional composition and evaluation of muscle of *Polyodon spathula*[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2009, 31(3): 295-297(in Chinese).
- [13] 王凡. 匙吻鲟的生物学特性及养殖技术[J]. *湖北农业科学*, 2007, 46(6): 985-986.
Wang F. Biological character and cultivation techniques of the paddlefish[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2007, 46(6): 985-986(in Chinese).
- [14] 殷守仁, 赵文, 刘保占. 匙吻鲟的生物学特性、成鱼养殖技术及消化系统的解剖[J]. *北京农业*, 2009(33): 52-56.
Yin S R, Zhao W, Liu B Z. Biological characteristics, adult fish aquaculture and anatomy of the digestive system of paddlefish[J]. *Beijing Agriculture*, 2009(33): 52-56(in Chinese).
- [15] 聂文强, 李婧, 吉红, 等. 匙吻鲟稚鱼摄食节律与饥饿对其体脂肪酸组成的影响[J]. *水产科学*, 2017, 36(1): 36-41.
Nie W Q, Li J, Ji H, *et al.* Daily feeding rhythm and effects of starvation on fatty acid composition in juvenile paddlefish (*Polyodon spathula*)[J]. *Fisheries Science*, 2017, 36(1): 36-41(in Chinese).
- [16] 范毛毛, 马立鸣, 赵睿, 等. 工厂化条件下匙吻鲟苗种的规模化培育技术[J]. *中国水产*, 2016(9): 112-114.
Fan M M, Ma Li M, Zhao R, *et al.* Large-scale

- cultivation technology of *Polyodon spathula* seedlings under industrial conditions[J]. *China Fisheries*, 2016(9): 112-114(in Chinese).
- [17] 江振强. 匙吻鲟水库网箱生态养殖技术[J]. 渔业致富指南, 2014(4): 64-65.
Jiang Z Q. Ecological cage culture technology of *Polyodon spathula* reservoir[J]. *Ocean and Fishery*, 2014(4): 64-65(in Chinese).
- [18] 吉红, 单世涛, 曹福余, 等. 安康地区利用家鱼产卵池培育匙吻鲟苗种技术研究[J]. *中国水产*, 2009(3): 43-44.
Ji H, Shan S T, Cao F Y, *et al.* Study of seed rearing techniques of *Polyodon spathula* using domestic chinese carps' spawning pond in Ankang area[J]. *China Fisheries*, 2009(3): 43-44(in Chinese).
- [19] Fang C, Ma M Y, Ji H, *et al.* Alterations of digestive enzyme activities, intestinal morphology and microbiota in juvenile paddlefish, *Polyodon spathula*, fed dietary probiotics[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2015, 41(1): 91-105.
- [20] Ji H, Sun H T, Xiong D M. Studies on activity, distribution, and zymogram of protease, α -amylase, and lipase in the paddlefish *Polyodon spathula*[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2012, 38(3): 603-613.
- [21] 王丽宏, 吉红, 胡家, 等. 匙吻鲟、杂交鲟和鳙肌肉品质的比较研究[J]. *食品科学*, 2014, 35(1): 62-68.
Wang L H, Ji H, Hu J, *et al.* Comparative study on muscle quality of cultured *Polyodon spathula*, hybrid sturgeon and *Aristichthys nobilis*[J]. *Food Science*, 2014, 35(1): 62-68(in Chinese).
- [22] 吉红, 孙海涛, 单世涛. 池塘与网箱养殖匙吻鲟肌肉营养成分及品质评价[J]. *水产学报*, 2011, 35(2): 261-267.
Ji H, Sun H T, Shan S T. Evaluation of nutrient components and nutritive quality of muscle between pond-and cage-reared paddlefish(*Polyodon spathula*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(2): 261-267(in Chinese).
- [23] 方程, 马明洋, 吉红, 等. 微生态制剂对匙吻鲟生长性能、体组成及血清生化指标的影响[J]. *水生态学杂志*, 2014, 35(6): 99-105.
Fang C, Ma M Y, Ji H, *et al.* Effect of probiotics on growth rate, body composition and the serum chemistry of paddlefish *Polyodon spathula*[J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, 35(6): 99-105(in Chinese).
- [24] 孙海涛, 吉红. 饲料蛋白水平对匙吻鲟幼鱼肌肉营养成分及消化酶活力的影响[J]. *水产科学*, 2011, 30(12): 721-725.
Sun H T, Ji H. Effects of dietary protein levels on muscle composition and digestive enzyme activities in juvenile paddlefish *Polyodon spathula*[J]. *Fisheries Science*, 2011, 30(12): 721-725(in Chinese).
- [25] 高民, 冯宗慈. 一种改进的铬的测定方法[J]. *内蒙古畜牧科学*, 1993(3): 42-43.
Gao M, Feng Z C. An improved method for determination of chromium[J]. *Inner Mongolian Journal of Animal Sciences and Husbandry*, 1993(3): 42-43(in Chinese).
- [26] 石英, 冷向军, 李小勤, 等. 饲料蛋白水平对血鸚鵡幼鱼生长、体组成和肠道蛋白消化酶活性的影响[J]. *水生生物学报*, 2009, 33(5): 874-880.
Shi Y, Leng X J, Li X Q, *et al.* Effect of dietary protein levels on growth performance, whole body composition and intestinal digestive enzyme activities of *Cichlasoma* sp. juvenile[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(5): 874-880(in Chinese).
- [27] 丁立云, 张利民, 王际英, 等. 饲料蛋白水平对星斑川鲈幼鱼生长、体组成及血浆生化指标的影响[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(6): 1285-1292.
Ding L Y, Zhang L M, Wang J Y, *et al.* Effects of dietary protein level on growth performance, body composition and plasma biochemistry indices of juvenile starry flounder, *Platichthys stellatus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(6): 1285-1292(in Chinese).
- [28] Wang J T, Jiang Y D, Li X Y, *et al.* Dietary protein requirement of juvenile red spotted grouper (*Epinephelus akaara*)[J]. *Aquaculture*, 2016(450): 289-294.
- [29] Médale F, Blanc D, Kaushik S J. Studies on the nutrition of Siberian sturgeon, *Acipenser baeri*. II. Utilization of dietary non-protein energy by sturgeon[J]. *Aquaculture*, 1991, 93(2): 143-154.
- [30] 马国军. 鲟鱼驯养和营养研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2003.
Ma G J. Domestication and nutrition of sturgeon[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2003(in Chinese).
- [31] Zeitler M H, Kirchgessner M, Schwarz F J. Effects of different protein and energy supplies on carcass

