

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19234

烟酸对杂交鲟幼鱼生长性能、肌肉品质和抗氧化功能的影响

吴金平, 杜浩, 陈细华, 褚志鹏, 阮瑞, 金佳利, 乔新美, 刘伟

中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223

摘要: 为评价饲料中添加不同水平的烟酸对杂交鲟(*Acipenser schrenckii*♂×*A. baeri*♀)幼鱼生长性能、肌肉成分、肌肉质地和抗氧化性能的影响, 在基础饲料中分别添加 0 mg/kg、30 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 的烟酸配制成 4 种实验饲料, 投喂初始体重(54.41±0.79) g 的杂交鲟幼鱼 84 d, 实验分为 4 组, 每组 3 个重复, 每个重复 15 尾鱼。结果表明: 饲料添加不同水平的烟酸对杂交鲟幼鱼增重率有显著影响($P<0.05$), 0 mg/kg 组增重率显著低于 30 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组($P<0.05$), 各添加组之间无显著差异($P>0.05$)。各组成活率、饲料系数和肝体比不受饲料烟酸的影响($P>0.05$)。120 mg/kg 烟酸组的肥满度显著低于 0 mg/kg、30 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组, 0 mg/kg、30 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组之间肥满度无显著差异($P>0.05$)。120 mg/kg 烟酸组的脏体比显著低于 0 mg/kg 和 1200 mg/kg 烟酸组($P<0.05$), 与 30 mg/kg 烟酸之间无显著差异($P>0.05$)。肌肉硬度和弹性随烟酸添加水平呈现先增加后降低的趋势, 1200 mg/kg 烟酸组的肌肉硬度和弹性显著低于其余各烟酸添加组($P<0.05$)。30 mg/kg 烟酸组的肌肉咀嚼性、回复性和黏性均在各组之间最大, 且显著高于 0 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组($P<0.05$)。30 mg/kg 烟酸组的肌肉凝聚性显著高于 0 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组($P<0.05$), 0 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组之间无显著差异($P>0.05$)。肌肉水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量不受饲料烟酸影响($P>0.05$)。30 mg/kg 烟酸组肌肉 T-SOD 活力显著高于 0 mg/kg 和 120 mg/kg 烟酸组($P<0.05$), 与 1200 mg/kg 烟酸组无显著差异($P>0.05$)。30 mg/kg 烟酸组肌肉 T-AOC 活力显著高于 0 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组($P<0.05$), 0 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组之间无显著差异($P>0.05$)。综上所述, 饲料中添加烟酸对杂交鲟幼鱼的生长、肉质和抗氧化性能均有一定的改善作用, 鲟鱼饲料中烟酸的添加量为 30 mg/kg。

关键词: 杂交鲟; 烟酸; 生长性能; 肌肉品质; 抗氧化性能

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)04-0406-08

烟酸(niacin)又称尼克酸, 是一种水溶性 B 族维生素, 是烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NAD)和烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADP)的辅酶, 在动物体内参与蛋白质、糖类和脂类的代谢, 是机体三大营养物质代谢的基本保障^[1-2]。烟酸具有促进鱼类生长、提高饲料转化率等作用^[3], 鱼类缺乏烟酸时会出现生长不良、饲料转化率低、厌食、表皮及鳍损伤、眼球突出和贫血等一系列症状^[4]。饲料中添加烟酸对养殖鱼类生长或生理指标的影响已有较多研究报道^[5-10], 但在鲟(*Acipenser*)中还

未见报道。

以饲料维生素调控养殖动物的肉质已有一些报道, 维生素 C 对吉富罗非鱼^[11](*Oreochromis niloticus*)、草鱼^[12-13](*Ctenopharyngodon idella*)、团头鲂^[14](*Megalobrama amblycephala*)鱼肉品质的影响。而以饲料烟酸调控肉质在鱼类中还没有报道, 在陆地动物(猪)上证明是可行的^[15-16]。

在鲟鱼养殖中, 杂交鲟因其具有生长快、抗病力强等优良性状而深受养殖户的喜爱^[17-18], 其中西伯利亚鲟(*Acipenser baeri*)与施氏鲟(*A.*

收稿日期: 2019-08-27; 修订日期: 2019-09-18.

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金(CARS-46); 国家自然科学基金面上项目(31772854); 国家自然科学基金青年科学基金项目(31602178).

作者简介: 吴金平(1989-), 男, 硕士, 助理研究员, 从事水产动物营养与饲料研究. E-mail: wujinping@yfi.ac.cn

通信作者: 陈细华, 研究员. E-mail: chenxh@yfi.ac.cn

schrenckii)的杂交后代(俗称“西杂”),已成为目前中国鲟鱼商品鱼市场的主要养殖对象。饲料中添加不同水平的烟酸对杂交鲟幼鱼肌肉品质及抗氧化功能的影响尚未见报道,本研究以杂交鲟(施氏鲟 *Acipenser schrenckii*♂×西伯利亚鲟 *A. baeri*♀)为对象,拟探讨饲料中添加不同水平的烟酸对杂交鲟幼鱼生长性能、肌肉品质及抗氧化功能的影响,旨在利用营养调控的方式改善杂交鲟幼鱼的肉品质及提高其抗氧化能力。

