

低磷饲料中补充柠檬酸对大口黑鲈生长和营养物质利用率的影响

王璞, 喻一峰, 李小勤, 徐禛, 冀东, 杨品贤, 何明, 冷向军

Effects of citric acid supplementation in low phosphorus diets on growth and nutrient utilization of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)

WANG Pu, YU Yifeng, LI Xiaoqin, XU Zhen, JI Dong, YANG Pinxian, HE Ming, LENG Xiangjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20200302969>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[在低蛋白质饲料中补充必需氨基酸对大口黑鲈生长、体组成和免疫指标的影响](#)

EFFECTS OF SUPPLEMENTING EAA TO LOWER PROTEIN DIETS ON GROWTH, BODY COMPOSITION AND IMMUNOLOGICAL INDEX OF LARGEMOUTH BASS (*MICROPTERUS SALMOIDES*)

水生生物学报. 2014, 38(2): 262 <https://doi.org/10.7541/2013.39>

[低鱼粉饲料中添加微囊氨基酸和蛋白酶对凡纳滨对虾生长、营养物质利用和消化酶活性的影响](#)

Effects of coated amino acids and protease supplementation in low fish meal diets on growth, nutrient utilization and digestive enzyme activities of white shrimp

上海海洋大学学报. 2017, 26(6): 880 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170602073>

[无鱼粉低磷饲料中添加中性蛋白酶和植酸酶对建鲤生长及营养物质利用的影响](#)

EFFECTS OF SUPPLEMENTATION OF NEUTRAL PROTEASE AND NEUTRAL PHYTASE IN FISH MEAL FREE DIET WITH LOW PHOSPHORUS LEVEL ON GROWTH, NUTRIENTS DIGESTIBILITY AND DEPOSITION OF JIAN CARP (*CYPRINUS CARPIO* VAR. JIAN)

水生生物学报. 2017, 41(6): 1291 <https://doi.org/10.7541/2017.160>

[饲料中添加植酸酶对大口黑鲈生长和消化酶活性的影响](#)

Effects of phytase on growth and digestive enzyme activities in largemouth bass *Micropterus salmoides*

大连海洋大学学报. 2010, 25(2): 132 <https://doi.org/10.12024/jsou.2010020132>

[饲料中维生素D₃含量对大口黑鲈生长和抗氧化能力的影响](#)

Effects of dietary vitamin D₃ on the growth and antioxidant capacity of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)

上海海洋大学学报. 2021, 30(1): 94 <https://doi.org/10.12024/jsou.20191202885>

[配合饲料、冰鲜杂鱼对大口黑鲈生长和LPL基因mRNA表达的影响](#)

Effects of formulated diets and frozen trash fish on growth and expression of LPL gene mRNA in largemouth bass *Micropterus salmoides*

大连海洋大学学报. 2014, 29(4): 360 <https://doi.org/10.3969/J.ISSN.2095-1388.2014.04.007>

文章编号: 1674-5566(2021)03-0475-09

DOI: 10.12024/jsou.20200302969

低磷饲料中补充柠檬酸对大口黑鲈生长和营养物质利用率的影响

王璞^{1,2,3}, 喻一峰^{1,2,3}, 李小勤^{1,2,3}, 徐祺^{1,2,3}, 冀东^{1,2,3}, 杨品贤^{1,2,3},
何明^{1,2,3}, 冷向军^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 为了探究饲料中添加柠檬酸对大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 生长、营养物质利用和氮(N)、磷(P)排放的影响, 分别配制磷酸二氢钙(MCP)添加量为 5、10(低磷饲料)、15 g/kg(对照饲料)的 3 组饲料(P5, P10, P15), 在低磷饲料 P5 和 P10 中分别添加 10 g/kg 的柠檬酸, 共 5 组实验饲料。投喂初始体质量为 (16.0 ± 0.16) g 的大口黑鲈 60 d。结果显示, 随着 MCP 添加量的增加, 大口黑鲈增重率、全鱼磷含量、粗蛋白沉积率、磷消化率、椎骨磷和血浆磷含量均显著增加 ($P < 0.05$), N 排放量和全鱼粗脂肪含量显著下降 ($P < 0.05$), 且均在 P15 组达到最佳水平。在 P5 饲料中添加柠檬酸, 显著提高了鱼体增重率 (+5.6%) 和血浆磷含量, 降低了饲料系数 (-0.05) 和 N 排放量 ($P < 0.05$), 达到了和 P10 组基本一致的水平 ($P > 0.05$); 在 P10 饲料中添加柠檬酸, 在数值上改善了生长性能 ($P > 0.05$), 达到了和 P15 组基本一致的水平 ($P > 0.05$)。此外, 在 P5 和 P10 饲料中补充柠檬酸, 均显著提高了磷消化率, 降低了 P 排放量 ($P < 0.05$)。综上所述, 在低磷饲料中添加 10 g/kg 的柠檬酸可改善大口黑鲈生长、提高饲料和磷的利用率。

关键词: 大口黑鲈; 柠檬酸; 磷酸二氢钙; 消化率; 磷利用

中图分类号: S 963 **文献标志码:** A

磷是水产饲料中重要的限制性营养素^[1]。不同鱼类对不同饲料原料中磷的生物利用度相差甚大, 从 0 ~ 81% 不等^[1-2]。植物性原料中含有较多的植酸磷, 但鱼类肠道中缺乏植酸酶, 所以对植物性磷的利用率很低^[3]; 对于动物性原料如鱼粉等, 许多鱼类对其磷的利用率也不高^[4]。为了防止磷缺乏和确保鱼类的快速生长, 通常商业饲料中会补充无机磷, 如磷酸二氢钙。但是, 饲料中大量未被利用的磷不可避免地被排放到养殖水体中, 成为水体富营养化的重要原因^[5-6]。

提高饲料中磷的利用率, 一直是饲料行业关注的热点。目前, 植酸酶已成功地应用于畜禽饲料中^[7-8], 但在水产饲料中, 加工的特殊性(高温)植酸酶难以直接添加到水产饲料中, 而有机酸的应用有望成为解决这一难题的有效途径。研

