



磷对生长期草鱼肌肉理化参数、游离氨基酸、呈味核苷酸和游离脂肪酸组成的影响

胡凯^{1,2}, 陈康¹, 冯琳^{1,3,4}, 姜维丹^{1,3,4}, 刘杨^{1,3,4}, 周小秋^{1,3,4*}

(1. 四川农业大学动物营养研究所, 四川成都 611130;

2. 成都农业科技职业学院畜牧兽医学院, 四川成都 611130;

3. 四川农业大学鱼类营养与安全生产四川省高校重点实验室, 四川成都 611130;

4. 四川农业大学动物抗病营养教育部、农业农村部、四川省重点实验室, 四川成都 611130)

摘要: 为探索磷对生长期草鱼肌肉常规营养组成和理化特性, 肌肉中游离氨基酸、呈味核苷酸和游离脂肪酸组成的影响, 实验选择初始体质量为 $[(256.22 \pm 0.60) \text{g}]$ 的健康草鱼 540 尾, 随机分为 6 组, 每组 3 个重复, 分别饲喂有效磷 0.95 (基础饲料组, 未添加)、2.46、3.96、5.68、7.10 和 8.75 g/kg 的饲料 60 d。结果显示, 饲料中适宜水平有效磷显著提高了生长期草鱼肌肉蛋白质、水分、羟脯氨酸、 Σ 氨基酸、 Σ 鲜味氨基酸 (UAAs)、 Σ 甜味氨基酸 (SAAs)、肌苷酸 (IMP)、 Σ 不饱和脂肪酸、 Σ 多不饱和脂肪酸 (PUFA) 含量以及 $\text{pH}_{0\text{h}}$ 和 $\text{pH}_{12\text{h}}$, 而肌肉剪切力、组织蛋白酶 B 和 L 活性、乳酸、饱和脂肪酸 (SFA) 含量显著降低。此外, 当饲料中有效磷水平分别增加到 3.96 和 5.68 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉 IMP 和 Σ 呈味氨基酸 (UAAs+SAAs) 的滋味活性值 (TAV) 分别达到最大值。适宜水平有效磷还显著提高了生长期草鱼肌肉 PUFA/UFA 及 n-3 PUFAs/n-6 PUFAs 比值。研究表明, 适宜水平有效磷提高了生长期草鱼肌肉蛋白质含量、肌肉嫩度、系水力和 pH 值, 增加肌肉呈味氨基酸和核苷酸、PUFA 含量, 进而提高鱼类肌肉品质。

关键词: 草鱼; 磷; 肌肉; 氨基酸; 呈味核苷酸; 脂肪酸

中图分类号: S 963.73

文献标志码: A

如今, 水产品已是人们主要的动物蛋白来源之一^[1]。随着人们对高品质健康生活的不断追求, 对养殖水产品的消费需求已从养殖数量需求、生态需求逐渐过渡到食用质量需求 (安全、营养、口感、风味等)^[2]。营养调控是保障淡水鱼类产品质量的重要技术措施之一^[3]。磷是鱼类健康生长必需的矿物元素。有研究表明, 磷可通过促进生长期草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 肠道、头肾和脾脏等消化吸收器官和免疫器官的生长发育, 增强

其消化吸收能力和疾病抵抗能力, 进而提高草鱼生产性能^[4-5]。肌肉是鱼类营养物质的主要沉积部位和可食用部位, 与鱼类生产性能密切相关。因此, 提高鱼类肌肉品质是保障鱼类食用质量的重要途径。鱼类肌肉品质一般由理化特征和风味决定^[6]。肌肉的理化特征主要包括肌肉各营养物质组成等化学性状及系水力、嫩度和 pH 等物理性状。肌肉风味主要由氨基酸、呈味核苷酸和多不饱和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acid, PUFA)

收稿日期: 2022-03-28 修回日期: 2022-07-30

资助项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项 (2018YFD0900400, 2019YFD0900200); 国家现代农业产业技术体系专项基金 (CARS-45); 四川省科技计划项目 (杰出青年科技人才) (2020JDJQ0043)

第一作者: 胡凯与陈康为共同第一作者。

胡凯 (照片), 从事水生动物营养与饲料科学方面研究, E-mail: linaturehu@126.com

通信作者: 周小秋, 从事水生动物营养与饲料科学方面研究, E-mail: zhouxq@sicau.edu.cn



等风味物质的组成和含量决定^[7]。Wen等^[8]研究表明,磷可提高生长期草鱼肌肉蛋白含量,降低肌肉失水率,进而改善鱼类肌肉理化特征。然而,关于磷对草鱼肌肉氨基酸、呈味核苷酸和PUFA等风味物质的影响仍鲜见报道。

草鱼是我国养殖产量最大的淡水鱼类^[9],本实验拟通过考察磷对生长期草鱼肌肉常规营养组成和理化特性,肌肉中游离氨基酸、呈味核苷酸和游离脂肪酸组成的影响,以期磷在高质量水产养殖中的合理应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 实验饲料

本实验与本实验室前期研究共用同一个动物实验^[4],即实验饲料设计与配制以鱼粉、酪蛋白和明胶为主要蛋白源配成基础饲料,并分别向基础饲料中添加磷酸二氢钠($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, AR)配制6组实验饲料,6组实验饲料中总磷含量分别为2.3(未添加组)、4.0、5.6、7.6、9.2和11.0 g/kg。根据本实验前期研究中的消化实验,6组实验饲料中有效磷含量分别为0.95(未添加)、2.46、3.96、5.68、7.10和8.75 g/kg^[4]。基础饲料组成及营养水平见表1。

1.2 饲养管理

实验在四川农业大学动物营养研究所水生动物营养研究基地进行。草鱼购回经4周驯养后,选择初始体质量为 (256.22 ± 0.60) g的健康草鱼540尾,随机分到18个网箱,每个网箱30尾,分别饲喂不同水平有效磷的实验饲料60 d。饲养管理参照本实验室前期研究建立的管理模式进行,即每天定点投喂4次,实验期间水温和pH分别维持在 $(27 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和 7.2 ± 0.4 ,养殖水体溶解氧和磷含量分别 $> 6 \text{ mg/L}$ 和 $< 0.054 \text{ mg/L}$ ^[4]。

1.3 样品采集

实验结束后,每组随机选择12尾鱼,根据本实验室前期建立方法采集肌肉样品,即称重、体长测量、采血后迅速采集左侧肌肉样品(从鱼体鳃盖后缘至背鳍第1鳍条的侧线以下部分白肌),液氮迅速冷冻后置于超低温冰箱(-80°C)中保存待测^[10-11]。随后,迅速采集右侧肌肉样品(采集部位同左侧),用于pH、剪切力、蒸煮损失测定^[12]。同一指标,测定的肌肉部位相同。