- composition of carp (*Cyprinus carpio* L.)[J]. *Aquaculture*, 1984, 36(1-2): 37-48.
- [32] Yan W, Rui L J, Wen X J, *et al.* The effect of dietary protein level on the apparent digestibility coefficient of two selected feed ingredients for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L.[J]. *Aquaculture Research*, 2011, 42(8): 1170-1177.
- [33] Abbas G, Siddiqui P J A. The effects of varying dietary protein level on growth, feed conversion, body composition and apparent digestibility coefficient of juvenile mangrove red snapper, *Lutjanus argentimaculatus* (Forsskal 1775)[J]. *Aquaculture Research*, 2013, 44(5): 807-818.
- [34] Silva P, Andrade C A P, Timóteo V M F A, *et al.* Dietary protein, growth, nutrient utilization and body composition of juvenile blackspot seabream, *Pagellus bogaraveo* (Brunnich)[J]. *Aquaculture Research*, 2006, 37(10): 1007-1014.
- [35] 刘兴旺. 大菱鲆及半滑舌鳎蛋白质营养生理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- Liu X W. The study on protein nutrition of turbot *Scophthalmus maximus* Linnaeus and half-smooth tongue-sole, *Cynoglossus semilaevis* gunther[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010(in Chinese).
- [36] 赵东海. 饲料蛋白水平对鳊鱼实验种群胃肠道消化酶活性的影响[J]. *河北渔业*, 2004(2): 10-11.
- Zhao D H. Effects of dietary protein level on gastrointestinal tract digestive enzyme activities in experimental population of sine fish[J]. *Hebei Fisheries*, 2004(2): 10-11(in Chinese).
- [37] Kuz'mina V V. Influence of age on digestive enzyme activity in some freshwater teleosts[J]. *Aquaculture*, 1996, 148(1): 25-37.
- [38] Lazzari R, Radünz Neto J, de Araújo Pedron F, *et al.* Protein sources and digestive enzyme activities in jundiá (*Rhamdia quelen*)[J]. *Scientia Agricola*, 2010, 67(3): 259-266.
- [39] Zhang J Z, Zhou F, Wang L L, *et al.* Dietary protein requirement of juvenile black sea bream, *Sparus macrocephalus*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2010, 41(S2): 151-164.
- [40] 陈涛, 王爱民, 胡毅, 等. 饲料蛋白水平对梭鱼形体指标及血液生化指标的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(12): 125-129.
- Chen T, Wang A M, Hu Y, *et al.* Effects of feed protein levels on body indices and blood biochemical indices of *Liza haematocheila*[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(12): 125-129(in Chinese).
- [41] Jiang S T, Wu X Y, Li W F, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth, feed utilization, body and plasma biochemical compositions of hybrid grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂×*Epinephelus fuscoguttatus* ♀) juveniles[J]. *Aquaculture*, 2015(446): 148-155.
- [42] Racicot J G, Gaudet M, Leray C. Blood and liver enzymes in rainbow trout (*Salmo gairdneri* Rich.) with emphasis on their diagnostic use: study of CCl₄ toxicity and a case of *Aeromonas* infection[J]. *Journal of Fish Biology*, 2006, 7(6): 825-835.
- [43] Kim S S, Lee K J. Dietary protein requirement of juvenile tiger puffer (*Takifugu rubripes*)[J]. *Aquaculture*, 2009, 287(1-2): 219-222.
- [44] Muñoz M, Cedeño R, Rodríguez J, *et al.* Measurement of reactive oxygen intermediate production in haemocytes of the penaeid shrimp, *Penaeus vannamei*[J]. *Aquaculture*, 2000, 191(1-3): 89-107.
- [45] 周显青, 李胜利, 王晓辉, 等. 维生素C多聚磷酸酯对小鼠肝脏脂质过氧化物和抗氧化酶的影响[J]. *动物学报*, 2004, 50(3): 370-374.
- Zhou X Q, Li S L, Wang X H, *et al.* Effects of vitamin C polyphosphate on liver lipid peroxides and antioxidant activity in mice[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2004, 50(3): 370-374(in Chinese).
- [46] Papadimitriou E, Loumbourdis N S. Exposure of the frog *Rana ridibunda* to copper: impact on two biomarkers, lipid peroxidation, and glutathione[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, 69(6): 885-891.
- [47] 周朝伟, 朱龙, 曾本和, 等. 饲料蛋白水平对台湾泥鳅幼鱼生长、饲料利用率及免疫酶活性的影响[J]. *渔业科学进展*, 2018, 39(3): 72-79.
- Zhou C W, Zhu L, Zeng B H, *et al.* Effects of dietary protein level on growth performance, feed efficiency, and immuno-enzymatic activity of *Paramisgurnus dabryanus* ssp.[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(3): 72-79(in Chinese).