究^[9-11]表明, 添加有机酸可以提高磷的利用率。有机酸对饲料中磷利用率的促进已在陆生动物得到证明^[12-13]。有报道^[14]称, 补充有机酸可降低消化道 pH, 从而增加植酸盐的溶解度并提高肠道中磷的利用率。另外, 有机酸可通过螯合钙来减少它们之间的拮抗作用而促进磷的吸收^[15]。在有机酸中, 研究较多的有柠檬酸、乳酸、甲酸和苹果酸等, 其中柠檬酸的酸性较强, 且具有一定的抑菌作用^[16]。有关柠檬酸在水产动物上的研究已见于真鲷 (*Pagrus major*)^[17]、虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)^[18] 和大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*)^[19] 等, 总体上来看, 柠檬酸促进了这些鱼类的生长, 并减少了营养物质排放。

大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 肉质鲜美, 无肌间刺, 生长迅速, 具有很高的经济价值, 是我

收稿日期: 2020-03-22 修回日期: 2020-06-04

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0900203); 水产动物遗传育种协同创新基金(D-8006-13-0025)

作者简介: 王璞(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: 626075904@qq.com

通信作者: 冷向军, E-mail: xjleng@shou.edu.cn

国重要的肉食性养殖鱼类,2018年的养殖产量达43.20万t^[20]。在大口黑鲈饲料中是否可以通过添加柠檬酸来提高磷的利用率,从而减少无机磷的添加量?目前尚未见有关报道。因此本研究在不同磷水平饲料中补充柠檬酸,考察对大口黑鲈生长性能、营养物质利用、体组成和氮、磷排放的影响,为大口黑鲈高效环保饲料的研制提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

配制含磷酸二氢钙(MCP)添加量为5、10、15 g/kg的3组饲料(P5,P10,P15),其中P5、P10为

低磷饲料,P15为正对照饲料,在2组低磷饲料(P5,P10)中分别添加10 g/kg的柠檬酸(P5-N和P10-N),共制成5组实验饲料。根据前期研究,正对照饲料添加15 g/kg MCP。此外,饲料中添加0.5 g/kg的三氧化二钇(Y₂O₃)为内源指示剂,用于营养物质表观消化率的测定。各主要原料粉碎过60目筛,逐级混匀,用单螺杆挤压机(SLP-45,中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所研制)制成直径为2 mm的沉性颗粒饲料[制粒温度(85±5)℃],饲料于通风阴凉处晾干,置于4℃冰箱中保存备用。试验饲料组成及营养水平见表1。

表1 饲料组成及营养水平
Tab.1 Composition and nutrient levels of diets

原料 Ingredients ¹⁾	饲料 Diets				
	P5	P10	P15	P5-N	P10-N
鱼粉 Fish meal	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0
大豆浓缩蛋白 Soybean protein concentrate	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
豆粕 Soybean meal	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
面粉 Wheat flour	185.0	180.0	175.0	175.0	170.0
玉米蛋白 Corn gluten meal	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
谷朊粉 Wheat gluten meal	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
啤酒酵母 Beer yeast	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
鱼油 Fish oil	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
豆油 Soybean oil	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
大豆磷脂 Soybean phospholipid	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
多维 Vitamin premix ²⁾	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
多矿 Mineral premix ³⁾	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	5.0	10.0	15.0	5.0	10.0
柠檬酸 Citric acid	0	0	0	10	10
合计 Total	1 000.0	1 000.0	1 000.0	1 000.0	1 000.0
营养水平 Proximate composition					
粗蛋白 Crude protein	466.9	466.2	465.7	465.6	465.3
粗脂肪 Crude lipid	104.5	104.6	104.4	104.7	104.2
灰分 Ash	73.3	73.0	73.1	73.2	72.9
水分 Moisture	71.5	71.6	71.2	71.4	71.5
总磷 Total phosphorus	13.2	14.3	15.4	13.2	14.3

注:1) 饲料原料购于浙江粤海饲料公司,蛋白质含量为鱼粉670 g/kg、大豆浓缩蛋白650 g/kg、豆粕442 g/kg、面粉136 g/kg、玉米蛋白630 g/kg、谷朊粉800 g/kg、啤酒酵母524 g/kg; 2) 维生素预混料(mg or IU/kg diet): 维生素A 10 000IU, 维生素D₃ 3 000 IU, 维生素E 150 IU, 维生素K₃ 12.17 mg, 维生素B₁ 20 mg, 维生素B₂ 20 mg, 维生素B₃ 100 mg, 维生素B₆ 22 mg, 维生素B₁₂ 0.15 mg, 维生素C 1000 mg, 生物素0.6 mg, 叶酸8 mg, 肌醇500 mg; 3) 矿物质预混料(mg/kg diet): 碘0.4 mg, 钴0.1 mg, 铜4mg, 铁150 mg, 锌80 mg, 锰20 mg, 硒0.1 mg, 镁100 mg。

Notes: 1) The ingredients were purchased from Yuehai Feed company (Zhejiang, China), and the protein contents of ingredients are as follow: fish meal 670 g/kg, soybean protein concentrate 650 g/kg, soybean meal 442 g/kg, wheat flour 136 g/kg, corn gluten meal 630 g/kg, wheat gluten meal 800 g/kg, beer yeast 524 g/kg; 2) Vitamin premix (mg or IU/kg diet): vitamin A 10 000IU, vitamin D₃ 3 000 IU, vitamin E 150 IU, vitamin K₃ 12.17 mg, vitamin B₁ 20 mg, vitamin B₂ 20 mg, vitamin B₃ 100 mg, vitamin B₆ 22 mg, vitamin B₁₂ 0.15 mg, vitamin C 1000 mg, Biotin 0.6 mg, Folic acid 8 mg, Inositol 500 mg; 3) Mineral premix (mg/kg diet): iodide 0.4 mg, cobalt 0.1 mg, copper 4 mg, ferrous 150 mg, zinc 80 mg, manganese 20 mg, selenium 0.1 mg, magnesium 100 mg.