1 材料和方法

1.1 实验饲料

以食品级酪蛋白、明胶、鱼粉、豆粕、鱼油和豆油、食品级糊精等分别为主要的蛋白源、脂肪源和糖源配制实验饲料,其配方及营养组成见

表 1。以烟酰胺为烟酸源(上海源叶生物有限公司),烟酸添加浓度为 0 mg/kg、30 mg/kg、120 mg/kg 和 1200 mg/kg 饲料,经检测各组烟酸分别为 0 mg/kg、24 mg/kg、111 mg/kg 和 1108 mg/kg 饲料(酪蛋白、明胶、糊精和纤维素不含烟酸,鱼粉和豆粕含有部分烟酸,由于添加量有限和加工过程损耗,基础饲料烟酸含量很低以至达不到液相色谱的检测限)。饲料制作前,所有饲料原料粉碎后过 60 目分级筛,然后按照配方的比例称取相应的各种饲料原料,混匀,少量或微量的组分采用分步预混法混匀,其中,烟酸预混料以微晶纤维素作为载体配成一定的浓度,最后添加鱼油、豆油,再次混匀后添加约 20%的自来水搅拌,用绞肉机将混匀的饲料原料制成直径 2 mm 的圆柱形颗粒,房间避光经风扇吹干,然后置于-20 ℃冰柜中保存。

表 1 基础饲料组成及营养水平
Tab. 1 Composition and nutrient levels of basal diet %; dry weight

原料成分 ingredient	含量 content	营养成分 ²⁾ proximate composition ²⁾	含量 content
酪蛋白 casein	24.00	水分 moisture	6.58
明胶 gelatin	6.00	粗蛋白质 crude protein	38.95
鱼粉 fish meal	10.00	粗脂肪 ether extract	9.05
豆粕 soybean meal	15.00	灰分 ash	7.43
鱼油 fish oil	5.50		
豆油 soybean oil	5.50		
糊精 dextrin	23.00		
胆碱 choline chloride	0.20		
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.00		
预混料 ¹⁾ premix ¹⁾	3.00		
纤维素 cellulose	6.80		
合计 total	100.00		

注: 1) 维生素预混料为每千克饲料提供硫酸素 50 mg, 核黄素 200 mg, 维生素 B6 50 mg, 维生素 B₁₂ 20 mg, 叶酸 15 mg, 维生素 C 325 mg (30%), 泛酸 400 mg, 肌醇 1500 mg, 生物素(2%) 5 mg, 维生素 A 2.5 mg, 维生素 E(50%) 100 mg, 维生素 D₃ 2 mg, 维生素 K₃ 20 mg. 多矿为每千克饲料提供 Ca(H₂PO₄)₂ 1800 mg, KH₂PO₄ 1350 mg, NaCl 500 mg, MgSO₄·7H₂O 750 mg, NaH₂PO₄·2H₂O 650 mg, KI 1.5 mg, COSO₄·6H₂O 2.5 mg, CuSO₄·5H₂O 15 mg, ZnSO₄·7H₂O 350 mg, FeSO₄·7H₂O 1250 mg, MnSO₄·4H₂O 80 mg, Na₂SeO₃ 6.00 mg.
2) 水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分均为实测值。
Note: 1) The vitamin premix provided the following per kg of diets: thiamine 50 mg, lactochrome 200 mg, pyridoxine 50 mg, vitamin B₁₂ 20 mg, folic acid 15 mg, ascorbic acid 325 mg (30%), pantothenate 400 mg, inositol 1500 mg, D-biotin (2%) 5 mg, V_A 2.5 mg, V_E (50%) 100 mg, V_{D3} 2 mg, V_{K3} 20 mg. The mineral premix provided the following per kg of diets: Ca(H₂PO₄)₂ 1800 mg, KH₂PO₄ 1350 mg, NaCl 500 mg, MgSO₄·7H₂O 750 mg, NaH₂PO₄·2H₂O 650 mg, KI 1.5 mg, COSO₄·6H₂O 2.5 mg, CuSO₄·5H₂O 15 mg, ZnSO₄·7H₂O 350 mg, FeSO₄·7H₂O 1250 mg, MnSO₄·4H₂O 80 mg, Na₂SeO₃ 6.00 mg.
2) The contents of moisture, crude protein, crude lipids and ash are observed values.

1.2 实验鱼与饲养管理

杂交鲟幼鱼来源于湖北省咸宁市通山县,购

回后用聚维酮碘进行消毒,在圆形玻璃钢养殖桶中用不含烟酸的基础饲料饲喂养 2 周,以使其适

应实验条件及实验饲料。正式养殖实验开始前,将体质健壮,大小一致的初始体重为 (54.41 ± 0.79) g 实验鱼 180 尾,随机分配到 12 个圆形玻璃钢养殖桶(直径 105 cm, 体积 0.43 m^3), 每桶 15 尾, 饲养 12 周。每天采用表观饱食法投喂 3 次(08:00—09:00; 14:30—15:00, 19:00—19:30), 投喂量为鱼体重的 3%~5%, 每日每餐的投喂量根据鱼的摄食情况和水温变化及时调整, 以实验鱼饱食且无残饵为宜。养殖用水为曝气和过滤后的地下水, 养殖期间水温 $18.4 \sim 21.2$ °C, pH $7.5 \sim 8.0$, 溶氧质量浓度大于 5 mg/L , 氨氮质量浓度小于 0.05 mg/L , 每两周称重鱼体一次, 且每天记录养殖水温和实验鱼死亡数量和排污一次。