表1 基础饲料配方

Tab. 1 Composition and nutrient content of basal diet

原料 Ingredients	含量/(g/kg) content
鱼粉 fish meal	40.00
酪蛋白 casein	146.00
明胶 gelatin	66.00
大米蛋白粉 rice gluten meal	153.80
α -淀粉粉 α -starch	240.00
玉米淀粉 corn starch	162.20
鱼油 fish oil	29.00
大豆油 soybean oil	9.30
纤维素 cellulose	50.00
维生素预混料 vitamin premix ¹	10.00
矿物元素预混料 mineral premix ²	20.00
磷预混料 monosodium phosphate mixture ³	60.00
氯化胆碱(50%) choline chloride	10.00
DL-蛋氨酸(99%) DL-Met	2.60
L-色氨酸(99%) L-Trp	0.60
乙氧基喹啉(30%) ethoxyquin	0.50
合计 100.00	307.10
营养水平 nutrient levels	307.10
粗蛋白 crude protein ⁴	307.10
粗脂肪 crude lipid ⁴	55.10
n-3 ⁵	10.40
n-6 ⁵	9.60
总磷 total phosphorus ⁶	2.30
有效磷 available phosphorus ⁶	0.95

注: 1. 每千克维生素预混料含: 维生素A醋酸酯(500, 000 IU/g), 2.10 g; VD_3 (500, 000 IU/g), 0.40 g; DL- α 生育酚醋酸酯(50%), 12.58 g; VK_2 (22.9%), 0.83 g; VB_{12} (1%), 0.94 g; D-生物素(2%), 0.75 g; 叶酸(95%), 0.42 g; 硝酸硫胺素(98%), 0.09 g; Vc醋酸酯(95%), 4.31 g; 烟酸(99%), 4.04 g; 肌醇(98%), 19.39 g; D-泛酸钙(98%), 3.85 g; 核黄素(80%), 0.73 g; 维生素B6(98%), 0.62 g; 用玉米淀粉填充至1 kg。2. 每千克矿物质预混料含: $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (31.8% Mn), 2.6590 g; $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (15.0% Mg), 200.0000 g; $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (30.0% Fe), 12.2500 g; $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (34.5% Zn), 8.2460 g; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (25.0% Cu), 0.9560 g; KI(76.9% I), 0.0650 g; Na_2SeO_3 (44.7% Se), 0.0168 g; 用玉米淀粉填充至1 kg。3. 磷预混料: 预混料加入相应水平的磷酸二氢钠调整磷的含量使其与设计值一致,用纤维素作填充载体。4. 粗蛋白和粗脂肪为最终测定值。5. n-3和n-6含量参考文献[5]。6. 有效磷通过消化试验测定^[4]。

Notes: 1. Per kilogram of vitamin premix (g/kg): retinyl acetate (500,000 IU/g), 2.10; cholecalciferol (500,000 IU/g), 0.40; D, L- α -tocopherol acetate (50%), 12.58; menadione (22.9%), 0.83; cyanocobalamin (1%), 0.94; D-biotin (2%), 0.75; folic acid (95%), 0.42; thiamine nitrate (98%), 0.09; ascorhyl acetate (95%), 4.31; niacin (99%), 4.04; meso-inositol (98%), 19.39; calcium-D-pantothenate (98%), 3.85; riboflavin (80%), 0.73; pyridoxine hydrochloride (98%), 0.62. All ingredients were diluted with corn starch to 1 kg. 2. Per kilogram of mineral premix (g/kg): $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (31.8% Mn), 2.6590; $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (15.0% Mg), 200.0000; $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (30.0% Fe), 12.2500; $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (34.5% Zn), 8.2460; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (25.0% Cu), 0.9560; KI (76.9% I), 0.0650; Na_2SeO_3 (44.7% Se), 0.0168. All ingredients were diluted with corn starch to 1 kg. 3. Monosodium phosphate mixture: premix was added to obtain graded levels of phosphorus. 4. Crude protein and crude lipid contents were measured value. 5. n-3 and n-6 contents were calculated according to reference [5]. 6. Total phosphorus content was determined according to the method of the AOAC (2000), the value of available phosphorus was calculated based on the digestibility of basal diet as determined in the digestibility trial according to our previous study^[4].

1.4 肌肉常规成分和肉质分析

肌肉水分、粗蛋白、粗脂肪和乳酸含量, 肌肉剪切力、蒸煮损失、pH 值、肌肉组织蛋白酶 B 和 L 活性参照文献^[11]的方法。肌肉羟脯氨酸含量参照文献^[13]的方法。肌肉游离氨基酸和游离脂肪酸含量测定参照文献^[14]的方法。肌肉呈味核苷酸的测定参照文献^[15]的方法。

1.5 滋味活性值 (taste activity value, TAV) 计算

采用 TAV 法评价单个游离氨基酸对生长期草鱼肌肉滋味的贡献^[16]。TVA 指样品中各呈味物质的测定值与该物质滋味阈值之比, $TAV = \text{滋味组分含量} / \text{滋味组分阈值}$ 。

1.6 数据分析

实验数据采用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 并结合 Duncan 氏法对数据进行多重比较, 数据采用平均值±标准差表示。

2 结果

2.1 磷对生长期草鱼肌肉常规营养成分的影响

生长期草鱼肌肉粗蛋白和水分含量随饲料有效磷水平增加而显著提高 ($P < 0.05$), 当饲料有效磷水平分别增加到 2.46 和 3.96 g/kg 时, 肌肉粗蛋白和水分含量均不再有显著提高 ($P > 0.05$) (表 2)。生长期草鱼肌肉脂肪含量随饲料有效磷水平增加而显著降低 ($P < 0.05$), 当饲料有效磷水平增加到 5.68 g/kg 时, 肌肉脂肪含量不再有显著降低 ($P > 0.05$)。