1.2 实验鱼和饲养管理

实验用鱼购自浙江省湖州市鲈鱼养殖场。养殖实验在上海海洋大学滨海基地进行。实验鱼用基础饲料暂养驯化 4 周后,挑选体质优良、规格均匀、平均体质量为 (16.0 ± 0.16) g 的大口黑鲈 375 尾进行养殖实验,选择 3 口大小相同的室内水泥池 $(5.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m} \times 1.2 \text{ m})$,每口水泥池中放置 5 口网箱,将实验鱼随机放入网箱中,每网箱 25 尾,每个实验组设 3 个重复。水源来自于 1 口经过暗沉淀的蓄水池,各池每 5 天换水 1 次,每 7 天吸污 1 次,各池的换水量为池水的三分之一,养殖周期为 60 d。实验期间,每天投喂饲料两次(08:00、16:00),日投饲率为鱼体质量的 1.5% ~ 3.0%,根据水温、摄食情况进行调整,各网箱保持基本一致的投饲量。养殖期间,水体溶氧 $>5 \text{ mg/L}$,水温 $26 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$,pH $7.2 \sim 7.9$,氨氮 $<0.2 \text{ mg/L}$,亚硝酸盐 $<0.1 \text{ mg/L}$ 。

1.3 样品采集

实验开始前,取 10 尾鱼作为初始全鱼样本。养殖实验结束后,鱼体饥饿 24 h,统计每网箱鱼尾数并称量。各网箱随机取 2 尾鱼,用于全鱼常规营养成分和磷含量分析。另每网箱随机取 4 尾大口黑鲈测量体质量、体长,尾静脉采血,离心 $10 \text{ min}(3\ 000 \text{ r/min})$ 后取血清,保存于 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱备用。取血后,立即将鲈鱼解剖,称量内脏质量、肝脏质量和肠脂质量,计算肥满度(CF)、脏体比(VSI)、肝体比(HSI)和肠脂比(IPF)。按照 SHAO 等^[21]的方法,将剔除内脏及两侧肌肉的鱼体微波加热 $60 \sim 80 \text{ s}$,去掉头骨,将脊椎骨剥离,用蒸馏水冲洗干净,于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干后在 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存,用于椎骨磷含量测定。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 生长指标与形体指标

$$S(\%) = 100 \times N_1/N_0 \quad (1)$$

$$W_{\text{GR}}(\%) = 100 \times (W_1 - W_0)/W_0 \quad (2)$$

$$R_{\text{FC}} = W_f/(W_1 - W_0) \quad (3)$$

$$I_{\text{HS}}(\%) = 100 \times W_h/W \quad (4)$$

$$I_{\text{VS}}(\%) = 100 \times W_v/W \quad (5)$$

$$F_c(\text{g/cm}^3) = 100 \times W/L^3 \quad (6)$$

式中: S 为存活率; N_1 为终末尾数,尾; N_0 为初始尾数,尾; W_{GR} 为增重率; W_1 为终末体质量,g; W_0 为初始体质量,g; R_{FC} 为饲料系数; W_f 为摄入饲料量; I_{HS} 为肝体比; W_h 为鱼肝脏质量,g; W 为鱼体

质量,g; I_{VS} 为脏体比; W_v 为鱼内脏质量,g; F_c 为肥满度; L 为鱼体长,cm。

1.4.2 营养成分分析

水分含量测定采用 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 常压干燥法,粗蛋白含量测定采用凯氏定氮法(2300 自动凯氏定氮仪,FOSS,瑞典),粗脂肪含量测定采用氯仿-甲醇抽提法,粗灰分测定采用 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 马弗炉高温灼烧法(SXL-1008 马弗炉,上海精宏实验设备有限公司)。钙、磷的含量分别采用钙甲基百里香酚蓝和磷钼酸试剂盒测定,试剂盒购于南京建成生物工程研究所。在上述数据的基础上,计算蛋白质、磷的沉积率和排放量。

$$R_N(\%) = 100 \times (W_1 \times W_{\text{ty}} - W_0 \times W_{\text{oy}})/(W_f \times W_{\text{fy}}) \quad (7)$$

$$E_N = [(R_{\text{FC}} \times W_s - W_z)/W_p] \times 1\ 000 \quad (8)$$

式中: R_N 为营养物质沉积率; W_1 为终末体质量,g; W_0 为初始体质量,g; W_{ty} 为末全鱼营养物质含量,g/kg; W_{oy} 为初全鱼营养物质含量,g/kg; W_f 为摄入饲料量,g; W_{fy} 为饲料营养物质含量,g/kg; E_N 为营养物质排放量,kg/t; R_{FC} 为饵料系数; W_s 为饲料中营养物质质量,g; W_z 为大口黑鲈沉积营养物质的质量,g; W_p 为鱼产量,t。

1.4.3 营养物质表观消化率

养殖实验最后 2 周,为大口黑鲈的排粪高峰期(投饲后 2 h),用虹吸法收集包膜完整粪便, $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下冻存。测定指标包括饲料、粪便中的粗蛋白质、磷、 Y_2O_3 含量,计算蛋白质和磷的表观消化率。钇元素采用等离子体发射光谱法(Vista MPX 瓦里安电感耦合等离子体发射光谱仪,Alo Alto,美国)测定,其他指标的测定方法同 1.4.2 节。

$$C_{\text{ADN}}(\%) = 100 \times (a \times c - b \times d)/(a \times c) \quad (9)$$

$$C_{\text{ADG}}(\%) = 100 \times (a - b)/a \quad (10)$$

式中: C_{ADN} 为营养物质表观消化率; a 为粪便中指示剂的含量; b 为饲料中指示剂的含量; c 为饲料中营养物质的含量; d 为粪便中营养物质的含量; C_{ADG} 为干物质表观消化率。

1.4.4 数据处理

实验数据以平均值 \pm 标准差表示,采用 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析和双因素方差分析,其中差异显著者进行 Duncan 氏多重比较,差异显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 生长性能和形体指标

如表 2 所示,在养殖期间,鲈鱼生长状况良好,各组之间成活率、肥满度、脏体比和肝体比没有显著差异($P > 0.05$)。随着 MCP 添加量的增加,大口黑鲈的末均重和增重率显著提高($P < 0.05$),饲料系数显著下降($P < 0.05$)。在 P5 饲