1.3 样品采集及测定

养殖实验持续 12 周, 待实验结束时, 对实验鱼禁食 24 h, 然后对每个实验组的鱼进行称重和统计成活数, 计算饲料系数、成活率和增重率。采样时, 每个养殖桶随机取 2 尾鱼, 于一定质量浓度的 MS-222 麻醉后, 测量体重和体长, 计算肥满度; 最后解剖实验鱼, 取内脏并称重, 计算脏体比; 分离出肝脏且称重, 计算肝体比; 取背部肌肉分别置于 -20 °C 和 -80 °C 冰箱中, 用于肌肉常规营养成分和抗氧化酶活力的检测。另外, 每个养殖桶随机取 2 尾实验鱼, 取背部两侧肌肉, 切成 $2.0 \text{ cm} \times 2.0 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ 的规格, 用于肌肉肉质指标的检测。

1.3.1 常规营养成分测定 103 °C 恒温干燥失重法测定饲料水分含量; 冷冻干燥法测定肌肉水分含量。凯氏定氮法测定实验饲料、鱼体背部肌肉的粗蛋白质含量; 索氏抽提法测定实验饲料、鱼体背部肌肉的粗脂肪含量; 马福炉灰化法测定实验饲料、鱼体背部肌肉的灰分含量。

1.3.2 肌肉酶活性及肉质指标测定 鱼体背部肌肉的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性和总抗氧化能力(total antioxidant capacity)的测定均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒完成。

实验鱼背部肌肉的肉质采用 TVT-300XP 型质构仪(波通瑞华科学仪器北京有限公司)进行质地剖面分析法(texture profile analysis, TPA)测定, 其探头为圆柱形的 P-cy75A 探头, 采用 2 次检测

法, 测定间隔时间(pause)为 5 s ; 触发力(trigger force)为 5 g ; 压缩比(compression)为 60%; 数据获得速率(data acquisition rate)为 200.00 pps ; 测试速度(test speed)为 2 mm/s , 其中, 测试前速度(pre-test speed)为 2 mm/s , 测试后速度(post-test speed)为 2 mm/s ; 每个样品平行测定 4 次, 检测肌肉的凝聚性(cohesiveness)、黏性(gumminess)、弹性(springiness)、回复性(resilience)、咀嚼性(chewiness)和硬度(hardness)等肉质指标。

1.3.3 计算公式及数据处理 根据以下公式, 计算实验鱼的增重率(weight gain rate, WGR)、饲料系数(feed conversion ratio, FCR)、成活率(survival rate, SR)、肝体比(hepatosomatic index, HSI)、脏体比(viscerosomatic index, VSI)和肥满度(condition factor, CF)。

$$\text{增重率}(\%) = [(W_1 - W_0) / W_0] \times 100;$$

$$\text{饲料转化率} = W_g / W_f;$$

$$\text{成活率}(\%) = (L_1 / L_0) \times 100;$$

$$\text{脏体比}(\%) = (H_v / W_2) \times 100;$$

$$\text{肝体比}(\%) = (G_H / W_2) \times 100;$$

$$\text{肥满度}(\text{g/cm}^3) = (W_2 / L^3) \times 100。$$

式中: W_1 为实验鱼终末体重(g), W_0 为实验鱼初始体重(g); W_g 为增加的鱼体总质量(g), W_f 为投喂饲料的总质量(g); L_1 为实验鱼终末尾数, L_0 为实验鱼初始尾数; H_v 为内脏质量(g), W_2 为鱼体重(g); G_H 为肝质量(g); L 为体长(cm)。

所有实验数据采用 IBM22.0 统计软件中的单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan's 均值多重比较法进行差异显著性分析, 结果均以平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm \text{SD}$)表示, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼生长性能的影响

饲料中添加不同水平的烟酸养殖杂交鲟幼鱼 12 周后, 对其生长性能和饲料利用的影响见表 2。饲料添加不同水平的烟酸对杂交鲟幼鱼增重率有显著影响($P < 0.05$), 0 mg/kg 烟酸组的增重率显著低于 30 mg/kg 、 120 mg/kg 、 1200 mg/kg 烟酸组($P < 0.05$), 各添加组之间无显著差异($P > 0.05$)。各组成活率、饲料系数和肝体比不受饲料添加烟酸

的影响($P>0.05$)。120 mg/kg 烟酸组的肥满度显著低于 0 mg/kg、30 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组, 0 mg/kg、30 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组之间的肥满度无显著差异($P>0.05$)。120 mg/kg 烟酸组的脏体比显著低于 0 mg/kg 和 1200 mg/kg 烟酸组($P<0.05$), 与 30 mg/kg 烟酸之间无显著差异($P>0.05$)。