2.2 磷对生长期草鱼肌肉肉质参数的影响

生长期草鱼肌肉蒸煮损失、组织蛋白酶 B 活性、乳酸含量随饲料有效磷水平增加而显著降低

($P < 0.05$), 当饲料有效磷水平分别增加到 3.96、5.68 和 3.96 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉蒸煮损失、组织蛋白酶 B 活性、乳酸含量不再随饲料有效磷的增加而降低 ($P < 0.05$) (表 3)。饲料有效磷对生长期草鱼肌肉剪切力和组织蛋白酶 L 活性的影响呈先降低后升高的趋势, 当饲料中有效磷水平分别为 3.96 和 5.68 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉剪切力和组织蛋白酶 L 活性达到最小值 ($P < 0.05$), 随后逐渐提高。生长期草鱼肌肉 pH_{0h} 和 pH_{12h} 随饲料有效磷水平增加而显著提高 ($P < 0.05$), 当饲料有效磷水平增加到 8.75 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉 pH_{0h} 达到最大值 ($P < 0.05$), 当饲料有效磷水平增加到 3.96 g/kg 后, 生长期草鱼肌肉 pH_{12h} 不再提高 ($P > 0.05$)。磷对生长期草鱼肌肉羟脯氨酸含量的影响与肌肉剪切力和组织蛋白酶 L 活性的趋势相反, 当饲料有效磷水平达到 5.68 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉羟脯氨酸含量达到最大值 ($P < 0.05$)。

2.3 磷对生长期草鱼肌肉游离氨基酸含量的影响

生长期草鱼肌肉游离鲜味氨基酸天冬氨酸 (aspartic acid, Asp) 和谷氨酸 (glutamic acid, Glu)、甜味氨基酸甘氨酸 (glycine, Gly)、丙氨酸 (alanine, Ala) 和脯氨酸 (proline, Pro)、苦味/必需氨基酸缬氨酸 (valine, Val)、蛋氨酸 (methionine, Met)、亮氨酸 (leucine, Leu)、苯丙氨酸 (phenylalanine, Phe) 和苦味/半必需氨基酸组氨酸 (histidine, His) 含量随饲料有效磷水平增加而显著提高 ($P < 0.05$), 当饲料有效磷水平分别增加到 3.96、3.96、3.96、5.68、3.96、3.96、3.96 和 3.96 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉游离 Glu、Gly、Pro、Val、Met、Leu、Phe 和 His 含量不再随饲料有效磷的增加而提高 ($P > 0.05$), 且 2.46 g/kg 饲料有效磷水平组肌肉游离

表 2 磷对生长期草鱼肌肉常规营养成分的影响

Tab. 2 Effect of phosphorus on muscle composition and flesh quality parameters of young grass carp

(wet weight basis, %)

	饲料有效磷水平/(g/kg) available P in the diet					
	0.95	2.46	3.96	5.68	7.10	8.75
蛋白质 protein	18.41±1.18 ^a	19.25±1.01 ^{ab}	19.77±1.12 ^b	19.96±1.46 ^b	20.69±0.98 ^b	19.91±0.53 ^b
脂肪 lipid	4.82±0.40 ^d	4.34±0.30 ^c	3.84±0.28 ^b	3.41±0.27 ^a	3.61±0.20 ^{ab}	3.29±0.27 ^a
水分 moisture	71.41±2.18 ^a	72.21±1.50 ^{ab}	73.33±1.26 ^{bc}	74.96±1.39 ^c	73.69±1.07 ^{bc}	74.72±0.94 ^c

注: 实验数据用平均值±标准差表示(n=6), 表格中同行肩标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下表同

Notes: Values are means ± SD (n = 6), superscripted different letters in the same row are significantly different ($P < 0.05$). The same below

表 3 磷对生长期草鱼肌肉肉质参数的影响 (湿重, %)

Tab. 3 Effect of phosphorus on muscle composition and flesh quality parameters of young grass carp

	饲料有效磷水平/(g/kg) available P in the diet					
	0.95	2.46	3.96	5.68	7.10	8.75
剪切力/N shear force	1.20±0.05 ^b	1.13±0.10 ^{ab}	1.07±0.06 ^a	1.08±0.08 ^a	1.15±0.06 ^{ab}	1.19±0.05 ^b
蒸煮损失/% cooking loss	13.35±1.08 ^c	10.42±0.83 ^b	9.10±0.89 ^a	9.03±0.62 ^a	9.04±0.32 ^a	9.03±0.60 ^a
pH _{0h}	6.90±0.05 ^a	6.91±0.11 ^a	7.02±0.07 ^{ab}	7.01±0.08 ^{ab}	7.01±0.05 ^{ab}	7.06±0.17 ^b
pH _{12h}	6.29±0.12 ^a	6.30±0.12 ^a	6.46±0.09 ^b	6.45±0.09 ^b	6.45±0.12 ^b	6.48±0.14 ^b
乳酸/(mmol/g protein) lactate	2.60±0.17 ^c	1.95±0.16 ^b	1.58±0.07 ^a	1.44±0.11 ^a	1.50±0.11 ^a	1.48±0.10 ^a
组织蛋白酶B/(U/g protein) cathepsin B	5.03±0.44 ^c	4.47±0.23 ^b	4.17±0.26 ^b	3.68±0.36 ^a	3.78±0.34 ^a	3.61±0.25 ^a
组织蛋白酶L/(U/g protein) cathepsin L	2.42±0.18 ^c	2.22±0.14 ^{bc}	1.93±0.18 ^a	1.89±0.15 ^a	1.97±0.17 ^a	2.02±0.19 ^{ab}
羟脯氨酸/(mg/g tissue) hydroxyproline	0.46±0.04 ^a	0.50±0.04 ^a	0.60±0.05 ^b	0.63±0.05 ^b	0.59±0.06 ^b	0.51±0.05 ^a

注: 实验数据用平均值±标准差表示(n=6), 表格中同行肩标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下表同
Notes: Values are means ± SD (n = 6), superscripted different letters in the same row are significantly different ($P < 0.05$). The same below

His 含量与其他各组差异不显著 ($P > 0.05$); 当饲料有效磷水平分别为 3.96 和 5.68 g/kg 时, 肌肉游离 Asp 和 Ala 含量分别达到最大值, 随后逐渐降低 ($P < 0.05$) (表 4)。生长期草鱼肌肉游离甜味氨基酸苏氨酸 (threonine, Thr) 和丝氨酸 (serine, Ser) 和苦味/半必需氨基酸精氨酸 (arginine, Arg) 含量随饲料有效磷水平增加呈现先降低后提高的趋势 ($P < 0.05$), 当饲料有效磷水平分别为 5.68、5.68 和 7.10 g/kg 时, 肌肉游离 Thr、Ser 和 Arg 含量分别达到最小值, 随后逐渐提高。生长期草鱼肌肉游离苦味/必需氨基酸 Lys 含量随饲料有效磷的增加而降低 ($P < 0.05$), 当饲料有效磷水平增加到 5.68 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉游离 Lys 含量不再随饲料有效磷的增加而降低 ($P > 0.05$)。此外, 磷显著提高生长期草鱼肌肉游离总鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸、呈味氨基酸、必需氨基酸和氨基酸含量 ($P < 0.05$), 当饲料有效磷水平分别增加到 3.96、3.96、2.46、3.96 和 3.96 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉游离总鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸和氨基酸含量不再随饲料有效磷的增加而提高 ($P > 0.05$), 当饲料有效磷水平为 3.96 时, 肌肉游离总必需氨基酸含量达到最大值。磷对生长期草鱼肌肉苦味氨基酸 Ile、Tyr 和总半必需氨基酸含量没有影响 ($P > 0.05$)。

