

胍基乙酸对斑点叉尾鲟生长、肝脏抗氧化和肌肉能量代谢的影响

于海罗^{1,2}, 肖调义^{1*}, 骆艺文², 王红权¹, 任为², 叶利海², 章燕铃¹

(1. 湖南农业大学, 湖南省特色水产资源利用工程技术研究中心, 湖南长沙 410128;

2. 武汉正大水产有限公司, 湖北武汉 430070)

摘要: 为研究饲料中添加胍基乙酸 (GAA) 对斑点叉尾鲟生长、肝脏抗氧化以及肌肉能量代谢的影响。本实验共设计 4 个实验组, 分别投喂含 0 (对照组)、300、600 和 900 mg/kg GAA (GAA0、GAA300、GAA600 和 GAA900) 的等能等氮饲料, 实验周期 8 周。结果显示, 各添加 GAA 组末均重 (FBW) 和增重率 (WGR) 较对照组均有提高趋势, 但差异不显著; 添加 GAA 显著影响脏体比 (VSI) 和腹脂率 (IPF), 在 GAA300 组 VSI 和 IPF 最低; 以 IPF 和 VSI 为评价指标, 通过二次函数分析获得 GAA 最适量分别为 275 和 150 mg/kg。添加 GAA 对全鱼水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分均无显著影响, 对肌肉中游离氨基酸和脂肪酸均无显著影响, 但能显著提高肌肉中羟脯氨酸 (HYP) 含量, 改善肌肉品质。添加 GAA 可提高肝脏抗氧化能力, 其中 GAA300 组的总抗氧化能力 (T-AOC) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性显著高于对照组。添加 GAA 可改善肌肉能量代谢, 其中 GAA300 组的琥珀酸脱氢酶 (SDH) 和丙酮酸激酶 (PK) 活性显著高于对照组。研究表明, 饲料中添加 GAA 对斑点叉尾鲟生长及饲料利用无显著促进作用, 但添加 150~300 mg/kg GAA 能降低斑点叉尾鲟腹部脂肪含量和脏体比, 并能提高肝脏抗氧化能力和肌肉能量代谢。

关键词: 斑点叉尾鲟; 胍基乙酸 (GAA); 生长; 肝脏抗氧化性能; 肌肉能量代谢

中图分类号: S 963.7

文献标志码: A

肌酸在机体能量代谢中发挥重要作用, 其磷酸肌酸形式可提供高能磷酸键供二磷酸腺苷 (ADP) 生成三磷酸腺苷 (ATP), 维持 ATP 动态平衡。肌酸可在机体内自行合成, 也可外源添加, 但肌酸在饲料添加过程中存在不稳定性。甘氨酸与 L-精氨酸在精氨酸-甘氨酸脒基转移酶 (AGAT) 作用下生成胍基乙酸 (GAA) 和鸟氨酸。GAA 是肌酸的合成前体物质, GAA 在胍基乙酸脒基转移酶 (GAMT) 作用下生成肌酸^[1]。GAA 性质稳定, 因此常用 GAA 作为肌酸的补充源^[2]。饲料中添加

GAA 在畜禽上应用广泛, 大量研究表明 GAA 可以提高动物的生长性能^[3-5], 改善肌肉品质和提高抗氧化能力^[6-7]。目前 GAA 在水产方面的研究报道相对较少, 集中在眼斑拟石首鱼 (*Sciaenops ocellatus*)、美洲牛蛙 (*Lithobates catesbeianus*)、草鱼 (*Ctenopharygodon idella*) 和尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)^[8-12]等种类, 未见有关于 GAA 对斑点叉尾鲟 (*Ictalurus punctatus*) 生长、抗氧化能力及能量代谢影响的报道。

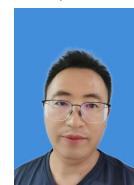
斑点叉尾鲟属鲇形目 (Siluriformes) 鲟科

收稿日期: 2021-11-10 修回日期: 2022-03-16

资助项目: 国家大宗淡水鱼产业技术体系 (CARS-45-48)

第一作者: 于海罗 (照片), 从事水生动物营养与生理研究, E-mail: yuhailuo.cool@163.com

通信作者: 肖调义, 从事水产动物免疫与遗传研究, E-mail: tyxiao1128@163.com



(Ictaluridae), 原产于北美洲大陆, 分布范围从加拿大南部到墨西哥北部, 1984年由湖北省水产科学研究所引进至中国^[13]。据2021中国渔业统计年鉴数据显示, 斑点叉尾鲟2020年养殖产量约30.85万t, 加工量约为4.65万t, 斑点叉尾鲟已逐渐成为消费者喜爱的经济鱼类。但近年来消费者对鱼肉品质要求在不断提高, 而不同养殖模式^[14]、饲料料型^[15]以及暂养环境^[16]等都会对斑点叉尾鲟肌肉品质产生影响, 因此改善斑点叉尾鲟肌肉品质尤为重要。因此, 本实验将验证GAA对斑点叉尾鲟的生长性能、肌肉品质、抗氧化能力和能量代谢的影响, 以期GAA在水产上应用提供更多参考依据。

1 材料与方法

1.1 饲料配方与制作

实验饲料以国产鱼粉、猪肉粉、豆粕和菜粕为蛋白源, 豆油和鱼油为脂肪源, 面粉为糖源(原料均由武汉正大水产有限公司提供)。在基础饲料中添加0、300、600和900 mg/kg GAA(有效含量 \geq 95%, 湖北景瑞天恒生物科技有限公司), 配制成4种等能等氮的实验饲料, 基础饲料组成及营养成分见表1。实验饲料在武汉正大水产有限公司研发中心实验室制作, 所有原料粉碎后经60目分