表 2 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼生长性能的影响

Tab. 2 Effects of dietary niacin levels on growth performance of juvenile hybrid sturgeon n=3; $\bar{x} \pm SD$				
项目 item	饲料烟酸水平/(mg/kg) dietary niacin level			
	0	30	120	1200
初始重/g initial body weight	54.82±1.06	54.36±1.01	54.47±0.85	54.01±0.16
终末重/g final body weight	339.15±10.48 ^a	377.79±18.98 ^b	364.34±10.41 ^b	367.32±5.32 ^b
增重率/% WGR	518.77±21.45 ^a	594.77±23.08 ^b	569.03±21.42 ^b	580.10±9.38 ^b
成活率/% SR	100.00±0.00	93.33±6.67	100.00±0.00	100.00±0.00
饲料系数 FCR	1.04±0.04	1.02±0.05	0.99±0.05	1.02±0.09
肥满度/(g/cm ³) CF	0.78±0.07 ^b	0.79±0.05 ^b	0.67±0.06 ^a	0.76±0.04 ^b
脏体比/% VSI	7.73±0.49 ^{bc}	7.19±0.61 ^{ab}	6.78±0.84 ^a	8.17±0.72 ^c
肝体比/% HIS	3.27±0.55	3.02±0.66	2.94±0.37	3.39±0.48

注: 同一行数据肩标不同英文字母的表示两组间有显著性差异($P<0.05$).
Note: Values in the same row with different superscripts mean significant difference ($P<0.05$).

2.2 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼肌肉品质的影响

饲料中添加不同水平的烟酸养殖杂交鲟幼鱼 12 周后, 对其肌肉质构的影响见表 3。饲料添加不同水平的烟酸对杂鲟幼鱼肌肉的凝聚性、黏性、弹性、回复性、咀嚼性和硬度等指标均有显著影响($P<0.05$)。实验鱼肌肉硬度和弹性随饲料烟酸添加水平呈现先增加后降低的趋势, 1200 mg/kg 烟酸组肌肉硬度和弹性显著低于其余各烟酸添加组($P<0.05$)。30 mg/kg 烟酸组的肌肉咀嚼性、回复性和黏性均在各组之间最大, 且显著高于 0 mg/kg、120 mg/kg、

1200 mg/kg 烟酸组($P<0.05$)。30 mg/kg 烟酸组的肌肉凝聚性显著高于 0 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组($P<0.05$), 0 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组之间的肌肉凝聚性无显著差异($P>0.05$)。

2.3 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼肌肉营养成分的影响

饲料中添加不同水平的烟酸养殖杂交鲟幼鱼 12 周后, 对其肌肉营养成分的影响见表 4。饲料添加不同水平的烟酸对杂鲟幼鱼肌肉的水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分等均无显著影响($P>0.05$)。

表 3 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼肌肉品质的影响

Tab. 3 Effects of dietary niacin levels on the muscle quality of juvenile hybrid sturgeon n=3; $\bar{x} \pm SD$				
项目 item	饲料烟酸水平/(mg/kg) dietary niacin level			
	0	30	120	1200
硬度/g hardness	1496.00±55.34 ^a	1792.50±39.39 ^b	1654.00±74.28 ^c	1137.17±36.65 ^d
凝聚性 cohesiveness	0.53±0.01 ^a	0.58±0.02 ^b	0.52±0.02 ^a	0.51±0.02 ^a
弹性 springiness	0.65±0.02 ^a	0.70±0.01 ^b	0.63±0.01 ^c	0.58±0.01 ^d
回复性 resilience	0.42±0.02 ^a	0.48±0.02 ^b	0.46±0.02 ^c	0.35±0.01 ^d
黏性/g gumminess	783.07±13.15 ^a	1004.48±68.07 ^b	942.62±47.53 ^c	631.60±23.98 ^d
咀嚼性/g chewiness	534.13±34.68 ^a	757.11±25.13 ^b	664.60±50.23 ^c	373.45±10.87 ^d

注: 同一行数据肩标不同英文字母的表示两组间有显著性差异($P<0.05$).
Note: Values in the same row with different superscripts mean significant difference ($P<0.05$).

表 4 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼肌肉营养成分的影响

Tab. 4 Effects of dietary niacin levels on muscle composition of juvenile hybrid sturgeon

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

项目 item	饲料烟酸水平/(mg/kg) dietary niacin level			
	0	30	120	1200
水分 moisture	71.01±1.35	71.22±0.98	71.66±0.59	70.58±1.17
粗蛋白 crude protein	16.09±0.84	16.40±0.50	16.01±0.10	16.06±0.59
粗脂肪 ether extract	9.67±0.54	9.24±0.75	8.62±0.45	9.32±1.53
灰分 ash	1.10±0.04	1.03±0.05	1.04±0.01	1.06±0.08

注：同一行数据肩标不同英文字母的表示两组间有显著性差异 ($P<0.05$)。

Note: Values in the same row with different superscripts mean significant difference ($P<0.05$).