料中添加 10 g/kg 柠檬酸,增重率提高 5.6%,饲料系数降低 0.05 ($P < 0.05$),基本达到和 P10 组一致的水平($P > 0.05$);在 P10 饲料中添加 10 g/kg 柠檬酸,在数值上提高了增重率($P > 0.05$),达到和 P15 组基本一致的水平($P > 0.05$)。柠檬酸和 MCP 水平的交互作用对饲料系数具有显著影响($P < 0.05$),对其他各项指标没有显著影响($P > 0.05$)。

表 2 摄食含不同磷酸二氢钙和柠檬酸饲料的大口黑鲈生长性能

Tab. 2 Growth performance of largemouth bass fed diets containing various levels of MCP and citric acid

项目 Item	初均质量 IBW/g	末均质量 FBW/g	成活率 Survival/%	增重率 WG/%	饲料系数 FCR	肥满度 CF/ (g/cm ³)	脏体比 VSI/%	肝体比 HSI/%
P5	16.04 ± 0.07	64.10 ± 0.47 ^d	98.67 ± 2.31	300.66 ± 2.93 ^d	1.08 ± 0.01 ^d	2.22 ± 0.12	8.11 ± 0.74	2.86 ± 0.18
P5-N	16.04 ± 0.12	66.69 ± 0.57 ^c	100.00 ± 0.00	316.83 ± 3.54 ^c	1.03 ± 0.01 ^c	2.23 ± 0.04	8.02 ± 0.63	2.92 ± 0.14
P10	15.96 ± 0.14	67.46 ± 0.97 ^{bc}	98.67 ± 2.31	321.60 ± 6.05 ^{bc}	1.01 ± 0.02 ^{bc}	2.22 ± 0.13	7.99 ± 0.71	2.90 ± 0.21
P10-N	15.96 ± 0.16	68.49 ± 0.55 ^b	98.67 ± 2.31	328.08 ± 5.42 ^{ab}	0.99 ± 0.02 ^{ab}	2.23 ± 0.06	8.07 ± 0.53	2.84 ± 0.15
P15	16.04 ± 0.05	70.03 ± 0.65 ^a	98.67 ± 2.31	337.66 ± 4.08 ^a	0.96 ± 0.01 ^a	2.23 ± 0.04	7.96 ± 0.56	2.87 ± 0.10
双因素分析 Two-Way ANOVA								
MCP		0	0.821	0	0	0.892	0.644	0.426
柠檬酸 Citric acid		0.001	0.663	0.001	0.005	0.836	0.559	0.507
交互 Interaction		0.071	0.821	0.071	0.004	0.872	0.881	0.834

注:同列无字母或数据肩标相同字母表示差异不显著($P > 0.05$),不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Notes: In the same column, values with same small letter superscripts or no letter superscripts mean no significant differences ($P > 0.05$), different small letter superscripts mean significant differences ($P < 0.05$).

2.2 全鱼组成以及椎骨磷、血浆磷含量

由表 3 可知,MCP 和柠檬酸水平对大口黑鲈全鱼的水分和粗蛋白没有显著影响($P > 0.05$),随着 MCP 添加量的增加,全鱼粗灰分和全鱼磷均显著增加($P < 0.05$),全鱼粗脂肪含量显著下降($P < 0.05$),而椎骨磷和血浆磷的含量均显著增加($P < 0.05$)。在 P5 和 P10 饲料中添加柠檬酸

在数值上增加了全鱼粗灰分($P > 0.05$)。在 P5 饲料中添加柠檬酸,显著增加了血浆磷水平($P < 0.05$),但在 P10 饲料中补充柠檬酸,对椎骨磷、血浆磷的影响不显著($P > 0.05$)。柠檬酸和 MCP 水平的交互作用对各项指标均没有显著影响($P > 0.05$)。

表 3 摄食含不同磷酸二氢钙和柠檬酸饲料的大口黑鲈全鱼组成以及椎骨磷、血浆磷含量

Tab. 3 Whole body composition, vertebral phosphorus and plasma phosphorus of largemouth bass fed diets containing various levels of MCP and citric acid

项目 Item	水分 Moisture/%	粗蛋白 Crude protein/%	粗脂肪 Crude lipid/%	粗灰分 Ash/%	磷 Phosphorus/%	血浆磷 Plasma phosphorus/ (mmol/L)	椎骨磷(干质量) Vertebral phosphorus/ (%, dry matter)
P5	71.79 ± 0.86	16.64 ± 0.30	6.23 ± 0.14 ^a	3.82 ± 0.05 ^c	0.57 ± 0.01 ^b	2.19 ± 0.09 ^d	9.00 ± 0.12 ^c
P5-N	71.48 ± 1.34	16.55 ± 0.37	6.25 ± 0.39 ^a	3.92 ± 0.02 ^c	0.58 ± 0.03 ^b	2.45 ± 0.08 ^c	9.28 ± 0.27 ^c
P10	71.41 ± 1.37	16.74 ± 0.07	5.95 ± 0.13 ^{ab}	4.06 ± 0.06 ^b	0.61 ± 0.03 ^{ab}	2.52 ± 0.08 ^{bc}	10.19 ± 0.46 ^b
P10-N	71.93 ± 2.21	16.42 ± 0.55	5.94 ± 0.10 ^{ab}	4.13 ± 0.09 ^{ab}	0.59 ± 0.05 ^{ab}	2.61 ± 0.07 ^{ab}	10.26 ± 0.23 ^b
P15	71.09 ± 0.47	16.89 ± 0.19	5.68 ± 0.04 ^b	4.15 ± 0.06 ^a	0.64 ± 0.01 ^a	2.71 ± 0.02 ^a	11.27 ± 0.17 ^a
双因素分析 Two-Way ANOVA							
MCP	0.781	0.287	0.001	0	0.028	0	0
柠檬酸 Citric acid	0.863	0.393	0.957	0.070	0.529	0.002	0.085
交互 Interaction	0.878	0.761	0.988	0.861	0.821	0.080	0.653

注:同列无字母或数据肩标相同字母表示差异不显著($P > 0.05$),不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Notes: In the same column, values with same small letter superscripts or no letter superscripts mean no significant differences ($P > 0.05$), different small letter superscripts mean significant differences ($P < 0.05$).