级筛, 按配比混匀, 少量组分逐级扩大法混合, 经熟化和烘干制成直径1.8 mm的实验饲料, 置于4℃冰箱保存备用。

1.2 实验管理

实验斑点叉尾鲟由武汉正大水产有限公司提供, 养殖地点为武汉正大水产有限公司实验车间。将实验斑点叉尾鲟置于网箱(2 m \times 2 m \times 1.6 m)中暂养2周, 暂养期间使用武汉正大水产有限公司专用斑点叉尾鲟料, 每天分别在6:30和18:00饱食投喂进行驯食。驯食完成后禁食24 h, 挑选健康斑点叉尾鲟至体积为1 000 L的实验桶中, 24 h后开始投喂实验料。实验共设4个处理组, 每组5个重复, 每个重复30尾斑点叉尾鲟。养殖期间每天分别在6:30和18:00饱食投喂; 采用连续流水养殖, 水源经沙滤、曝气和消毒, 连续增氧保持溶解氧7.0 mg/L以上; pH7.5~8.2, 水温25~30℃; 水质氨氮低于0.02 mg/L, 亚硝酸盐低于0.01 mg/L。光照为自然光源, 养殖周期为8周。本研究获得了湖南农业大学实验动物管理和使用伦理委员会批准, 过程中操作人员严格遵守湖南农业大学伦理规范, 并按照湖南农业大学伦理委员会制定的规章制度执行。

表1 基础饲料配方及常规成分(干物质)

Tab. 1 Formulation and proximate composition of the basal diet (air-dry basis)				%	
项目 items	含量 content	项目 items	含量 content		
国产鱼粉(62%) domestic fish meal	5.00	蛋氨酸 methionine	0.20		
猪肉粉(69%) pork meat powder	8.00	盐 NaCl	0.50		
豆粕(46%) soybean meal	34.00	矿物元素预混料 ¹ mineral premix	0.50		
脱酚棉籽蛋白(60%) degossypolized cottonseed protein	5.00	维生素预混料 ² vitamin premix	0.20		
菜粕(36%) rapeseed meal	10.00	氯化胆碱(75%) choline chloride	0.25		
面粉(15%) wheat flour	20.00	维生素C(35%) vitamin C	0.05		
米糠(13%) rice bran	9.38	抗氧化剂 antioxidants	0.02		
鱼油 fish oil	1.00	合计 total	100.00		
豆油 soybean oil	3.00	营养水平 nutrient levels			
磷酸二氢钙 calcium diphosphate	2.00	粗蛋白 crude protein	37.48		
酿酒酵母 brewer's yeast meal	0.50	粗脂肪 crude lipid	6.67		
赖氨酸 lysine	0.40	粗灰分 crude ash	8.05		

注: 1. 每千克维生素元素预混料含有维生素A乙酸酯480 mg、维生素D₃ 7.5 mg、维生素E 10 668 mg、维生素K₃ 800 mg、维生素B₁ 1 500 mg、维生素B₆ 1 600 mg、烟酸7 800 mg、泛酸钙4 700 mg、叶酸1 100 mg、水分12%; 2. 每千克矿物元素预混料含锰2 000 mg、铁90 000 mg、锌5 000 mg、铜300 mg、镁47 000 mg、硒10 mg、水分12%。

Notes: One kilogram of vitamin premix contains VA acetate 480 mg, VD₃ 7.5 mg, VE 10 668 mg, VK₃ 800 mg, VB₁ 1 500 mg, VB₆ 1 600 mg, niacin 7 800 mg, calcium pantothenate 4 700 mg, folic acid 1 100 mg, moisture 12%; one kilogram of mineral premix contained Mn 2 000 mg, Fe 90 000 mg, Zn 5 000 mg, Cu 300 mg, Mg 47 000 mg, Se 10 mg, moisture 12%.

1.3 样品制备与分析

生长性能与饲料利用 养殖结束时将斑点叉尾鲷饥饿 24 h, 对所有斑点叉尾鲷称重并计数, 计算增重率、成活率和饲料系数; 每桶随机取 14 尾吸干体表水分测量体重和体长, 计算肥满度; 其中 10 尾解剖取内脏和肌肉, 分别计重后将肝脏和肌肉保存于 -80°C 备用; 剩余 4 尾用于分析体常规营养成分。

全鱼和饲料常规营养成分测定 采用乙醚抽提法 (GB/T 6433—1994) 测定全鱼的粗脂肪, 采用凯氏定氮法 (GB/T 6432—1994) 测定粗蛋白, 采用马弗炉 550°C 灼烧法 (GB/T 6438—1992) 测定粗灰分, 采用 105°C 烘干恒重法测定水分含量。

组织的酶活性和肌糖原含量测定 肝脏或肌肉酶活性指标和肌糖原含量测定, 均使用南京建成生物工程研究所试剂盒测定。测定方法: 肝脏总抗氧化能力 (T-AOC, ABTS 法)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px, 比色法)、丙二醛 (MDA) TBA 法)、超氧化物歧化酶 (SOD, 羟胺法)、过氧化氢酶 (CAT, 比色法)、丙酮酸激酶 (PK, 紫外比色法)、琥珀酸脱氢酶 (SDH, 比色法)、肌酸激酶 (CK, 比色法)、羟脯氨酸 (HYP, 碱水解法)、肌糖原 (比色法), 具体操作步骤参照说明书进行。

肌肉氨基酸和脂肪酸测定 取肌肉样品 2.5 g, 用盐酸匀浆、超声浸提等方法, 使用氨基酸分析仪 (L8900 日立) 测定肌肉氨基酸组成。取肌肉样品 0.5 g 置于 50 mL 离心管中, 加入苯-石油醚混合溶剂密闭浸提, 用气相色谱质谱联用仪 (安捷伦 7890A/5975C) 测定脂肪酸组成。

1.4 计算公式

各个指标计算公式:

$$\text{增重率 (weight growth rate, WGR, \%)} = (W_2 - W_1) / W_1 \times 100\%$$

$$\text{特定生长率 (specific growth rate, SGR, \%)} = (\ln W_2 - \ln W_1) / t \times 100\%$$

$$\text{饲料系数 (feed coefficient ratio, FCR)} = C_t / (W_2 - W_1)$$

$$\text{肥满度 (condition factor, CF, g/cm}^3) = W_0 / L_b^3 \times 100$$

$$\text{肝体比 (hepato somatic index, HSI, \%)} = L_w / W_0 \times 100\%$$

$$\text{脏体比 (viscerosomatic index, VSI, \%)} = C_w / W_0 \times 100\%$$

$$\text{腹脂率 (intraperitoneal fat ratio, IPF, \%)} = W_f / W_0 \times 100\%$$

式中, W_0 为体重 (g), W_1 为初始体重 (g), W_2 为终末体重 (g), C_t 为每桶累计耗用饲料总重 (g), L_b 为体长 (cm), L_w 为肝脏重量 (g), C_w 为内脏重量 (g), W_f 为腹部脂肪重量 (g), t 为养殖周期 (d)。