2.4 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼肌肉抗氧化性能的影响

饲料中添加不同水平的烟酸养殖杂交鲟幼鱼 12 周后，对其肌肉抗氧化性能的影响见表 5。饲料添加不同水平的烟酸对杂鲟幼鱼肌肉 T-SOD 和 T-AOC 等指标均有显著影响($P>0.05$)。30 mg/kg 烟酸组肌肉 T-SOD 活力显著高于 0 mg/kg 烟酸和 120 mg/kg 烟酸组($P<0.05$)，与 1200 mg/kg 烟酸组无显著差异($P>0.05$)。30 mg/kg 烟酸组肌肉 T-AOC 活力显著高于 0 mg/kg, 120 mg/kg 和 1200 mg/kg 烟酸组($P<0.05$)，0 mg/kg、120 mg/kg、1200 mg/kg 烟酸组之间无显著差异($P>0.05$)。

表 5 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼肌肉抗氧化性能的影响

Tab. 5 Effects of dietary niacin levels on activities of antioxidant enzymes in muscle of juvenile hybrid sturgeon

$n=3$; $\bar{x} \pm SD$

项目 item	饲料烟酸水平/(mg/kg) dietary niacin level			
	0	30	120	1200
T-SOD/ (U/mg prot)	23.11±4.08 ^{ab}	28.10±1.83 ^c	21.34±1.04 ^a	26.58±1.97 ^{bc}
T-AOC/ (mg prot)	0.83±0.09 ^a	1.16±0.29 ^b	0.73±0.14 ^a	0.74±0.06 ^a

注：同一行数据肩标不同英文字母的表示两组间有显著性差异 ($P<0.05$)。

Note: Values in the same row with different superscripts mean significant difference ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼生长性能的影响

关于饲料中添加不同水平的烟酸对养殖鱼类

生长、饲料利用及脂代谢的影响报道很多^[5-10, 19]，这些研究得出的结果均证明饲料中添加适量的烟酸可以提高鱼体增重率，且随着饲料烟酸水平进一步提高，实验鱼体增重率基本与最适烟酸添加组的鱼体增重率基本保持一致；但也有研究表明，饲料中添加高水平的烟酸(1000 mg/kg)时亦不会影响吉富罗非鱼的生长性能和饲料利用，并具有降低实验鱼血脂水平和肝脂含量的作用^[19]，可见饲料中添加一定水平的烟酸对养殖鱼类的生长具有正向作用，这也印证了本研究结果。本研究中，饲料添加烟酸水平大于 30 mg/kg 时，实验鱼的增重率与对照组之间差异显著，且各添加组之间差异不显著，这与团头鲂^[3]、草鱼^[7]、吉富罗非鱼^[5-6]、纹鳃^[9](*Channa punctatus*)、建鲤^[10](*Cyprinus carpio* var. *jian*)和昆明裂腹鱼幼鱼^[20](*Schizothorax grahami*)等研究的结果一致，烟酸促进鱼体的生长可能与饲料中添加烟酸可通过提高饲料利用率有关。向阳^[21]的研究表明，增重与饲料转化率之间呈极显著正相关($r=0.9590$, $P<0.01$)，并且通径分析表明饲料利用率对增重有极显著直接作用，通径系数为 0.9640，决定系数为 0.9293 ($P<0.01$)，也证实了这一观点。这在建鲤^[10]、斑点叉尾鮰^[22](*Ictalurus punctatus*)和印度鲇^[23](*Heteropneustes fossilis*)的研究上亦得到证实。饲料中添加烟酸促进鱼类生长具有积极的作用，同样地，饲料中烟酸缺乏时，鱼类亦会表现出摄食下降、生长不良、饲料转化率降低等症状，同时会引起肠道病变、腹水肿、易出血和鳍条溃烂等综合症状^[4]。但在本研究中，12 周的养殖过程，各实验组实验鱼均未表现出上述缺乏症状，仅对照组实验鱼体增重率显著性的低于烟酸添加组，这可能与基础饲料中仍含有一定量的烟酸(未检出)或养殖实验周期不够长等因素相关。饲料添加不同水平的烟酸对实验鱼的肥满度与脏器比有显著影响，但对实验鱼的肝体比无显著影响，与吉富罗非鱼^[6]研究结果一致，与团头鲂^[3]、草鱼^[7]等的研究结果不一致。

3.2 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼肌肉品质的影响

常见的评价肉质的指标有硬度、弹性、黏性、回复性、咀嚼性和凝聚性等。本实验中采用质地多面剖析法(TPA)进行肉质指标的测定，该法将

力学性质、几何特性与感官知觉三者结合进行肉品质的定义,从而弥补了感官评价的不足^[24-25]。饲料添加不同水平的烟酸对鱼类肌肉肉质指标的影响尚未见报道,但在陆上动物中,以烟酸调控肉品质上证明是有效的,饲料中烟酸添加水平为 550 mg/kg 时,猪背最长肌的亮度和黄度值、pH 及肉色评分是可以得到改善的,同时可以降低其宰后滴水损失及胴体收缩率。而烟酸添加水平为 60 mg/kg 时,可以降低其腿肌、胸肌的滴水损失,同时可以改善其腿肌的嫩度^[21, 26]。同样的,在本研究中也得到了证实,饲料添加 30 mg/kg 烟酸及以上时,实验鱼肌肉的硬度、黏性、咀嚼性、回复性和弹性等指标均随饲料添加烟酸水平的增加而增加,随后出现降低的现象,特别是 1200 mg/kg 组的实验鱼肌肉硬度、黏性、咀嚼性、回复性和弹性等指标降低特别明显,这表明饲料中添加 30 mg/kg 烟酸及以上时,实验鱼经过 12 周的养殖,其肉质指标会受到烟酸的调控,但其具体调控机制还需进一步研究。