2.3 营养物质消化率

由表 4 可见, MCP 和柠檬酸水平以及两者之间的交互作用对大口黑鲈干物质消化率、蛋白质消化率和脂肪消化率均没有显著影响 ($P > 0.05$)。随着 MCP 水平的上升, 磷消化率显著上

升 ($P < 0.05$); 在同一 MCP 水平下, 柠檬酸的添加显著增加了大口黑鲈的磷消化率 ($P < 0.05$), 但二者交互作用对磷消化率并没有显著的影响 ($P > 0.05$)。

表 4 摄食含不同磷酸二氢钙和柠檬酸饲料的大口黑鲈营养物质表观消化率
Tab. 4 Apparent digestibility of nutrients of largemouth bass fed diets containing various levels of MCP and citric acid

项目 Item	干物质消化率 ADC of DM	蛋白质消化率 ADC of CP	脂肪消化率 ADC of CL	磷消化率 ADC of Phosphorus	%
P5	78.94 ± 1.92	92.01 ± 0.73	89.03 ± 1.00	48.14 ± 0.14 ^d	
P5-N	80.32 ± 0.44	92.33 ± 0.17	88.67 ± 0.25	50.26 ± 0.97 ^e	
P10	79.64 ± 0.65	92.21 ± 0.25	88.04 ± 0.38	53.53 ± 0.65 ^b	
P10-N	79.22 ± 0.84	92.15 ± 0.32	87.73 ± 0.49	55.80 ± 0.12 ^a	
P15	79.94 ± 1.69	92.15 ± 0.66	87.49 ± 1.06	56.39 ± 2.72 ^a	
双因素分析 Two-Way ANOVA					
MCP	0.971	0.991	0.066	0.000	
柠檬酸 Citric acid	0.907	0.787	0.722	0.030	
交互 Interaction	0.446	0.815	0.817	0.930	

注: 同列无字母或数据肩标相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Notes: In the same column, values with same small letter superscripts or no letter superscripts mean no significant differences ($P > 0.05$), different small letter superscripts mean significant differences ($P < 0.05$).

2.4 营养物质沉积率及 N、P 排放量

由表 5 可见, MCP 和柠檬酸水平对大口黑鲈脂肪沉积率没有显著影响 ($P > 0.05$)。随着 MCP 添加量的增加, 蛋白质沉积率显著增加 ($P < 0.05$), 而磷沉积率在 P10 和 P15 组间无差异 ($P > 0.05$), 均显著高于 P5 组 ($P < 0.05$)。在 P5 饲料中添加柠檬酸显著增加了磷沉积率 ($P <$

0.05)。

提高饲料磷水平显著降低了 N 排放 ($P < 0.05$), 但也增加了 P 排放量 ($P < 0.05$)。在同一饲料磷水平下, 添加柠檬酸显著降低了 P 排放量 ($P < 0.05$), 在 P5 饲料中添加柠檬酸显著降低了 N 排放量 ($P < 0.05$)。柠檬酸和 MCP 的交互作用显著影响了 N 排放量 ($P < 0.05$)。

表 5 摄食含不同磷酸二氢钙和柠檬酸饲料的大口黑鲈营养物质沉积率及 N、P 排放量
Tab. 5 Retention of nutrients and N and P excretion of largemouth bass fed diets containing various levels of MCP and citric acid

项目 Item	蛋白质沉积率 Protein retention/%	脂肪沉积率 Lipid retention/%	磷沉积率 Phosphorus retention/%	N 排放量 N excretion/ (kg/t)	P 排放量 P excretion/ (kg/t)
P5	32.50 ± 0.54 ^c	58.88 ± 1.94	48.04 ± 0.29 ^b	58.62 ± 1.10 ^d	7.66 ± 0.18 ^b
P5-N	33.79 ± 0.75 ^{bc}	61.53 ± 4.97	50.29 ± 0.46 ^a	51.95 ± 0.97 ^c	6.61 ± 0.23 ^a
P10	35.08 ± 0.73 ^b	59.19 ± 1.28	50.10 ± 1.50 ^a	49.13 ± 2.11 ^{bc}	7.90 ± 0.22 ^{bc}
P10-N	35.27 ± 1.81 ^{ab}	60.09 ± 1.66	51.71 ± 0.70 ^a	47.25 ± 2.35 ^b	6.91 ± 0.12 ^a
P15	37.15 ± 0.26 ^a	58.30 ± 0.25	50.39 ± 0.49 ^a	43.44 ± 1.10 ^a	8.26 ± 0.26 ^c
双因素分析 Two-Way ANOVA					
MCP	0.001	0.861	0.015	0	0.009
柠檬酸 Citric acid	0.415	0.259	0.007	0.001	0
交互 Interaction	0.172	0.569	0.583	0.031	0.803

注: 同列无字母或数据肩标相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Notes: In the same column, values with same small letter superscripts or no letter superscripts mean no significant differences ($P > 0.05$), different small letter superscripts mean significant differences ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 柠檬酸对大口黑鲈生长性能的影响

磷在鱼类的生长和发育中起着至关重要的作用。磷缺乏会导致鱼类骨骼畸形并降低饲料效率和生长性能^[22]。随着 MCP 含量的增加,大口黑鲈的增重率显著提高 ($P < 0.05$), 饲料磷水平增加促进了大口黑鲈的生长, 这也说明, 饲料中添加 5、10 g/kg 的 MCP 并不能满足大口黑鲈生长的最大磷需要, 在这 2 组饲料中添加柠檬酸后, 均不同程度提高了大口黑鲈增重率, 降低了饲料系数。类似地, 在低磷饲料中添加柠檬酸也提高了真鲷^[17]对磷的利用率, 并使其生长性能达到与无机磷饲料组一致的水平, 这表明柠檬酸可通过提高磷的利用率而促进鱼类生长。在虹鳟^[23]、罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*)^[24]、异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*)^[25]、建鲤 (*Cyprinus carpio* var. Jian)^[26]、真鲷^[27]、欧洲鳊 (*Huso huso*)^[28]上都有类似报道。