1.5 数据分析

数据用 IBM SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 用 Tukey 多重比较组间均值差异, $P < 0.05$ 表示差异显著; 数据以平均值 \pm 标准误 (mean \pm SE) 表示。

2 结果

2.1 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷生长及饲料利用的影响

添加 GAA 可显著影响斑点叉尾鲷的形体指标, 与对照组相比, VSI 和 IPF 在 GAA300 组有下降趋势 ($P > 0.05$), 随着 GAA 添加量的增加而升高, 与 GAA300 组相比, GAA900 组斑点叉尾鲷 VSI 和 IPF 显著升高 ($P < 0.05$) (表 2)。饲料中添加 GAA 对 FBW、WGR、SGR、FCR、HSI、CF 和 SR 无显著影响 ($P > 0.05$), FBW 和 WGR 在 GAA300 组最高 (表 2)。以 IPF 为指标通过二次函数分析, 获得最适 IPF 的 GAA 添加量为 275 mg/kg (图 1); 以 VSI 为指标通过二次函数分析, 获得最适 VSI 的 GAA 添加量为 150 mg/kg (图 2)。

2.2 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肌肉品质的影响

添加 GAA 对斑点叉尾鲷全鱼水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分含量均无显著影响 ($P > 0.05$) (表 3)。肌糖原含量随着 GAA 添加水平的增加有升高趋势 ($P > 0.05$); 各添加组羟脯氨酸 (HYP) 含量显著高于对照组 ($P < 0.05$) (表 4)。饲料 GAA 水平对斑点叉尾鲷肌肉中游离氨基酸 (表 5) 和脂肪酸 (表 6) 含量均无显著影响 ($P > 0.05$)。

2.3 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肝脏抗氧化指标的影响

添加 GAA 显著影响斑点叉尾鲷肝脏 T-AOC、MDA 和 SOD 抗氧化指标 ($P < 0.05$)。GAA300 组 T-AOC 显著高于其他组 ($P < 0.05$), 其他组间无显

表 2 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷生长和饲料利用的影响

Tab. 2 Effect of different dietary GAA supplementation on growth performance and feed utilization of *I. punctatus*

项目	items	GAA0	GAA300	GAA600	GAA900	P值	P-value
初始体重/g	IBW	36.67±0.00	37.09±0.27	36.88±0.21	36.91±0.51		0.815
终末体重/g	FBW	145.96±0.89	147.37±0.99	147.22±1.13	146.88±0.51		0.780
增重率/%	WGR	298.06±2.43	299.24±3.74	299.24±3.03	298.55±2.32		0.989
特定增长率/%	SGR	2.47±0.01	2.47±0.02	2.47±0.01	2.47±0.01		0.983
饲料系数/%	FCR	1.18±0.01	1.18±0.01	1.18±0.02	1.19±0.01		0.964
肝体比/%	HSI	1.13±0.04	1.13±0.04	1.17±0.04	1.18±0.01		0.633
脏体比/%	VSI	7.74±0.16 ^{ab}	7.51±0.18 ^a	8.06±0.22 ^{ab}	8.43±0.06 ^b		0.014
腹脂率/%	IPF	3.94±0.24 ^{ab}	3.72±0.15 ^a	4.06±0.05 ^{ab}	4.58±0.25 ^b		0.043
肥满度/(g/cm ³)	CF	1.54±0.03	1.59±0.05	1.54±0.03	1.53±0.04		0.748
成活率/%	SR	100.00±0.00	99.45±0.56	99.45±0.56	98.89±1.11		0.724

注: 同一行数值上标不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 下同。
Notes: Values in the same row with different superscripts are significant different ($P < 0.05$); the same below.

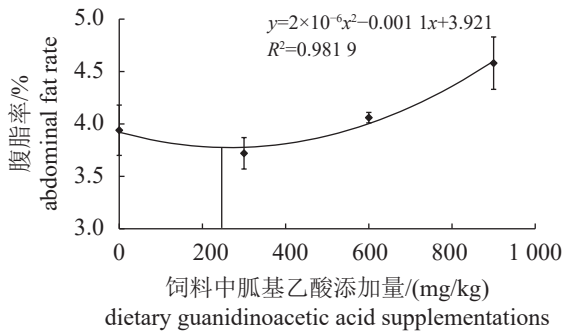


图 1 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷腹脂率的影响
Fig. 1 Effect of different dietary GAA supplementation on IPF of *I. punctatus*

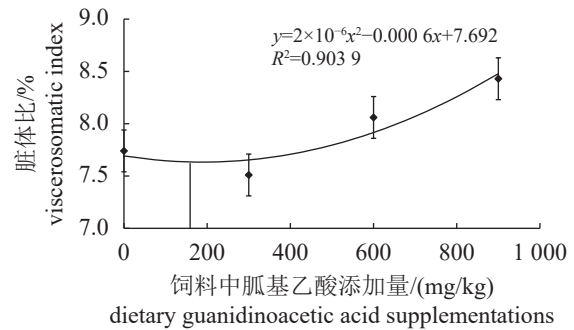


图 2 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷脏体比的影响
Fig. 2 Effect of different dietary GAA supplementations on VSI of *I. punctatus*

表 3 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷体成分的影响

Tab. 3 Effect of different dietary GAA supplementation on body nutritional composition of *I. punctatus*