3.3 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼肌肉营养成分的影响

饲料中添加不同水平的烟酸可以提高草鱼^[7]、建鲤^[21]、印度鲂^[23]和吉富罗非鱼^[6]的鱼体粗脂肪和粗蛋白质含量,可以降低建鲤^[10]鱼体的水分及提高其灰分含量;但亦有研究表明饲料添加不同水平的烟酸对团头鲂^[26]胴体的水分、灰分、粗蛋白和粗脂肪及凡纳滨对虾^[27](*Litopenaeus vannamei*)全虾的水分、蛋白、脂肪与灰分含量无显著性影响,与本研究结果类似,表明在调控鱼体蛋白质和脂肪沉积时烟酸在不同的物种之间有差异。其调控蛋白质途径可能与其能引起胰岛素缺乏有关^[28],有研究证实,血液中胰岛素含量与蛋白质降解率呈负相关性^[29]。关于烟酸调控体脂肪可能与在脂肪组织中烟酸具有抑制 TG 分解的作用而增加了体脂的积累或贮存有关^[30-31]。

3.4 不同烟酸水平对杂交鲟幼鱼肌肉抗氧化性能的影响

本研究中,饲料添加 30 mg/kg 烟酸及以上时,实验鱼肌肉的 T-SOD 和 T-AOC 等指标均有上升的趋势,且均在 30 mg/kg 烟酸组达到最大水平,

这与王天娇^[26]报道的饲料添加烟酸可以提高团头鲂幼鱼 SOD、CAT 和 GSH 活性,降低肝脏中 MDA 含量及蒋亚军^[32]报道的烟酸对 MDA 具有一定的降低作用的研究结果相符合;但李春燕等^[33]报道饲料烟酸添加水平对血清 GSH-Px、SOD 及 MDA 含量无显著影响,表明饲料中添加一定水平的烟酸对动物的抗氧化能力因对象不同、酶检测组织等不同而有所区别。

4 结论

在本研究条件下,初始体重(54.41±0.79)g 的杂交鲟幼鱼经过不同水平的烟酸养殖 12 周后,其生长、肌肉品质及抗氧化能力均会得到一定程度的改善,建议鲟饲料中添加 30 mg/kg 烟酸是必要的。

参考文献:

- [1] Liu W, Wen H. Recent advance in niacin nutrition physiology of fish[J]. Feed Industry, 2016, 37(12): 26-30. [刘伟, 文华. 鱼类烟酸营养生理研究进展[J]. 饲料工业, 2016, 37(12): 26-30.]
- [2] Foster J W, Park Y K, Penfound T, et al. Regulation of NAD metabolism in *Salmonella typhimurium*: Molecular sequence analysis of the bifunctional nadR regulator and the nadA-pnuC operon[J]. Journal of Bacteriology, 1990, 172(8): 4187-4196.
- [3] Li X F, Wang T J, Qian Y, et al. Dietary niacin requirement of juvenile blunt snout bream *Megalobrama amblycephala* based on a dose-response study[J]. Aquaculture Nutrition, 2017, 23(6): 1410-1417.
- [4] Mai K S. Nutrition and Feed of Aquatic Animals[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011: 105-125. [麦康森. 水产动物营养与饲料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 105-125.]
- [5] Jiang M, Huang F, Wen H, et al. Dietary niacin requirement of GIFT tilapia, *Oreochromis niloticus*, reared in freshwater[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2014, 45(3): 333-341.
- [6] Huang F, Wen H, Wu F, et al. The dietary niacin requirement of large GIFT tilapia[J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(2): 235-240. [黄凤, 文华, 吴凡, 等. 吉富罗非鱼成鱼对烟酸的需要量[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(2): 235-240.]
- [7] Wu F, Jiang M, Zhao Z Y, et al. The dietary niacin requirement of juvenile *Ctenopharyngodon idellus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(1): 65-70. [吴凡, 蒋明, 赵智勇, 等. 草鱼幼鱼对烟酸的需要量[J]. 水产学报, 2008, 32(1): 65-70.]
- [8] Li S Q, Feng L, Jiang W D, et al. Deficiency of dietary niacin decreases digestion and absorption capacities via declining the digestive and brush border enzyme activities and downregulating those enzyme gene transcription related to TOR pathway of the hepatopancreas and intestine in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Aquaculture Nutrition, 2016, 22(6): 1267-1282.
- [9] Zehra S, Khan M A. Dietary niacin requirement of fingerling