2.4 磷对生长期草鱼肌肉呈味核苷酸含量的影响

结果显示, 磷可显著提高生长期草鱼肌肉肌苷酸 (inosine monophosphate, IMP) 含量 ($P < 0.05$),

当饲料有效磷水平增加到 3.96 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉 IMP 含量达到最大值, 且与 2.46 g/kg 饲料有效磷水平组差异不显著 ($P > 0.05$) (图 1)。

2.5 磷对生长期草鱼肌肉 TAV 的影响

饲喂不同水平有效磷饲料的生长期草鱼肌肉游离鲜味氨基酸 Asp、Glu, 甜味氨基酸 Thr、Ser、Gly、Ala、Pro, 苦味/必需氨基酸 Val、Met、Ile、Leu、Phe 和 Lys, 苦味/半必需氨基酸 Arg 的 TVA 均小于 1 (表 5)。饲喂不同水平有效磷饲料的生长期草鱼肌肉游离苦味/必需氨基酸 His 和肌肉呈味核苷酸 IMP 的 TAV 均大于 1, 且当有效磷水平为 7.10 和 3.96 g/kg 饲料时, 生长期草鱼肌肉游离苦味/必需氨基酸 His 和肌肉呈味核苷酸 IMP 的 TAV 分别达到最大值。此外, 饲喂不同水平有效磷饲料的生长期草鱼肌肉游离总呈味氨基酸 (鲜味氨基酸+甜味氨基酸)TAV 大于 1, 且 TAV 随着饲料有效磷水平的提高而提高, 当饲料有效磷水平增加到 5.68 g/kg 时, 生长期草鱼肌肉总游离呈味氨基酸 TAV 达到最大值。

2.6 磷对生长期草鱼肌肉游离脂肪酸含量的影响

生长期草鱼肌肉中游离脂肪酸棕榈酸 (palmitic acid, C16: 0)、硬脂酸 (stearic acid, C18: 0)、二十二碳酸 (behenic acid, C22: 0)、二十三碳酸 (tricosoic acid, C23: 0)、油酸 (oleic acid, C18:1 n9c) 和饱和脂肪酸 (saturated fatty acid, SFA) 含量随饲料有效磷水平的提高而显著降低 ($P < 0.05$), 当有效磷水平分别为 3.96、3.96、3.96、2.46、2.46

表 4 磷对生长期草鱼肌肉游离氨基酸含量的影响

Tab. 4 Effect of phosphorus on muscle free amino acid contents of young grass carp (mg/100g)

氨基酸 amino acid	饲料有效磷水平/(g/kg) available P in the diet					
	0.95	2.46	3.96	5.68	7.10	8.75
鲜味氨基酸 umami amino acid, UAA						
天冬氨酸 Asp	2.44±0.23 ^a	2.70±0.29 ^a	3.61±0.21 ^c	3.30±0.23 ^b	3.16±0.29 ^b	3.05±0.14 ^b
谷氨酸 Glu	3.08±0.16 ^a	4.24±0.30 ^b	5.29±0.31 ^c	5.53±0.31 ^c	5.32±0.40 ^c	5.58±0.46 ^c
甜味氨基酸 sweetness amino acid, SAA						
苏氨酸 Thr*	18.65±1.80 ^c	18.18±1.48 ^c	16.76±1.29 ^b	14.05±1.23 ^a	14.96±1.30 ^a	16.71±1.05 ^b
丝氨酸 Ser	8.91±0.62 ^d	7.09±0.60 ^c	5.82±0.51 ^b	4.97±0.36 ^a	6.65±0.54 ^c	9.47±0.63 ^d
甘氨酸 Gly	38.91±3.35 ^a	42.16±3.89 ^a	47.22±4.75 ^b	47.83±4.56 ^b	48.53±2.58 ^b	49.30±4.62 ^b
丙氨酸 Ala	36.43±3.40 ^a	42.36±3.86 ^b	49.78±4.15 ^c	53.00±1.90 ^c	45.31±2.67 ^b	42.86±3.09 ^b
脯氨酸 Pro	10.01±0.74 ^a	10.64±1.04 ^a	12.03±1.16 ^b	11.88±1.28 ^b	12.78±0.53 ^b	12.01±1.27 ^b
苦味氨基酸 bitterness amino acid, BAA						
缬氨酸 Val*	16.82±0.48 ^a	21.73±0.97 ^b	23.90±1.87 ^c	26.93±3.01 ^d	26.89±1.00 ^d	27.48±1.47 ^d
蛋氨酸 Met*	11.71±2.16 ^a	21.40±2.03 ^b	26.87±3.48 ^c	26.32±2.36 ^c	26.10±3.91 ^c	26.56±4.03 ^c
异亮氨酸 Ile*	19.56±1.45 ^a	20.54±2.03 ^a	20.06±1.59 ^a	21.38±1.54 ^a	21.35±1.30 ^a	20.74±1.90 ^a
亮氨酸 Leu*	15.69±0.82 ^a	18.84±1.78 ^b	24.42±2.43 ^c	25.05±2.20 ^c	25.37±1.71 ^c	25.15±2.34 ^c
酪氨酸 Tyr	25.04±2.18 ^a	25.82±2.46 ^a	23.92±2.23 ^a	23.27±1.88 ^a	24.14±2.40 ^a	23.91±1.60 ^a
苯丙氨酸 Phe*	20.10±1.32 ^a	25.59±2.46 ^b	31.25±1.95 ^c	30.79±1.61 ^c	31.04±2.15 ^c	31.17±1.28 ^c
赖氨酸 Lys*	37.72±3.54 ^c	35.03±3.30 ^c	27.17±2.04 ^b	19.46±1.22 ^a	19.62±1.59 ^a	20.85±2.08 ^a
组氨酸 His**	150.54±13.34 ^a	158.18±10.93 ^{ab}	166.52±9.37 ^b	168.74±8.03 ^b	169.95±14.20 ^b	168.59±10.25 ^b
精氨酸 Arg**	22.49±1.18 ^d	20.56±1.62 ^c	19.05±1.87 ^c	14.33±1.39 ^b	12.27±1.20 ^a	12.92±1.26 ^{ab}
∑UAAs	5.52±0.30 ^a	6.95±0.46 ^b	8.9±0.29 ^c	8.83±0.37 ^c	8.48±0.56 ^c	8.63±0.50 ^c
∑SAAs	112.9±4.67 ^a	120.44±7.45 ^b	131.6±4.67 ^c	131.72±3.08 ^c	128.22±2.91 ^c	130.34±4.52 ^c
∑BAAs	319.67±15.89 ^a	347.68±16.99 ^b	363.17±11.99 ^b	356.26±11.48 ^b	356.73±16.10 ^b	357.38±8.95 ^b
∑呈味氨基酸 flavor amino acid(UAAs+SAAs)	118.43±4.68 ^a	127.38±7.5 ^b	140.5±4.71 ^c	140.55±3.13 ^c	136.7±2.46 ^c	138.97±4.61 ^c
∑EAAs*	140.25±3.50 ^a	161.31±8.14 ^b	170.44±4.20 ^c	163.98±6.40 ^{bc}	165.33±5.07 ^{bc}	168.66±5.11 ^{bc}
∑HEAAs**	173.04±13.21 ^a	178.74±11.20 ^a	185.57±9.93 ^a	183.07±8.28 ^a	182.23±13.93 ^a	181.51±10.19 ^a
∑AAs***	438.10±11.93 ^a	475.07±18.01 ^b	503.67±15.16 ^c	496.82±8.67 ^c	493.43±16.63 ^c	496.35±10.91 ^c