项目	items	GAA0	GAA300	GAA600	GAA900	P值	P-value
水分/%	moisture	71.87±0.53	72.07±0.05	71.87±0.40	72.00±0.48		0.980
粗蛋白/%	crude protein	14.07±0.42	14.28±0.31	14.07±0.07	14.06±0.18		0.929
粗脂肪/%	crude lipid	9.67±0.26	9.13±0.34	9.77±0.32	9.11±0.28		0.326
粗灰分/%	crude ash	3.11±0.07	3.26±0.09	3.19±0.04	3.17±0.01		0.432

表 4 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肌肉糖原和羟脯氨酸含量的影响

Tab. 4 Effect of different dietary GAA supplementation on glycogen and hydroxyproline in muscle of *I. punctatus*

项目	items	GAA0	GAA300	GAA600	GAA900	P值	P-value
肌糖原/(mg/g)	muscle glycogen	0.38±0.02	0.40±0.02	0.42±0.02	0.43±0.02		0.298
羟脯氨酸/(μg/g)	HYP	8.40±1.01 ^a	14.36±0.81 ^b	20.83±0.79 ^c	25.94±1.51 ^c		0.000

著差异 ($P > 0.05$); 与对照组相比, MDA 含量在 GAA600 组显著升高, 在 GAA900 组达到最大 ($P <$

0.05); 与对照组相比, GAA300 组和 GAA600 组的 SOD 活性显著升高 ($P < 0.05$), GAA900 组

表 5 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肌肉氨基酸组成的影响

Tab. 5 Effect of different dietary GAA supplementation on free amino acid composition in muscle of *I. punctatus* (dry matter)

项目 items	GAA0	GAA300	GAA600	GAA900	P值	P-value
苏氨酸 Thr	184.33±10.01	201.73±14.34	189.11±10.49	172.62±4.86	0.297	
缬氨酸 Val	60.01±2.75	57.02±2.30	57.07±3.32	58.08±5.58	0.179	
蛋氨酸 Met	2.48±0.35	1.92±0.27	1.60±0.44	1.80±0.23	0.290	
异亮氨酸 Ile	18.78±3.88	21.34±2.53	19.71±2.65	28.58±2.03	0.104	
亮氨酸 Leu	60.33±4.00	64.65±1.58	68.60±3.74	61.05±3.01	0.276	
苯丙氨酸 Phe	172.36±7.54	152.62±15.41	144.59±6.07	141.17±14.99	0.271	
赖氨酸 Lys	159.91±12.28	147.81±14.22	184.69±15.32	158.96±14.94	0.337	
组氨酸 His	51.93±3.80	53.97±2.08	59.61±5.26	54.96±3.55	0.605	
精氨酸 Arg	77.10±3.09	70.61±9.45	67.36±10.42	67.29±6.24	0.770	
脯氨酸 Pro	71.20±4.78	68.97±4.98	69.78±2.28	78.78±7.42	0.622	
天冬氨酸 Asp	14.86±1.37	16.22±0.90	16.47±2.88	17.14±2.32	0.821	
丝氨酸 Ser	61.89±5.30	55.43±2.77	55.80±5.43	64.22±6.50	0.569	
谷氨酸 Glu	157.21±7.20	157.73±4.77	154.04±7.96	147.49±17.13	0.865	
甘氨酸 Gly	222.14±19.53	207.06±15.73	186.84±15.58	187.31±12.73	0.363	
丙氨酸 Ala	302.87±3.50	323.85±13.27	325.52±10.07	315.02±15.24	0.559	
半胱氨酸 Cys	18.43±1.73	18.64±1.01	16.88±0.29	18.61±2.86	0.868	
酪氨酸 Tyr	66.60±3.17	76.33±1.67	70.09±1.63	73.39±4.01	0.115	
非必需氨基酸 NEAA	1013.18±14.53	1046.97±48.55	1009.20±38.29	1002.79±58.91	0.896	
必需氨基酸 EAA	1711.26±59.96	1697.04±77.19	1701.59±23.15	1648.52±87.57	0.923	

SOD 活性有升高趋势 ($P > 0.05$); 各组间的 GSH-Px 和 CAT 活性无显著差异 ($P > 0.05$), GSH-Px 活性在 GAA300 组最高 (表 7)。

2.4 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肌肉能量代谢酶活的影响

随着 GAA 添加水平增加, 肌肉 CK 酶活性呈先上升后下降的趋势, 但各组间无显著差异 ($P > 0.05$); 与对照组相比, 肌肉中 SDH 酶活性在 GAA300 组显著升高 ($P < 0.05$); 肌肉 PK 酶活性随 GAA 添加水平的增加先上升后下降, 其中 GAA300 组和 GAA600 组的 PK 酶活性显著高于对照组 ($P < 0.05$) (表 8)。

3 讨论

3.1 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷生长性能的影响

研究表明, 适宜的精氨酸可促进生长^[17]。GAA 由甘氨酸和 L-精氨酸合成, 添加外源性 GAA 可作为精氨酸的有效替代物, 促进精氨酸用

于蛋白质合成代谢、信号传导和激素释放等; 同时可直接提高磷酸肌酸 ATP 值, 提供更多 ATP 促进肌纤维发育, 改善动物的生长性能^[18]。但在本研究中添加 GAA 对斑点叉尾鲷生长并无显著的促进作用, 这与已有研究结果一致。沈琴等^[19]在饲料中添加 250、500 和 1 000 mg/kg GAA 对建鲤 (*Cyprinus carpio* var. jian) FBW、SGR 和 WGR 均无改善作用。Stites 等^[8]在眼斑拟石首鱼饲料中添加 GAA(0、5 和 10 g/kg) 和肌酸 (0 和 20 g/kg) 发现, 添加 GAA 对 FBW 和 WGR 无促进作用; 但 Lin 等^[9]研究发现, 添加 0.4 g/kg GAA 可显著提高美洲牛蛙生长性能, 造成这些结果差异可能的原因是不同的养殖动物对精氨酸的需求量不同。有研究表明精氨酸可调节脂肪组织和肌肉组织之间的脂质分布^[20]。本研究中, 随着 GAA 添加水平增加, 斑点叉尾鲷 IPF 呈现先下降后上升趋势, 在添加 300 mg/kg 组最低。以 IPF 为指标通过二次函数分析, 获得最适 IPF 的 GAA 添加量为 275 mg/kg, 说明添加适量的 GAA 可有效减少腹腔脂肪蓄积, 间接调节脂质分布。