PARTANEN 等^[29]指出, 养分消化率的提高取决于所用有机酸的水平。ZHU 等^[30]研究表明在饲料中添加 2 g/kg 柠檬酸, 显著提高了黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 的增重率并降低了饲料系数; ZHANG 等^[31]发现, 饲料中添加 16 g/kg 柠檬酸可以提高大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 的特定生长率和饲料效率。尚卫敏^[32]发现, 饲料中添加 2.1 g/kg 柠檬酸不仅促进了草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 对多种矿物质的吸收利用, 还增强了草鱼的消化酶活性, 从而促进了生长。柠檬酸是体内能量代谢的中间产物, 摄食后可以直接或间接地参与到代谢中, 为鱼类提供能量^[32]。此外, 柠檬酸具有特殊的芳香气味, 使其具有较好的诱食作用, 可在一定程度上增加摄食量^[33]。本实验也观察到柠檬酸组鲈鱼摄食积极的现象, 但重在考察饲料质量的效果, 故各处理组的投喂量保持基本一致, 如采用自由采食或饱食投喂, 可能柠檬酸的作用效果会更显著。

3.2 柠檬酸对大口黑鲈体成分含量以及营养物质消化吸收的影响

柠檬酸的添加对大口黑鲈全鱼的水分、粗蛋白和粗脂肪含量没有显著影响 ($P > 0.05$)。尚卫敏^[32]对草鱼的研究表明, 添加各种类型的酸化剂没有显著影响全鱼水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰

分含量, 这在罗非鱼^[34]、奥尼罗非鱼 (*Oreochromis aureus* × *O. niloticus*)^[35]、鲤 (*Cyprinus carpio*)^[36]中也有类似报道。柠檬酸对动物体成分的影响主要集中在对矿物质的利用上^[37]。在草鱼^[32]、黄颡鱼^[37]、虹鳟^[38]和大黄鱼^[31]上均有报道, 饲料中添加柠檬酸增加了全鱼的磷含量。饲料中添加 10 g/kg 柠檬酸对于大口黑鲈全鱼磷含量没有显著的影响 ($P > 0.05$), 但在 P5 饲料中添加 10 g/kg 柠檬酸显著提高了磷沉积率 ($P < 0.05$), 这与大口黑鲈生长的改善密切相关。

随着 MCP 水平的上升, 磷消化率显著上升 ($P < 0.05$), 这主要是因为基础饲料的磷消化率低, 而添加的无机磷消化率高, 故总磷的消化率随无机磷添加量的增加而升高, 这种现象在 SHAO 等^[21]对黑鲷 (*Sparus macrocephalus*)、JOKINEN 等^[39]对真白鲑 (*Coregonus lavaretus* L.) 的研究中也有类似报道。此外, 在同一 MCP 水平下, 柠檬酸的添加也显著增加了大口黑鲈的磷消化率 ($P < 0.05$)。DAI 等^[19]对大菱鲆的研究发现, 添加 30 g/kg 的柠檬酸显著增加了磷消化率; 在黄颡鱼的研究中, 添加 2 g/kg 柠檬酸显著提升了饲料磷的表观消化率^[37]; 在豆粕替代部分鱼粉的饲料中, 通过添加 30 g/kg 柠檬酸可以显著增加欧洲鳊对蛋白质和磷的表观消化率^[28]。柠檬酸对磷消化率的提高主要归因于两个相关因素: 柠檬酸对饲料在肠道的酸化作用以及溶解度的影响^[38]; 柠檬酸可以和钙离子发生螯合作用, 从而抑制不溶性植酸钙的形成^[28]。随饲料和 MCP 添加量的增加, 血浆磷和椎骨磷含量显著提高 ($P < 0.05$); 在低磷饲料中添加柠檬酸, 也显著提高了血浆磷水平 ($P < 0.05$), 但对椎骨磷没有显著影响 ($P > 0.05$)。在鲟鱼 (*Acipenser sinensis*)^[40]的研究中, 饲料柠檬酸也显著提高了血液中的磷含量。柠檬酸本身不能降解植酸磷^[41], 但柠檬酸引起的酸化作用可能有助于溶解植酸磷^[42], 也有助于提高鱼粉中矿物质的溶解, 提高磷的利用率^[15], 添加柠檬酸引起血磷增加主要来源于这部分磷利用率的提高。

3.3 柠檬酸对 N、P 排放的影响

提高饲料磷水平显著降低了 N 排放 ($P < 0.05$), 但也显著增加了 P 的排放量 ($P < 0.05$), 这主要是因为磷水平的提高增加了蛋白质沉积率, 故减少了 N 排放, 而磷的沉积率虽也有增加,

但总磷的摄入量增加,使得磷的绝对排放量也有增加。

在黄颡鱼^[37]、真鲷^[27]、虹鳟^[15]、大菱鲆^[19]等鱼的研究中均发现,饲料中补充柠檬酸的可以降低磷排放量。SARKER 等^[27]关于真鲷的研究,饲料中添加 30 g/kg 柠檬酸,使磷的排放量从 7.29 kg/t 降低到 3.58 kg/t;在大菱鲆的饲料中添加 30 g/kg 的柠檬酸也显著降低了磷排放^[19]。在同一饲料磷水平下,添加 10 g/kg 柠檬酸也显著降低了 P 排放量($P < 0.05$),这得益于磷消化率和沉积率的提高,在磷输入没有增加的情况下,意味着磷排放的减少。这表明,在饲料中补充柠檬酸可以在一定程度上减少无机磷的添加量,从而减少磷的排放。

综上,在低磷饲料中添加 10 g/kg 的柠檬酸可改善大口黑鲈生长、提高饲料和磷的利用率。

参考文献:

- [1] 陆静,邵庆均. 水产动物对饲料中磷的利用研究进展[J]. 中国饲料, 2013(1):34-38.
- LU J, SHAO Q J. Research progress on aquatic animals' use of phosphorus in feed[J]. China Feed, 2013(1):34-38.
- [2] 叶军,贺锡勤. 异育银鲫对鱼粉等 11 种饲料中磷的利用率[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(3):233-236.
- YE J, HE X Q. Phosphorus utilization ratio from 11 kinds of feed for gibel carp *Carassius auratus* gibelio fingerling[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1991, 22(3):233-236.
- [3] REDDY N R, SATHE S K, SALUNKHE D K. Phytates in legumes and cereals[J]. Advances in Food Research, 1982, 28:1-92.
- [4] RAVINDRAN V, RAVINDRAN G, SIVALOGAN S. Total and phytate phosphorus contents of various foods and feedstuffs of plant origin[J]. Food Chemistry, 1994, 50(2):133-136.
- [5] COLOSO R M, KING K, FLETCHER J W, et al. Phosphorus utilization in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed practical diets and its consequences on effluent phosphorus levels[J]. Aquaculture, 2003, 220(1/4):801-820.
- [6] HUNG L T, THANH N T, PHAM M A, et al. A comparison of the effect of dietary fungal phytase and dicalcium phosphate supplementation on growth performances, feed and phosphorus utilization of tra catfish juveniles (*Pangasianodon hypophthalmus* Sauvage, 1878)[J]. Aquaculture Nutrition, 2015, 21(1):10-17.
- [7] 包淋斌. 植酸酶在养鸡上的应用[J]. 江西饲料, 2019(2):1-4.
- BAO L B. Application of phytase in chicken breeding[J]. Jiangxi Feed, 2019(2):1-4.
- [8] 李涛,屈平平,王志远. 植酸酶在猪生产中的研究及应用[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2018, 34(6):436-437.
- LI T, QU P P, WANG Z Y. Research and application of phytase in pig production[J]. Chinese Abstracts of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2018, 34(6):436-437.
- [9] BISWAS A K, HOU K, JI S C, et al. Use of soybean meal and phytase for partial replacement of fish meal in the diet of red sea bream, *Pagrus major*[J]. Aquaculture, 2007, 267(1/4):284-291.
- [10] LI X Q, CUI W O, LENG X J. Citric acid substituted the inclusion of inorganic phosphorus in diet of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Aquaculture Research, 2015, 48(3):1089-1098.
- [11] LIEBERT F, PORTZ L. Nutrient utilization of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fed plant based low phosphorus diets supplemented with graded levels of different sources of microbial phytase[J]. Aquaculture, 2005, 248(1/4):111-119.
- [12] BOLING S D, WEBEL D M, MAVOMICHALIS I, et al. The effect of citric acid on phytate-phosphorous utilization in young chicks and pigs[J]. Journal of Animal Science, 2000, 78(3):682-689.
- [13] KEMME P A, JONGBLOED A W, MROZ Z, et al. Digestibility of nutrients in growing-finishing pigs is affected by *Aspergillus niger* phytase, phytate and lactic acid levels; 2. apparent total tract digestibility of phosphorus, calcium and magnesium and ileal degradation of phytic acid[J]. Livestock Production Science, 1999, 58(2):119-127.
- [14] CANIBE N, HOJBERG O, HOJSGAARD S, et al. Feed physical form and formic acid addition to the feed affect the gastrointestinal ecology and growth performance of growing pigs[J]. Journal of Animal Science, 2005, 83(6):1287-1302.
- [15] SUGIURA S H, DONG F M, HARDY R W. Effects of dietary supplements on the availability of minerals in fish meal; preliminary observations[J]. Aquaculture, 1998, 160(3/4):283-303.
- [16] 胡丹,韩庆,徐金石,等. 有机酸在水产养殖中的应用[J]. 现代农业科技, 2018, 727(17):222-224.
- HU D, HAN Q, XU J S, et al. Application of organic acids in aquaculture[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2018, 727(17):222-224.
- [17] HOSSAIN M A, PANDEY A, SATOH S. Effects of organic acids on growth and phosphorus utilization in red sea bream *Pagrus major*[J]. Fisheries Science, 2007, 73(6):1309-1317.
- [18] HERNANDEZ A J, SATOH S, KIRON V. The effect of citric acid supplementation on growth performance, phosphorus absorption and retention in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed a low-fishmeal diet[J]. Ciencia Investigación Agraria, 2013, 40(2):397-406.