注: *必需氨基酸, **半必需氨基酸, ***总氨基酸^[6]。下表同

Notes: *essential amino acid (EAA), **semi-essential amino acid (HEAA), ***total amino acid (AA)^[6]. The same below

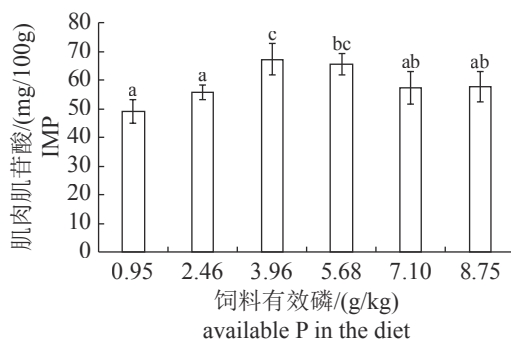


图 1 磷对生长期草鱼肌肉肌苷酸 (IMP) 含量的影响

实验数据用平均值±标准差表示 ($n=6$), 图中同行肩标不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Fig. 1 Effect of phosphorus on muscle inosine monophosphate (IMP) contents of young grass carp

Values are means ± SD ($n = 6$), superscripted different letters are significantly different ($P < 0.05$)

和 3.96 g/kg 时, 其含量不再随着有效磷水平显著降低 ($P > 0.05$) (表 6)。生长期草鱼肌肉游离棕榈油酸 (palmitoleic acid, C16: 1)、反亚油酸 (linoleic acid, C18: 2 n6t)、 α -亚麻酸 (α -linolenic, C18: 3 n-3)、 γ -二十碳三烯酸 (γ -eicosatrienoic acid, C20: 3 n-6)、二十碳五烯酸 (eicosapentaenoic acid, C20: 5 n-3, EPA)、二十二碳六烯酸 (docosahexaenoic acid, C22: 6 n-3, DHA) 以及总的不饱和脂肪酸 (unsaturated fatty acid, UFA)、多不饱和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acid, PUFA)、n-3PUFAs、n-6 PUFAs 含量和 n-3/n-6 PUFAs 比值随着饲料有效磷水平增加而提高, 当饲料有效磷水平分别增加到 2.46、2.46、3.96、3.96、5.68、3.96、3.96、3.96、3.96、3.96 和 5.68 g/kg 时, 其含量不再随饲料有效磷水平的增加而显著提高 ($P > 0.05$)。

表 5 磷对生长期草鱼肌肉滋味活性值 (TAV) 的影响

Tab. 5 Effect of phosphorus on muscle TAV of young grass carp

滋味物质 taste compounds	滋味特征 taste characteristics	阈值/(mg/100 g) threshold	饲料有效磷水平/(g/kg) available P in the diet					
			0.95	2.46	3.96	5.68	7.10	8.75
天冬氨酸 Asp	鲜味/+ umami	100	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
谷氨酸 Glu	鲜味/+ umami	30	0.10	0.14	0.18	0.19	0.18	0.19
苏氨酸 Thr	甜味/+ sweetness	260	0.08	0.07	0.06	0.05	0.06	0.07
丝氨酸 Ser	甜味/+ sweetness	150	0.06	0.05	0.04	0.03	0.05	0.06
甘氨酸 Gly	甜味/+ sweetness	130	0.30	0.33	0.36	0.37	0.38	0.38
丙氨酸 Ala	甜味/+ sweetness	60	0.61	0.71	0.83	0.88	0.75	0.71
脯氨酸 Pro	甜味/+ sweetness	300	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
缬氨酸 Val	苦味/- bitterness	40	0.42	0.54	0.60	0.67	0.67	0.69
蛋氨酸 Met	苦味/- bitterness	30	0.39	0.71	0.90	0.88	0.87	0.89
异亮氨酸 Ile	苦味/- bitterness	90	0.22	0.23	0.22	0.24	0.24	0.23
亮氨酸 Leu	苦味/- bitterness	190	0.08	0.10	0.13	0.14	0.13	0.13
酪氨酸 Tyr	苦味/- bitterness							
苯丙氨酸 Phe	苦味/- bitterness	90	0.22	0.29	0.35	0.34	0.34	0.35
赖氨酸 Lys	苦味/- bitterness	50	0.76	0.70	0.54	0.39	0.39	0.42
组氨酸 His	苦味/- bitterness	20	7.53	7.91	8.33	8.44	8.50	8.43
精氨酸 Arg	苦味/- bitterness	50	0.45	0.41	0.38	0.29	0.25	0.26
肌苷酸 IMP	鲜味/+ umami	25	1.97	2.23	2.69	2.62	2.29	2.31
∑呈味氨基酸 flavor amino acid	鲜味+甜味/+ umami + sweetness		1.20±0.06 ^a	1.35±0.09 ^b	1.55±0.07 ^{cd}	1.60±0.03 ^d	1.48±0.03 ^c	1.48±0.06 ^c