- Channa punctatus* (Bloch)[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2018, 34(4): 929-936.
- [10] Xiang Y, Zhou X Q, Feng L, et al. Dietary niacin requirement of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2008, 20(5): 527-533. [向阳, 周小秋, 冯琳, 等. 幼建鲤的烟酸需要量[J]. 动物营养学报, 2008, 20(5): 527-533.]
- [11] Wu F, Wen H, Jiang M, et al. Effect of dietary vitamin C on growth performance, flesh quality and antioxidant function in genetically improved farmed tilapia[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(1): 79-87. [吴凡, 文华, 蒋明, 等. 饲料维生素 C 水平对吉富罗非鱼生长性能、肌肉品质和抗氧化功能的影响[J]. 中国水产科学, 2015, 22(1): 79-87.]
- [12] Hu B, Li X Q, Leng X J, et al. Effects of dietary vitamin C on growth, meat quality and non-specific immunity indices of grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(5): 794-800. [胡斌, 李小勤, 冷向军, 等. 饲料 V_C 对草鱼生长、肌肉品质及非特异性免疫的影响[J]. 中国水产科学, 2008, 15(5): 794-800.]
- [13] Li X Q, Hu B, Leng X J, et al. Effects of supplemental vitamin C on growth, meat quality and serum non-specific immunity of adult grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(6): 787-791. [李小勤, 胡斌, 冷向军, 等. VC 对草鱼成鱼生长、肌肉品质及血清非特异性免疫的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(6): 787-791.]
- [14] Wan J J, Liu B, Ge X P, et al. Effects of dietary vitamin C on growth performance, hematology and muscle physiochemical indexes of juvenile Wuchang bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(1): 112-119. [万金娟, 刘波, 戈贤平, 等. 维生素 C 对团头鲂幼鱼生长、血液学及肌肉理化指标的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(1): 112-119.]
- [15] Real D E, Nelssen J L, Unruh J A, et al. Effects of increasing dietary niacin on growth performance and meat quality in finishing pigs reared in two different environments[J]. Journal of Animal Science, 2002, 80(12): 3203-3210.
- [16] Jiang R R, Zhao G P, Chen J L, et al. Effect of dietary supplemental nicotinic acid on growth performance, carcass characteristics and meat quality in three genotypes of chicken[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2011, 95(2): 137-145.
- [17] Chen X H, Li C J, Yang C G, et al. Status and prospects of techniques in the sturgeon aquaculture industry in China[J]. Freshwater Fisheries, 2017, 47(6): 108-112. [陈细华, 李创举, 杨长庚, 等. 中国鲟鱼产业技术研发现状与展望[J]. 淡水渔业, 2017, 47(6): 108-112.]
- [18] Sun D J. Sturgeon Culture in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [孙大江. 中国鲟鱼养殖[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.]
- [19] Liu W, Wen H, Lu X, et al. Effects of high levels of niacin on lipid metabolism and body fat deposition in genetically improved farmed tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(3): 473-483. [刘伟, 文华, 陆星, 等. 高水平烟酸对吉富罗非鱼脂代谢和体脂沉积的影响[J]. 中国水产科学, 2019, 26(3): 473-483.]
- [20] Zhao H T, Zhang L L, Deng Y, et al. Dietary niacin requirement of juvenile Kunming schizothoracin *Schizothorax grahami*[J]. Fisheries Science, 2014, 33(3): 167-170. [赵海涛, 张罗林, 邓毅, 等. 昆明裂腹鱼幼鱼烟酸需求量研究[J]. 水产科学, 2014, 33(3): 167-170.]
- [21] Xiang Y. Effects of dietary niacin on digestive and immune function of juvenile jian carp (*Cyprinus carpio* var. jian)[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2008. [向阳. 烟酸对幼建鲤消化能力和免疫功能的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.]
- [22] Andrews J W, Murai T. Dietary niacin requirements for channel catfish[J]. The Journal of Nutrition, 1978, 108(9): 1508-1511.
- [23] Mohamed J S, Ibrahim A. Quantifying the dietary niacin requirement of the Indian catfish, *Heteropneustes fossilis* (Bloch), fingerlings[J]. Aquaculture Research, 2001, 32(3): 157-162.
- [24] Li L T. Physical Properties of Foods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001. [李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.]
- [25] Hu F, Li X D, Xiong S B, et al. Texture properties of freshwater fish and their correlation with nutritional components[J]. Food Science, 2011, 32(11): 69-73. [胡芬, 李小定, 熊善柏, 等. 5 种淡水鱼肉的质构特性及与营养成分的相关性分析[J]. 食品科学, 2011, 32(11): 69-73.]
- [26] Wang T J. Effect of niacin on dietary requirement and stress response ability of juvenile blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. [王天娇. 团头鲂幼鱼对烟酸的适宜需要量及调节应激能力的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.]
- [27] Xia M H, Huang X L, Wang H L, et al. Dietary niacin levels in practical diets for *Litopenaeus vannamei* to support maximum growth[J]. Aquaculture Nutrition, 2015, 21(6): 853-860.
- [28] Crozier S J, Anthony J C, Schworer C M, et al. Tissue-specific regulation of protein synthesis by insulin and free fatty acids[J]. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism, 2003, 285(4): E754-E762.
- [29] Liu Z Q, Barrett E J. Human protein metabolism: Its measurement and regulation[J]. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism, 2002, 283(6): E1105-E1112.
- [30] Lukasova M, Hanson J, Tunaru S, et al. Nicotinic acid (niacin): New lipid-independent mechanisms of action and therapeutic potentials[J]. Trends in Pharmacological Sciences, 2011, 32(12): 700-707.
- [31] Lauring B, Taggart A K P, Tata J R, et al. Niacin lipid efficacy is independent of both the niacin receptor GPR109A and free fatty acid suppression[J]. Science Translational Medicine, 2012, 4(148): 115-128.
- [32] Jiang Y J. Effects of nicotinic acid, riboflavin on performance, antioxidant capacity and immunity of dairy cows[D]. Shihezi: Shihezi University, 2011. [蒋亚军. 烟酸、核黄素对奶牛生产性能、抗氧化能力和免疫力的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2011.]
- [33] Li C Y, Zheng C, Sui X Y, et al. Effects of dietary nicotinic acid supplemental level on growth performance, fur quality, blood lipid metabolism indices and serum antioxidant indices of growing rex rabbits[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(3): 971-977. [李春燕, 郑琛, 隋啸一, 等. 饲料烟酸添加水平对生长獭兔生长性能、毛皮品质、血脂代谢及血清抗氧化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(3): 971-977.]