Effects of dietary protein levels on growth, body composition and health status of paddlefish (*Polyodon spathula*)

LIU Yangyang, YU Haibo, JI Hong*, WU Wenyi, ZHOU Jishu, ZHANG Binxin

(College of Animal Science and Technology, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: An 8-week growth trial was conducted to determine the effects of dietary protein levels on growth, body composition and health status of paddlefish (*Polyodon spathula*). Five experimental diets were formulated to contain 35.44%, 37.20%, 39.19%, 42.05% and 45.30% dietary crude protein (CP) with 5% lipid levels, respectively. At the end of the experiment, fish fed 35.44% to 42.05% CP diet resulted in significantly higher weight gain rate and specific growth rate, and both decreased at 45.30% CP level. The protein efficiency rate did not change significantly when the dietary CP increased from 35.44% to 42.05%; however, it significantly decreased when protein level reached 45.30%. The body composition of the experimental fish did not change significantly with the increase of dietary protein levels. The protein apparent digestibility coefficients (ADC) of 39.19% CP level is significant higher compared with other groups, which was contrary to lipid ADC and dry matter ADC. Liver lipase activity of *P. Spathula* peaked with the fish fed 42.05% CP level. The highest superoxide dismutase activity of the *P. spathula* was observed in the 37.20% treatment, and the activity of catalase significantly increased when CP level reached 39.19% compared to the 35.44% treatment. Based on second-order polynomial regression analysis of weight gain rate and specific growth rate, the recommended dietary protein level for *P. spathula* diet is 40%-41%.

Key words: *Polyodon spathula*; protein level; growth; body composition; digestion; health status

Corresponding author: JI Hong. E-mail: jihong@nwsuaf.edu.cn

Funding projects: Shaanxi Science and Technology Co-ordination and Innovation Project (2015KTTSNY01-05); Shaanxi Innovative Talents Promotion Plan-Science and Technology Innovation Team (2018TD-021)