3 讨论

3.1 磷对生长期草鱼肌肉常规营养成分组成和理化特性的影响

磷参与能量代谢、脂类物质吸收、核酸组成, 并影响动物的蛋白质和脂肪合成^[17]。鱼肌肉常规营养成分是评价肌肉品质的重要指标之一^[18]。本实验中, 适宜水平有效磷提高了生长期草鱼肌肉粗蛋白和水分含量, 降低了鱼肌肉粗脂肪含量, 这与在草鱼幼鱼、生长期草鱼和鲤 (*Cyprinus carpio*) 上的研究结果类似^[8, 19-20]。本实验中, 与最适组相比, 磷缺乏组草鱼肌肉脂肪含量显著提高, 与在黑线鲳 (*Melanogrammus aeglefinus*) 和澳洲银鲈 (*Bidyanus bidyanus*) 上的研究结果一致^[21-22]。而肌肉脂肪含量可影响肌肉色泽和风味^[2], 过多的脂肪沉积会导致鱼肌肉硬度下降, 肉质松软并产生油腻感^[23-24]。磷降低鱼肌肉粗脂肪含量可能与促进 ATP 驱动的脂肪酸活化, 进而促进鱼类肌肉

脂肪酸进入线粒体 β-氧化有关^[23]。

肌肉硬度可用剪切力来反映^[25]。此外, 剪切力也与鱼肌肉嫩度呈负相关关系^[26]。本实验结果显示, 适宜水平有效磷降低了生长期草鱼肌肉剪切力, 进而改善了肌肉嫩度。Moreno 等^[27]认为, 鱼肌肉嫩度与胶原蛋白的合成有关, 而羟脯氨酸含量可间接反映鱼肌肉胶原蛋白含量。本实验结果表明, 适宜水平有效磷提高了生长期草鱼肌肉羟脯氨酸含量。系水力是反映肌肉品质的另一重要指标, 直接影响肌肉的嫩度、多汁性和色泽^[28]。肌肉系水力大小可用蒸煮损失来衡量, 蒸煮损失与肌肉系水力呈负相关关系^[29]。本实验中, 适宜水平有效磷降低了生长期草鱼肌肉蒸煮损失率, 提高了鱼类肌肉系水力。鱼肌肉系水力的提高可能与组织蛋白酶活性的改变有关。有研究认为, 组织蛋白酶 B 及 L 参与了鱼肌原纤维蛋白及肌浆蛋白的降解, 从而破坏了肌纤维微结构的完整, 进而导致鱼肌肉系水力下降^[30-31]。本实验中, 适

表 6 磷对生长期草鱼肌肉游离脂肪酸含量的影响

Tab. 6 Effect of phosphorus on muscle free fatty acid of young grass carp (%)

脂肪酸 free fatty acid	饲料有效磷水平/(g/kg) available P in the diet					
	0.95	2.46	3.96	5.68	7.10	8.75
肉豆蔻酸 myristic acid (C14:0)	2.00±0.05 ^a	1.93±0.09 ^a	1.87±0.06 ^a	1.88±0.01 ^a	1.87±0.09 ^a	1.89±0.07 ^a
十五碳酸 pentadecanoic acid (C15: 0)	0.18±0.00 ^a	0.18±0.01 ^a	0.17±0.01 ^a	0.17±0.01 ^a	0.17±0.01 ^a	0.17±0.01 ^a
棕榈酸 palmitic acid (C16: 0)	22.58±0.73 ^a	21.48±0.45 ^b	20.43±0.54 ^a	19.96±0.16 ^a	19.49±0.51 ^a	19.55±0.38 ^a
十七碳酸 paturic acid (C17: 0)	0.13±0.01 ^a	0.13±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a
硬脂酸 stearic acid (C18: 0)	3.85±0.08 ^c	3.58±0.23 ^{bc}	3.36±0.16 ^{ab}	3.23±0.13 ^a	3.42±0.11 ^a	3.50±0.21 ^a
花生酸 arachidic acid (C20: 0)	0.13±0.01 ^a	0.13±0.01 ^a	0.14±0.00 ^a	0.14±0.01 ^a	0.14±0.01 ^a	0.14±0.00 ^a
二十一碳酸 Heneicosanoic acid (C21:0)	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a
二十二碳酸 behenic acid (C22: 0)	0.58±0.03 ^c	0.50±0.06 ^b	0.46±0.03 ^{ab}	0.42±0.03 ^a	0.42±0.02 ^a	0.42±0.04 ^a
二十三碳酸 tricosoic acid (C23: 0)	0.90±0.09 ^b	0.82±0.06 ^{ab}	0.74±0.07 ^a	0.75±0.07 ^a	0.74±0.05 ^a	0.74±0.07 ^a
肉豆蔻油酸 myristoleic acid (C14:1)	0.11±0.00 ^a	0.10±0.01 ^a	0.10±0.00 ^a	0.10±0.01 ^a	0.10±0.01 ^a	0.09±0.01 ^a
棕榈油酸 palmitoleic acid (C16: 1)	8.11±0.23 ^a	8.49±0.07 ^{ab}	8.89±0.51 ^b	8.94±0.62 ^b	8.96±0.46 ^b	8.90±0.20 ^b
十七烯酸 heptadecenoic acid (C17: 1)	0.18±0.02 ^a	0.19±0.01 ^a	0.19±0.01 ^a	0.20±0.01 ^a	0.20±0.01 ^a	0.20±0.00 ^a
反油酸 elaidic acid (C18:1 n9t)	0.19±0.02 ^a	0.20±0.01 ^a	0.22±0.01 ^a	0.22±0.00 ^a	0.22±0.01 ^a	0.21±0.01 ^a
油酸 oleic acid (C18:1 n9c)	38.13±1.22 ^b	37.21±0.59 ^{ab}	36.08±0.79 ^a	36.18±0.59 ^a	36.35±1.46 ^a	36.34±0.81 ^a
花生一烯酸 arachidonic acid (C20:1 n9)	1.31±0.14 ^a	1.33±0.06 ^a	1.36±0.03 ^a	1.35±0.01 ^a	1.34±0.03 ^a	1.38±0.02 ^a
二十二碳烯酸 (C22: 1n-9)docosenoic acid	0.04±0.01 ^a	0.05±0.00 ^a	0.05±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a
二十四碳烯酸 nervonic acid (C24: 1n-9)	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a
亚油酸 linoleic acid (C18:2 n6c)	0.02±0.00 ^a	0.02±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a
反亚油酸 linolelaidic acid (C18:2 n6t)	8.84±0.01 ^a	9.30±0.27 ^{ab}	10.02±0.30 ^b	9.94±0.23 ^b	10.01±0.54 ^b	9.96±0.64 ^b
二十碳二烯酸 decosahedanoic acid (C20: 2)	0.39±0.01 ^a	0.39±0.01 ^a	0.39±0.02 ^a	0.41±0.02 ^a	0.41±0.01 ^a	0.40±0.02 ^a
二十二碳二烯酸 docosadienoic acid (C22: 2)	0.21±0.02 ^a	0.23±0.02 ^a	0.23±0.02 ^a	0.25±0.02 ^a	0.25±0.01 ^a	0.25±0.02 ^a
γ-亚麻酸γ-linolenic (C18: 3 n-6)	0.13±0.00 ^a	0.12±0.00 ^a	0.12±0.02 ^a	0.13±0.01 ^a	0.13±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a
α-亚麻酸α-linolenic (C18: 3 n-3)	0.62±0.04 ^a	0.70±0.06 ^b	0.78±0.05 ^{bc}	0.82±0.02 ^c	0.81±0.05 ^c	0.79±0.03 ^c
γ-二十碳三烯酸 γ-eicosatrienoic acid (C20: 3 n-6)	0.39±0.00 ^a	0.43±0.02 ^{ab}	0.48±0.01 ^{bc}	0.50±0.03 ^{bc}	0.50±0.05 ^c	0.48±0.06 ^{bc}
α-二十碳三烯酸 α-eicosatrienoic acid (C20: 3 n-3)	0.05±0.01 ^a	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a	0.06±0.00 ^a	0.06±0.00 ^a	0.06±0.01 ^a
二十碳五烯酸 eicosapentaenoic acid(EPA, C20: 5 n-3)	1.06±0.03 ^a	1.23±0.05 ^b	1.28±0.04 ^b	1.45±0.02 ^c	1.42±0.02 ^c	1.42±0.06 ^c
二十二碳六烯酸 docosahexaenoic acid(DHA, C22: 6 n-3)	9.75±0.69 ^a	11.13±0.74 ^b	12.36±0.34 ^c	12.64±0.74 ^c	12.72±0.39 ^c	12.73±0.16 ^c
饱和脂肪酸 SFAs	30.42±0.93 ^c	28.80±0.14 ^b	27.34±0.49 ^a	26.73±0.08 ^a	26.42±0.58 ^a	26.57±0.30 ^a
不饱和脂肪酸 UFAs	69.58±0.93 ^a	71.20±0.14 ^b	72.66±0.49 ^c	73.27±0.08 ^c	73.58±0.58 ^c	73.43±0.30 ^c
单不饱和脂肪酸 MUFAs	48.11±1.51 ^a	47.59±0.71 ^a	46.91±1.16 ^a	47.06±0.85 ^a	47.25±1.05 ^a	47.20±1.00 ^a
多不饱和脂肪酸 PUFAs	21.48±0.66 ^b	23.61±0.61 ^b	25.75±0.74 ^c	26.21±0.80 ^c	26.33±0.51 ^c	26.23±0.73 ^c
Σn-3	11.49±0.67 ^a	13.12±0.84 ^b	14.48±0.42 ^c	14.97±0.77 ^c	15.01±0.35 ^c	14.99±0.17 ^c
Σn-6	9.38±0.02 ^a	9.88±0.25 ^a	10.65±0.31 ^b	10.59±0.25 ^b	10.67±0.53 ^b	10.58±0.60 ^b
PUFA/SFA	0.71±0.01 ^a	0.82±0.02 ^b	0.94±0.02 ^c	0.98±0.03 ^d	1.00±0.01 ^d	0.99±0.02 ^d
n-3/n-6	1.22±0.07 ^a	1.33±0.12 ^{ab}	1.36±0.02 ^{ab}	1.41±0.08 ^b	1.41±0.08 ^b	1.42±0.08 ^b