Effect of niacin on growth, flesh quality, and antioxidant function in hybrid sturgeon (*Acipenser schrenckii*♂ × *A. baeri*♀)

WU Jinping, DU Hao, CHEN Xihua, CHU Zhipeng, RUAN Rui, JIN Jiali, QIAO Xinmei, LIU Wei

Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation of Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China

Abstract: It is well known that niacin plays an important role in metabolism with regards to protein, lipid and carbohydrates. Fish fed with a niacin deficient diet may show poor growth, lower feed conversion, skin or fin damage, and anemia. So far, reports regarding the effects of niacin on growth, flesh quality and antioxidant function in hybrid sturgeon (*Acipenser schrenckii*♂ × *A. baeri*♀) are relatively few in number. Therefore, this study was undertaken to evaluate the effects of dietary niacin on growth performance, muscle composition, muscle quality and antioxidant function of juvenile hybrid sturgeon. Four test diets were prepared by adding 0 mg/kg, 30 mg/kg, 120 mg/kg and 1200 mg/kg of niacin, respectively. The juvenile hybrid sturgeon, which had an initial body weight of (54.41±0.79) g, were fed for 12 weeks. The experiment was divided into four treatments, each treatment with three replicates and 15 fish in each replicate. The results showed that weight gain rate was significantly affected by the dietary niacin level ($P<0.05$). The weight gain rate of the 0 mg/kg niacin group was significantly lower than that of the 30 mg/kg, 120 mg/kg and 1200 mg/kg niacin groups ($P>0.05$), and no significant differences were observed among the other niacin groups. The survival rate, feed conversion rate, and viscerosomatic index were not affected by the dietary niacin level ($P>0.05$). The condition factor of the 120 mg/kg niacin group was significantly lower than that of the 0 mg/kg, 30 mg/kg and 1200 mg/kg niacin groups ($P>0.05$), and there was no significant difference between the 0 mg/kg, 30 mg/kg and 1200 mg/kg niacin groups ($P>0.05$). The hepatosomatic index of the 120 mg/kg niacin group was significantly lower than that of the 0 mg/kg and 1200 mg/kg niacin groups ($P<0.05$), and no significant differences were observed between the 30 mg/kg and 120 mg/kg niacin groups ($P>0.05$). The muscle hardness and springiness increased first and then decreased with increasing dietary niacin. The muscle hardness and springiness of the 1200 mg/kg niacin group was significantly lower than that of other niacin groups ($P<0.05$). The muscle chewiness, resilience and gumminess of the 30 mg/kg niacin group was the highest among all groups, and was significant higher than that of the 0 mg/kg, 120 mg/kg and 1200 mg/kg niacin groups ($P<0.05$). The muscle cohesiveness of the 30 mg/kg niacin group was significant higher than that of the 0 mg/kg, 120 mg/kg and 1200 mg/kg niacin groups ($P<0.05$), and there was no significant difference between the 0 mg/kg, 120 mg/kg and 1200 mg/kg groups ($P>0.05$). The muscle composition of crude protein, crude lipid, ash and moisture content were not affected by the dietary niacin level ($P>0.05$). The muscle T-SOD activity of the 30 mg/kg niacin group was significant higher than that of the 0 mg/kg and 120 mg/kg niacin groups ($P<0.05$), but there was no significant difference between the 1200 mg/kg and 120 mg/kg niacin groups ($P>0.05$). Similarly, the muscle T-AOC activity of the 30 mg/kg niacin group was significant higher than that of the 0 mg/kg, 120 mg/kg and 1200 mg/kg niacin groups ($P<0.05$), and there was no significant difference in T-AOC activity between the 0 mg/kg, 120 mg/kg and 1200 mg/kg niacin groups ($P>0.05$). The key finding here is that dietary niacin (≥ 30 mg/kg) can improve the growth, muscle quality and antioxidant capacity of hybrid sturgeon.

Key words: hybrid sturgeon (*Acipenser schrenckii*♂ × *A. baeri*♀); niacin; growth performance; muscle quality; antioxidant capacity

Corresponding author: CHEN Xihua. E-mail: chenxh@yfi.ac.cn