表 6 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肌肉脂肪酸含量的影响

Tab. 6 Effect of different dietary GAA supplementation on the fatty acid (FA) of total FA in muscle of *I. punctatus* %

项目 items	GAA0	GAA300	GAA600	GAA900	P值 P-value
C14:0	1.06±0.02	1.13±0.04	1.15±0.06	1.07±0.02	0.299
C15:0	0.17±0.00	0.17±0.00	0.17±0.00	0.17±0.00	0.863
C16:0	19.61±0.12	19.20±0.25	19.82±0.26	19.71±0.31	0.337
C17:0	0.25±0.01	0.25±0.01	0.24±0.01	0.25±0.01	0.674
C18:0	8.73±0.10	8.50±0.33	7.97±0.32	8.56±0.14	0.191
C20:0	0.25±0.01	0.27±0.00	0.25±0.01	0.26±0.00	0.357
C22:0	0.07±0.00	0.08±0.00	0.08±0.01	0.08±0.00	0.427
C24:0	1.45±0.08	1.26±0.08	1.34±0.12	1.46±0.09	0.409
C16:1	1.41±0.02	1.48±0.07	1.56±0.09	1.47±0.03	0.414
C18:1n9t	0.22±0.00	0.22±0.01	0.21±0.01	0.20±0.01	0.206
C18:1n9c	35.40±0.99	36.29±0.52	36.23±0.77	35.19±0.99	0.718
C20:1	1.25±0.03	1.32±0.03	1.24±0.04	1.21±0.01	0.063
C18:2n6c	18.06±0.23	19.29±0.28	18.30±0.54	18.24±0.13	0.088
C18:3n6	0.22±0.01	0.25±0.01	0.25±0.02	0.23±0.01	0.193
C18:3n3	1.50±0.04	1.66±0.03	1.54±0.08	1.53±0.04	0.154
C20:2	1.31±0.05	1.18±0.03	1.18±0.04	1.26±0.00	0.115
C20:3n3	0.12±0.01	0.11±0.01	0.11±0.01	0.12±0.00	0.465
C20:3n6	1.55±0.10	1.39±0.06	1.34±0.05	1.59±0.11	0.159
C20:4n6	1.68±0.12	1.25±0.12	1.33±0.13	1.44±0.10	0.079
C20:5n3 (EPA)	0.02±0.01	0.02±0.01	0.02±0.01	0.02±0.01	0.979
C22:6n3 (DHA)	5.74±0.49	4.52±0.32	4.50±0.26	5.22±0.28	0.072
n3 PUFA	7.57±0.40	6.32±0.30	6.89±0.65	7.26±0.40	0.546
n6 PUFA	21.51±0.24	22.17±0.27	21.55±0.28	21.80±0.30	0.301
n3/n6	0.35±0.02	0.29±0.01	0.31±0.03	0.33±0.02	0.324
饱和脂肪酸 SFA	31.29±0.44	30.88±0.19	31.06±0.40	31.06±0.44	0.595
单不饱和脂肪酸 MUFA	38.30±1.03	39.38±0.58	39.30±0.89	38.07±1.07	0.659
多不饱和脂肪酸 PUFA	30.96±0.32	29.74±0.44	29.63±0.54	30.33±0.68	0.332

表 7 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肝脏抗氧化指标的影响

Tab. 7 Effect of different dietary GAA supplementation on hepatic antioxidant indices of *I. punctatus*

项目 items	GAA0	GAA300	GAA600	GAA900	P值 P-value
总抗氧化力/(U/mg prot) T-AOC	0.12±0.01 ^a	0.17±0.01 ^b	0.13±0.00 ^a	0.12±0.01 ^a	0.003
谷胱甘肽过氧化物酶/(U/mg prot) GSH-Px	20.91±3.89	26.22±6.70	23.50±1.36	24.03±0.49	0.820
丙二醛/(nmol/mg prot) MDA	0.41±0.02 ^a	0.62±0.10 ^a	1.10±0.12 ^b	1.12±0.12 ^b	0.001
超氧化物歧化酶/(U/mg prot) SOD	966.18±6.81 ^a	1 191.42±26.06 ^b	1 236.50±65.17 ^b	1 133.99±40.61 ^{ab}	0.007
过氧化氢酶/(U/mg prot) CAT	0.43±0.02	0.43±0.03	0.45±0.05	0.45±0.04	0.944

表 8 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肌肉能量代谢酶的影响

项目 items	GAA0	GAA300	GAA600	GAA900	P值	P-value
肌酸激酶/(U/mg prot) CK	5.74±0.23	5.84±0.25	6.13±0.19	6.03±0.23		0.668
琥珀酸脱氢酶/(U/mg prot) SDH	11.11±0.11 ^a	14.02±0.66 ^b	12.88±0.70 ^{ab}	13.31±0.54 ^{ab}		0.028
丙酮酸激酶/(U/g prot) PK	82.59±1.44 ^a	96.00±2.45 ^b	103.98±2.73 ^b	84.85±2.40 ^a		0.001