宜水平有效磷降低了生长期草鱼肌肉组织蛋白酶 B 和 L 活性。pH 是影响鱼肌肉品质的另一重要参数, pH 低于适宜范围不仅提高鱼肌肉组织降解速率, 还可引起肌肉蛋白质凝集和肌肉收缩, 缩小

肌肉水分贮存空间, 加速肌肉水分流失^[32-33]。本实验发现, 适宜水平有效磷降低了生长期草鱼肌肉乳酸含量、组织蛋白酶 B 和 L 活性, 提高了肌肉 pH₀ 和 pH₁₂。鱼肌肉 pH 的下降可能与肌糖原

进行无氧呼吸后导致乳酸积累有关。吕宏波等^[6]研究认为,尼罗罗非鱼肌肉乳酸含量与肌肉 pH 呈负相关关系。本实验结果显示,适宜水平有效磷降低了生长期草鱼肌肉乳酸积累,这可能与磷参与能量代谢促进了 ATP 生成,进而减少了肌肉细胞的无氧呼吸作用有关^[34]。

3.2 磷对生长期草鱼肌肉风味物质组成及含量的影响

风味品质是鱼肌肉品质的另一重要指标,主要由鱼肌肉风味前体物质的种类和含量决定,包括挥发性气味成分和非挥发性滋味成分^[35-36]。游离氨基酸是鱼肉非挥发性滋味的主要呈味物质和风味前体物质,其本身带有独特的味道,根据氨基酸的呈味特性,将其分为甜味、鲜味、苦味等不同呈味特性氨基酸^[7,37]。本实验中,适宜水平有效磷不仅提高了生长期草鱼肌肉总氨基酸和必需氨基酸含量,增加了生长期草鱼肌肉营养价值,而且还提高了生长期草鱼肌肉总鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量。此外,适宜水平有效磷也提高了生长期草鱼总苦味氨基酸含量。这些苦味氨基酸中的 Val、Met、Ile、Leu、Phe、Lys 为人体所需的必需氨基酸。呈味核苷酸是鱼肌肉的另一类非挥发性滋味成分,能够与鲜味氨基酸、无机离子等产生协同增鲜的作用^[16]。IMP 是鱼肌肉主要的鲜味核苷酸之一^[38]。本实验中,适宜水平有效磷增加了生长期草鱼肌肉 IMP 含量。肌肉是生成和消耗三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)的场所。屠宰后,肌肉中 ATP 会进行不可逆的降解,IMP 为 ATP 的关键降解产物之一^[16]。Sugiura 等^[34]研究表明,磷可促进鱼类 ATP 的产生。这些结果表明,磷可能通过促进鱼肌肉 ATP 生成,进而提高了鱼肌肉 IMP 含量。另一方面,由于呈味物质在鱼肌肉中的呈味特性不仅取决于各呈味物质的组成和含量,还与呈味物质的滋味阈值有关^[38]。因此,本实验分析了呈味物质对鱼肌肉滋味的贡献度,并采用 TAV 来进行评估, TAV>1,说明该呈味物质对样品的整体滋味有重要贡献^[39]。本实验结果显示,虽然除 His 和 IMP 外,各处理组所有游离氨基酸的含量均低于其滋味阈值,但磷对生长期草鱼肌肉游离氨基酸 TAV 存在显著影响。适宜水平有效磷提高了生长期草鱼肌肉游离鲜味氨基酸 Asp、Glu,甜味氨基酸 Thr、Ser、Gly、Ala、Pro,苦味/必需氨基酸 Val、Met、Ile、Leu、