- [19] DAI J, LI Y, YANG P, et al. Citric acid as a functional supplement in diets for juvenile turbot, *Scophthalmus maximus*, L.: Effects on phosphorus discharge, growth performance, and intestinal health[J]. *Aquaculture*, 2018, 495:643-653.
- [20] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019:44-54.
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, RPC. China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019:44-54.
- [21] SHAO Q, MA J, XU Z, et al. Dietary phosphorus requirement of juvenile black seabream, *Sparus macrocephalus*[J]. *Aquaculture*, 2008, 277(1/2):92-100.
- [22] National Research Council (NRC). Nutrient requirements of fish and shrimp [M]. Washington: National academies press, 2011:376-381.
- [23] CHENG Z J, HARDY R W, BLAIR M. Effects of supplementing methionine hydroxy analogue in soybean meal and distillers dried grain-based diets on the performance and nutrient retention of rainbow trout [*Oncorhynchus mykiss* (Walbaum)] [J]. *Aquaculture Research*, 2003, 34(14):1303-1310.
- [24] 冷向军, 钟炜, 黄春萍, 等. 饲料中添加柠檬酸对罗非鱼的养殖效果分析[J]. *广西农业生物科学*, 2001, 20(4):262-265.
LENG X J, ZHONG W, HUANG C P, et al. Effects of adding citric acid on the growth of tilapia [J]. *Journal of Guangxi Agricultural and Biology*, 2001, 20(4):262-265.
- [25] 冷向军, 伦锋, 李小勤, 等. 柠檬酸对异育银鲫生长及营养物质消化率的影响[J]. *上海水产大学学报*, 2006, 15(2):178-181.
LENG X J, LUN F, LI X Q, et al. Effects of citric acid on growing performance and nutrients digestibility of allogynogenetic crucian carp [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2006, 15(2):178-181.
- [26] 石泽. 蛋白酶、有机酸对异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*) 和建鲤 (*Cyprinus carpio* var. Jian) 生长、营养物质利用率的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
SHI Z. Effects of dietary protease and organic acids on growth and nutrient utilization of gibel carp, *Carassius auratus gibelio* and Jian carp, *Cyprinus carpio* var. Jian [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [27] SARKER S A, SATOH S, KIRON V. Supplementation of citric acid and amino acid-chelated trace element to develop environment-friendly feed for red sea bream, *Pagrus major* [J]. *Aquaculture*, 2005, 248(1/4):3-11.
- [28] KHAJEPOUR F, HOSSEINI S A. Citric acid improves growth performance and phosphorus digestibility in Beluga (*Huso huso*) fed diets where soybean meal partly replaced fish meal [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2012, 171(1):68-73.
- [29] PARTANEN K H, MROZ Z. Organic acids for performance enhancement in pig diets [J]. *Nutrition Research Reviews*, 1999, 12(1):117.
- [30] ZHU Y, DING Q, CHAN J, et al. The effects of concurrent supplementation of dietary phytase, citric acid and vitamin D₃ on growth and mineral utilization in juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. *Aquaculture*, 2015, 436:143-150.
- [31] ZHANG H, YI L, SUN R, et al. Effects of dietary citric acid on growth performance, mineral status and intestinal digestive enzyme activities of large yellow croaker *Larimichthys crocea* (Richardson, 1846) fed high plant protein diets [J]. *Aquaculture*, 2016, 453:147-153.
- [32] 尚卫敏. 酸化剂、植酸酶对草鱼的营养生理效应研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.
SHANG W M. Effects of acidifier and phytase on the Physiological responses of grass carp, *Ctenopharyngodon idella* [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [33] 还殿宇, 李小勤, 姚文祥, 等. 低鱼粉饲料中添加有机酸 (盐) 对凡纳滨对虾生长性能、消化酶活性和营养物质表观消化率的影响 [J]. *动物营养学报*, 2018, 30(11):255-266.
HUAN D Y, LI X Q, YAO W X, et al. Effects of organic acids (salt) supplementation in low fish meal diet on growth performance, digestive enzyme activities and nutrient apparent digestibility of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(11):255-266.
- [34] 潘庆, 谭永刚, 毕英佐, 等. 柠檬酸对罗非鱼生长、体成分和消化酶活性的影响 [J]. *中国水产科学*, 2004, 11(4):344-348.
PAN Q, TAN Y G, BI Y Z, et al. Effects of citric acid on growth, whole body composition and activities of digestive enzymes in hybrid tilapia *Oreochromis niloticus* × *O. aureus* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004, 11(4):344-348.
- [35] 李海涛, 胡云华, 王银东. 酸化剂对奥尼罗非鱼生长性能和饲料利用的影响 [J]. *南方水产科学*, 2009, 5(5):67-71.
LI H T, HU Y H, WANG Y D. Effects of acidifier on growth performance and feed utilization in hybrid tilapia (*Oreochromis aureus* ♂ × *O. niloticus* ♀) [J]. *South China Fisheries Science*, 2009, 5(5):67-71.
- [36] 王纪亭, 李海涛, 宋憬愚, 等. 复合酸化剂对鲤生长及消化酶活性的影响 [J]. *广东海洋大学学报*, 2009, 29(1):21-25.
WANG J T, LI H T, SONG J Y, et al. Effects of acidifier on growth and digestive enzyme activity of common carp *Cyprinus carpio* [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2009, 29(1):21-25.
- [37] 程年成, 雷文, 冯美惠, 等. 黄颡鱼幼鱼植物性蛋白饲料中添加柠檬酸替代磷酸二氢钠合适水平的研究 [J]. *水产学报*, 2015, 39(7):1015-1023.
CHENG N C, LEI W, FENG M H, et al. Replacement of

- inorganic phosphorus by citric acid for juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* fed with plant-protein based diets[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(7):1015-1023.
- [38] VIELMA J, RUOHONEN K, LALL S P. Supplement citric acid and particle size of fish bonemeal influence the availability of mineral in rainbow trout [J]. Aquaculture Nutrition, 1999, 5(1):65-71.
- [39] JOKINEN E I, VIELMA J, KOSKELA J, et al. The effect of dietary phosphorus deficiency on the immune responses of european whitefish (*Coregonus lavaretus* L.) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2003, 15(2):159-168.
- [40] JONGBLOED A W. Phosphorus in the feeding of pigs[D]. Wageningen; Agriculture University of Wageningen, 1987.
- [41] 丁齐亮. 植酸酶和柠檬酸添加对杂交鲟利用植酸磷的动态影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2015.
- DING Q L. The dynamic effects of phytase and citric acid on dietary phytase-phosphorus utilization in hybrid sturgeon[D]. Wuhan; Huazhong Agricultural University, 2015.
- [42] BARUAH K, SAHU N P, PAL A K, et al. Dietary microbial phytase and citric acid synergistically enhances nutrient digestibility and growth performance of *Labeo rohita* (Hamilton) juveniles at sub-optimal protein level [J]. Aquaculture Research, 2007, 38(2):109-120.

Effects of citric acid supplementation in low phosphorus diets on growth and nutrient utilization of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)

WANG Pu^{1,2,3}, YU Yifeng^{1,2,3}, LI Xiaojin^{1,2,3}, XU Zhen^{1,2,3}, JI Dong^{1,2,3}, YANG Pinxian^{1,2,3}, HE Ming^{1,2,3}, LENG Xiangjun^{1,2,3}

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Collaborative Innovation Centre for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The effects of citric acid supplementation in diets were evaluated on the growth, nutrient utilization, and nitrogen (N) and phosphorus (P) secretion of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Three diets were prepared with the addition of monocalcium phosphate (MCP) at 5, 10 (low-P diets), and 15 g/kg (positive control) (P5, P10, P15), then 10 g/kg of citric acid was added into the two low-P diets of P5 and P10. The five diets were fed to juvenile fish [initial body weight (16.0 ± 0.16) g] for 60 days. The results showed that the weight gain (WG), whole body P, crude protein retention, P digestibility, vertebral P and plasma P significantly increased, and N excretion, whole body crude lipid decreased with the increasing MCP level ($P < 0.05$); P15 group showed the best performance among all the groups. The addition of citric acid in P5 diet significantly increased WG (+5.6%) and serum P level, and reduced FCR (-0.05) and N excretion ($P < 0.05$), which reached the similar levels to the P10 group ($P > 0.05$). The addition of citric acid in P10 diet numerically improved the growth performance with similar levels to the P15 group ($P > 0.05$). The supplementation of citric acid in both P5 and P10 diets significantly promoted P digestibility and reduced P excretion ($P < 0.05$). In summary, the addition in 10 g/kg citric acid in low-P diets can improve the growth and the utilization of P and diet in largemouth bass.

Key words: largemouth bass; citric acid; monocalcium phosphate; digestibility; phosphorus utilization