3.2 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肌肉品质的影响

胶原蛋白是反映肌肉品质的重要指标, 胶原蛋白及其交联结构与肌肉硬度和质地有关, 鱼类研究表明肌肉中胶原蛋白含量与硬度成正比^[21]。李乃顺等^[22]研究绿原酸对草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 生长及肉质的影响中也指出, 当添加量为 0.02% 时可显著提高肌肉中胶原蛋白的含量, 从而改善肌肉品质。羟脯氨酸是胶原蛋白特有的氨基酸, 补充适量羟脯氨酸可帮助体内胶原蛋白的重建。刘云正^[23]研究发现, 高植物蛋白替代鱼粉后添加羟脯氨酸对大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 幼鱼生长的影响, 表明添加 40 I 和 50 I 羟脯氨酸可以显著提高肌肉羟脯氨酸和胶原蛋白含量。本研究中, 添加 300~900 mg/kg GAA 可显著提高肌肉羟脯氨酸含量, 从而提高肌肉中胶原蛋白含量, 改善肌肉品质。动物肌肉停止供氧后, 通过无氧酵解产生乳酸导致 pH 降低, 进而影响肉色、系水力等^[1]。添加 GAA 可直接提高磷酸肌酸 ATP 值, 降低肌糖原作为能源物质的分解, 缓解肌肉无氧酵解和降低乳酸含量, 从而改善肌肉品质, 所以肌糖原含量也可作为肌肉品质评价指标。本实验中添加 GAA 后, 肌肉中肌糖原含量均有提高, 有助于提升斑点叉尾鲷肌肉品质。Yang 等^[10]在植物蛋白饲料中添加 0、150、300、450 和 600 mg/kg GAA, 通过 60 d 养殖发现, 添加 300 mg/kg 组可显著提高肌肉中 EPA 和 DHA 含量, 并对游离氨基酸中必需氨基酸和氨基酸总量产生显著影响。本实验中, 添加 GAA 对肌肉游离氨基酸和脂肪酸均无影响, 可能是与养殖品种和养殖周期相关, 具体原因还需进一步研究。

3.3 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷肝脏抗氧化指标的影响

动物机体抗氧化酶系包括 SOD、GSH-Px、CAT 等, T-AOC 是反映机体总抗氧化机能的指标。SOD 能够清除细胞中多余的自由基 (O_2^-), 抵抗过

氧化物攻击而保护细胞; GSH-Px 催化过氧化氢分解, 降低过氧化物的含量, 保护细胞膜结构和功能完整性, 使机体不受氧化损害; CAT 将过氧化氢催化分解成水, 解除自由基氧化造成的损害^[24]。耿凯等^[25]在育肥猪饲料中添加 0.5% GAA 中药制剂发现, 添加 0.5% GAA 中药制剂可显著提高肝脏 T-AOC、SOD 和 GSH-Px 含量, 提高育肥猪的抗氧化能力。王子苑等^[26]在肉牛基础饲料中分别添加 400 和 800 mg/kg GAA, 结果表明, 添加 400 mg/kg GAA 可显著提高肝脏 T-AOC 和内源性抗氧化酶 SOD、GSH-Px 酶活性, 提高机体抗氧化能力。Zeng 等^[27]发现, 植物蛋白饲料中分别添加 0.2、0.4、0.6 和 0.8 g/kg GAA 对美国牛蛙 (*Rana catesbeiana*) 生长及抗氧化性能的影响, 表明 0.4~0.6 g/kg 组血清 T-AOC 显著高于对照组, CAT 与添加量呈正相关, 在 0.8 g/kg 添加量时达到最大值。本研究中, 添加 300 mg/kg GAA 可显著提高斑点叉尾鲷肝脏 T-AOC 和 SOD 水平, 分析可能是斑点叉尾鲷摄入适量 GAA 有助于提高肌酸和磷酸肌酸含量, 肌酸具有直接抗氧化作用, 磷酸肌酸可抑制氧化应激反应增强抗氧化酶系统^[24]; 当 GAA 添加量为 600~900 mg/kg 时, 斑点叉尾鲷肝脏抗氧化能力反而降低, 可能是添加过量导致 GAA 代谢紊乱或化合物大量积累, GAA 表现为强氧化剂, 并诱导氧化应激^[28], 从本实验 MDA 变化推测高剂量 GAA 可导致斑点叉尾鲷呈氧化应激状态。

3.4 饲料中 GAA 水平对斑点叉尾鲷能量代谢关键酶的影响

CK 将磷酸肌酸上磷酸基团转移到 ADP 后合成 ATP, 因此肌酸激酶在能量代谢中起重要作用^[1]; SDH 参与三羧酸循环, 间接反映线粒体功能和组织供氧情况^[18]。Azizaa 等^[12]在尼罗罗非鱼饲料中添加 0.12% 和 0.18% GAA 均能显著提高 CK 活性; Lin 等^[9]也证实添加 0.4 和 4 g/kg GAA 可显著提高 CK 活性。本实验中添加 300~900 mg/kg GAA

较对照组 CK 活性和肌糖原含量均有提高趋势, 说明添加 GAA 可能有助于减少糖类物质分解, 更多以糖原形式储能。PK 是糖酵解限速酶之一, 将磷酸烯醇式丙酮酸催化成丙酮酸并伴随有 ATP 生成, 可反映糖酵解水平。本实验研究表明添加 300 mg/kg GAA 显著提高 PK 活性, 与前述部分研究证实 GAA 可提高肌糖原含量的结果相对应, 说明添加 GAA 可促进糖酵解和能量代谢。这与李洁蕾等^[29] 研究结果一致; 而王子苑等^[26] 在肉牛饲料中添加 400 mg/kg GAA 和沈琴等^[19] 在建鲤饲料中添加 250~1 000 mg/kg GAA 均显著降低了 PK 活性, 推测可能是与养殖动物种类相关。

4 结论

本实验条件下, 斑点叉尾鲷饲料中添加适量的 GAA(150~300 mg/kg) 能降低腹部脂肪和脏体比, 提高肝脏抗氧化能力和肌肉能量代谢。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 廖艳琴, 张春晓. 水产动物肌酸营养的研究进展[J]. 水产学报, 2019, 43(10): 2084-2092.
Liao Y Q, Zhang C X. Research progress of nutritional effects of creatine on aquatic animals[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(10): 2084-2092 (in Chinese).
- [2] 晁雅琳, 刘博, 寇启芳, 等. 胍基乙酸对舍饲滩羊生长性能、屠宰性能、脂肪沉积及肌肉营养成分的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(1): 388-394.
Chao Y L, Liu B, Kou Q F, et al. Effects of guanidine acetic acid on growth performance, slaughter performance, fat deposition and nutritional components in muscle of stabling tan sheep[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(1): 388-394 (in Chinese).
- [3] 任国栋, 郝小燕, 刘森, 等. 胍基乙酸和甜菜碱对公羔生长发育、屠宰性能和肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(12): 6899-6909.
Ren G D, Hao X Y, Liu S, et al. Effects of guanidineacetic acid and betaine on growth and development, slaughter performance and meat quality of lambs[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(12): 6899-6909 (in Chinese).
- [4] 刘笑梅, 郝小燕, 张宏祥, 等. 饲料中添加胍基乙酸对羔羊生长性能、屠宰性能和肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(3): 1565-1575.
Liu X M, Hao X Y, Zhang H X, et al. Effects of dietary guanidineacetic acid on growth performance, slaughter performance and meat quality of lambs[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(3): 1565-1575 (in Chinese).
- [5] Li J L, Zhang L, Fu Y N, et al. Creatine monohydrate and guanidinoacetic acid supplementation affects the growth performance, meat quality, and creatine metabolism of finishing pigs[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(38): 9952-9959.
- [6] 李蛟龙, 马冰冰, 陈作栋, 等. 胍基乙酸对育肥猪肉品质和抗氧化能力的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(12): 94-100.
Li J L, Ma B B, Chen Z D, et al. Effects of guanidinoacetic acid supplementation on meat quality and antioxidant capacity of finishing pigs[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(12): 94-100 (in Chinese).
- [7] 刘律, 李晓斌, 马艳, 等. 补喂胍基乙酸对伊犁马运动性能、糖代谢以及抗氧化能力的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(9): 5162-5173.
Liu L, Li X B, Ma Y, et al. Effects of supplementary feeding guanidinoacetic acid on movement performance, glucose metabolism and antioxidant capacity of Yili horses[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(9): 5162-5173 (in Chinese).
- [8] Stites W, Wang L, Gatlin III D M. Evaluation of dietary creatine and guanidinoacetic acid supplementation in juvenile red drum *Sciaenops ocellatus*[J]. Aquaculture Nutrition, 2020, 26(2): 382-389.
- [9] Lin J B, Zhang C X, Lu K L, et al. Effect of guanidinoacetic acid and betaine supplementation in soybean meal-based diets on growth performance, muscle energy metabolism and methionine utilization in the bullfrog *Lithobates catesbeianus*[J]. Aquaculture, 2021, 533: 736167.
- [10] Yang L L, Wu P, Feng L, et al. Guanidinoacetic acid supplementation totally based on vegetable meal diet improved the growth performance, muscle flavor components and sensory characteristics of on-growing grass carp (*Ctenopharygodon idella*)[J]. Aquaculture, 2021, 531: 735841.

- [11] Wiriapattanasub P, Suratip N, Charoenwattanasak S, *et al.* Dietary guanidinoacetic acid response on digestibility, growth performance, feed utilization and carcass quality in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Aquaculture Research*, 2020, 51(12): 5141-5150.
- [12] Aziza A, Mahmoud R, Zahran E, *et al.* Dietary supplementation of guanidinoacetic acid improves growth, biochemical parameters, antioxidant capacity and cytokine responses in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020, 97: 367-374.
- [13] 姬广闻, 李同国, 常东洲, 等. 名特优水产品高效养殖技术 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2000.
- Ji G W, Li T G, Chang D Z, *et al.* High-efficiency aquaculture technology for famous, special and high-quality aquatic products[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 2000 (in Chinese).
- [14] 董立学, 喻亚丽, 毛涛, 等. 池塘内循环流水养殖斑点叉尾鲷肌肉品质的分析[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(7): 914-924.
- Dong L X, Yu Y L, Mao T, *et al.* Analysis of muscle quality variations of *Ictalurus punctatus* reared in internal-circulation pond aquaculture[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(7): 914-924 (in Chinese).
- [15] 李卓钦, 刘文斌, 田红艳, 等. 不同饲料料型及投喂频率对斑点叉尾鲷幼鱼生长及肌肉品质的影响[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(6): 1260-1270.
- Li Z Q, Liu W B, Tian H Y, *et al.* Effects of different feed types and feeding frequencies on growth and muscle quality of juvenile channel catfish (*Ictalurus punctatus*)[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(6): 1260-1270 (in Chinese).
- [16] 陈亚楠, 李海蓝, 钜晓艳, 等. 暂养环境因子对斑点叉尾鲷肌肉理化性质与质构特性的影响[J]. *肉类研究*, 2021, 35(8): 9-15.
- Chen Y N, Li H L, Zu X Y, *et al.* Effects of environmental factors during temporary rearing on physico-chemical properties and texture characteristics of *Ictalurus punctatus* muscles[J]. *Meat Research*, 2021, 35(8): 9-15 (in Chinese).
- [17] 赵红霞, 陈启明, 黄燕华, 等. 饲料精氨酸水平对黄颡鱼幼鱼生长性能、消化吸收相关指标、免疫功能和抗氧化能力的影响[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(12): 5040-5051.
- Zhao H X, Chen Q M, Huang Y H, *et al.* Effects of dietary arginine level on growth performance, digestive and absorptive related indexes, immune function and antioxidant ability of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(12): 5040-5051 (in Chinese).
- [18] 王子苑, 舒健虹, 袁暘暘, 等. 胍基乙酸的代谢途径及其在动物生产中的应用[J]. *贵州农业科学*, 2021, 49(1): 70-74.
- Wang Z Y, Shu J H, Yuan Y Y, *et al.* Metabolic pathways of guanidine acetic acid and its application in animal production[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2021, 49(1): 70-74 (in Chinese).
- [19] 洪琴, 乔丽红, 唐志刚, 等. 胍基乙酸对建鲤生产性能、体成分及肌肉能量代谢关键酶的影响[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(3): 85-89.
- Fu Q, Qiao L H, Tang Z G, *et al.* Effects of guanidinoacetic acid on growth performance, body composition and key enzymes of energy metabolism of muscle in Jian Carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(3): 85-89 (in Chinese).
- [20] Tan B, Yin Y L, Liu Z Q, *et al.* Dietary l-arginine supplementation differentially regulates expression of lipid-metabolic genes in porcine adipose tissue and skeletal muscle[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2011, 22(5): 441-445.
- [21] 杨航, 徐祺, 谭素梅, 等. 杜仲皮、叶对草鱼生长、肌肉品质及胶原蛋白相关基因表达的影响[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(12): 5827-5838.
- Yang H, Xu Z, Tan S M, *et al.* Influences of dietary *Eucommia* bark and leaf on growth, muscle quality and collagen related genes expression in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(12): 5827-5838 (in Chinese).
- [22] 李乃顺, 冷向军, 李小勤, 等. 绿原酸对草鱼鱼种生长、非特异性免疫和肉质的影响[J]. *水生生物学报*, 2014, 38(4): 619-626.
- Li N S, Leng X J, Li X Q, *et al.* The effects of chlorogenic acid on the growth, non-specific immune index and the meat quality of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38(4): 619-626 (in Chinese).
- [23] 刘云正. 高植物蛋白替代饲料不同水平鱼粉后添加羧

- 脯氨酸对大菱鲂 (*Scophthalmus maximus* L.) 幼鱼生长性能的影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- Liu Y Z. Hydroxyproline supplementation on the performances of high plant protein source based diet in turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [24] 班博, 蒋庆友, 杨泰, 等. 胍基乙酸的生理作用和机理及其在肉鸡、猪生产方面的应用[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(12): 4799-4805.
- Ban B, Jiang Q Y, Yang T, *et al.* Physiological action and mechanism of guanidine acetic acid and its application in broiler chickens and pigs production[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(12): 4799-4805 (in Chinese).
- [25] 耿凯, 李抒柏, 张泰, 等. 胍基乙酸中药制剂对育肥猪血清生化指标及免疫、抗氧化能力的影响[J]. *延边大学学报*, 2021, 43(2): 71-74,84.
- Geng K, Li S B, Zhang T, *et al.* Effects of traditional Chinese medicine preparation of guanidine acetic acid on serum biochemical indexes, immunity and antioxidant capacity in finishing pigs[J]. *Agricultural Science Journal of Yanbian University*, 2021, 43(2): 71-74,84 (in Chinese).
- [26] 王子苑, 陈光吉, 舒健虹, 等. 胍基乙酸对肉牛生长性能、血浆抗氧化和糖代谢指标及血液相关基因表达的影响[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(12): 6853-6863.
- Wang Z Y, Chen G J, Shu J H, *et al.* Effects of guanidine acetic acid on growth performance, plasma antioxidant and glycometabolism indexes and blood related genes expression of beef cattle[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(12): 6853-6863 (in Chinese).
- [27] Zeng Q H, Rahimnejad S, Wang L, *et al.* Effects of guanidinoacetic acid supplementation in all-plant protein diets on growth, antioxidant capacity and muscle energy metabolism of bullfrog *Rana (Lithobates) catesbeiana*[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(2): 748-756.
- [28] 张俊玲, 田耀耀, 马佳, 等. 胍基乙酸的生理功能研究进展[J]. *饲料博览*, 2017(3): 20-22,26.
- Zhang J L, Tian Y Y, Ma J, *et al.* Research progress of guanidinoacetic acid physiological function[J]. *Feed Review*, 2017(3): 20-22,26 (in Chinese).
- [29] 李洁蕾, 郝月, 顾宪红. 胍基乙酸对保育猪生长性能、抗氧化能力和糖代谢关键酶的影响[J]. *动物营养学报*, 2017, 29(10): 3373-3780.
- Li J L, Hao Y, Gu X H. Effects of guanidine acetic acid on growth performance, antioxidant capacity and glycometabolism key enzymes of nursery pigs[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(10): 3373-3780 (in Chinese).

Effect of dietary guanidinoacetic acid on growth, hepatic anti-oxidative capacity and muscle energy metabolism in channel catfish (*Ictalurus punctatus*)

YU Hailuo^{1,2}, XIAO Tiaoyi^{1*}, LUO Yiwen², WANG Hongquan¹, REN Wei²,
YE Lihai², ZHANG Yanling¹

(1. Hunan Engineering Technology Research Center of Featured Aquatic Resources Utilization,

Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Wuhan CP Aquatic Co., Ltd, Wuhan 430070, China)

Abstract: A 8-week feeding trial was conducted to study the effect of dietary guanidinoacetic acid (GAA) on the growth performance, hepatic anti-oxidative capacity and muscle energy metabolism of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). Four isonitrogenous and isocaloric experimental diets with 0 (control diet), 300, 600, and 900 mg/kg GAA (GAA0, GAA300, GAA600, and GAA900) were formulated. The results showed that appropriate dietary GAA could improve the average final body weight (FBW) and weight gain rate (WGR), but not significantly. While the viscerosomatic index (VSI) and intraperitoneal fat ratio (IPF) of experimental *I. punctatus* were significantly affected by dietary GAA levels, with the lowest values in GAA300 group. Based on the quadratic regression analysis of IFP and VSI, the optimal dietary GAA level for *I. punctatus* was 275 mg/kg and 150 mg/kg, respectively. The addition of GAA in diet had no significant effect on moisture content, crude protein, crude fat and ash content of whole fish, as well as the free amino acids and fatty acids in muscle. While the hydroxyproline (HYP) in muscle was significantly increased with the increase of dietary GAA for better muscle quality. Additionally, dietary GAA can improve hepatic anti-oxidative capacity. The total antioxidative capacity (T-AOC) and superoxide dismutases (SOD) activities of fish in GAA300 group were significantly higher than those of the control group. GAA can also improve muscle energy metabolism, and the succinate dehydrogenase (SDH) and pyruvate kinase (PK) activities of fish in GAA300 group were significantly higher than those of the control group. Conclusively, dietary GAA has no significant effect on growth performance and feed utilization of *I. punctatus*. While 150-300 mg/kg GAA in diet can reduce intraperitoneal fat content and viscerosomatic index, and improve hepatic anti-oxidative capacity and muscle energy metabolism of *I. punctatus*.

Key words: *Ictalurus punctatus*; guanidinoacetic acid (GAA); growth; hepatic anti-oxidative capacity; muscle energy metabolism

Corresponding author: XIAO Tiaoyi. E-mail: tyxiao1128@163.com

Funding projects: National Large-scale Freshwater Fish Industry Technology System (CARS-45-48)