Phe 和 Lys 以及 IMP 的 TAV。实验进一步分析了草鱼肌肉游离鲜味和甜味呈味氨基酸的总 TAV,这些呈味氨基酸的总 TAV>1,且 5.68 g/kg 有效磷水平组的总 TAV 最高。呈味阈值的苦味氨基酸,可增强其他氨基酸的鲜味和甜味,本实验结果表明,适宜水平有效磷提高了生长期草鱼肌肉游离 His 的 TAV。His 是一种重要的苦味氨基酸,被认为与鱼肉特征风味密切相关,和其他风味物质共存时可增强鱼肉的呈味效果,形成特有的肉香特征。有研究表明,草鱼肌肉本身含有较高的 His^[40-41]。这些结果说明,磷可能通过提高鱼肌肉呈味氨基酸和呈味核苷酸含量,改善鱼肌肉滋味,丰富草鱼的特征肉香。另一方面,游离氨基酸与风味核苷酸可以独立存在,呈现特有的风味,也可以相互作用促进鱼肉的鲜甜味^[7]。翁丽萍^[42]报道,游离氨基酸与其他风味物质的互作可提升鱼肉的風味,如 Glu 与 5'-核苷酸可以协同提升鱼肉的鲜味。这些结果说明,磷可能通过提高呈味氨基酸和呈味核苷酸含量,增强鱼肌肉中鲜味氨基酸和呈味核苷酸 IMP 的协同作用。

PUFA 是另一重要的风味前体物质^[43]。本实验在生长期草鱼肌肉中共检测出 27 种脂肪酸,其中,饱和脂肪酸(SFA)9 种,单不饱和脂肪酸(MUFA)8 种,PUFA 10 种。棕榈酸(C16:0)和油酸(C18:1 n9c)含量分别在生长期草鱼肌肉游离 SFA 和 MUFA 中占比较高,与在草鱼幼鱼上的研究结果一致^[44]。Alasalvar 等^[45]认为,棕榈酸(C16:0)和油酸(C18:1)分别是鱼类肌肉中主要的 SFA 和 MUFA,说明这 2 种脂肪酸可能参与形成草鱼特有的挥发性气味。此外,肌肉中 PUFA 与 SFA 的比值越大,肌肉品质越好^[46]。欧洲卫生机构建议人类所食用肉类的 PUFA/SFA 应高于 0.45^[47]。本实验结果发现,适宜水平有效磷降低了草鱼肌肉游离 SFA 含量,而增加了游离 MUFA 和 PUFA 含量,进而提高了 PUFA/SFA 比值,说明磷可改善鱼肌肉游离脂肪酸组成比例。另一方面,PUFA 中的 α -亚麻酸、二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸等 n-3 PUFAs 参与人体生物膜构建、调节炎症及免疫反应、促进神经系统发育,且较高的 n-3/n-6 PUFAs 比值在防治心血管疾病、抗癌和抗炎等方面具有积极作用^[48]。本实验结果显示,适宜水平有效磷提高了生长期草鱼肌肉游离 ALA、EPA 和 DHA n-3 PUFAs 含量,增加了 n-3/n-6 PUFAs 比值。磷提高鱼肌肉 PUFA 含量可能与磷促进了长链脂肪酸的合成及去饱和,消耗了鱼肌肉中游

离 SFA 有关。Tocher^[43] 认为, 棕榈酸 (C16: 0) 和油酸 (18: 1) 参与鱼类长链脂肪酸 (C > 18) 的生成和去饱和过程。本实验结果也显示, 适宜水平有效磷降低了生长期草鱼肌肉棕榈酸 (C16:0) 和油酸 (C18:1) 含量。 α -亚麻酸 (C18: 3n) 是 EPA 和 DHA 生成的前体物质^[49], 适宜水平有效磷提高了肌肉中 α -亚麻酸 (C18: 3n) 的含量, 表明 EPA 和 DHA 含量的升高可能与升高的 α -亚麻酸有一定联系, 作用机制有待进一步研究。

4 结论

本实验表明, 适宜水平有效磷提高了生长期草鱼 (254.56~898.23 g) 肌肉蛋白质含量、肌肉嫩度、系水力和 pH 值, 增加肌肉呈味氨基酸和核苷酸、PUFA 含量, 进而提高鱼类肌肉品质。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese).
- [2] 叶元土. 提升淡水养殖鱼类食用质量的技术集成与创新[J]. 饲料工业, 2022, 43(10): 1-11.
Ye Y T. Technology integration and innovation to improve the edible quality of freshwater cultured fish[J]. *Feed Industry*, 2022, 43(10): 1-11 (in Chinese).
- [3] Tilami S K, Sampels S. Nutritional value of fish: Lipids, proteins, vitamins, and minerals[J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2018, 26(2): 243-253.
- [4] Chen K, Jiang W D, Wu P, *et al.* Effect of dietary phosphorus deficiency on the growth, immune function and structural integrity of head kidney, spleen and skin in young grass carp (*Ctenopharyngodon Idella*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 63: 103-126.
- [5] Chen K, Zhou X Q, Jiang W D, *et al.* Impaired intestinal immune barrier and physical barrier function by phosphorus deficiency: regulation of TOR, NF- κ B, MLCK, JNK and Nrf2 signalling in grass carp (*Ctenopharyngodon Idella*) after infection with *Aeromonas hydrophila*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 74: 175-189.
- [6] 吕宏波, 张志勇, 张美玲, 等. 水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼生长、营养组成和肉质的影响[J]. 水产学报, 2020, 44(7): 1156-1172.
Lv H B, Zhang Z Y, Zhang M L, *et al.* Influences of water salinity and dietary fat content on growth, nutrient composition and fillet quality of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(7): 1156-1172 (in Chinese).
- [7] Kawai M, Okiyama A, Ueda Y. Taste enhancements between various amino acids and IMP[J]. *Chemical Senses*, 2002, 27(8): 739-745.
- [8] Wen J, Jiang W D, Feng L, *et al.* The influence of graded levels of available phosphorus on growth performance, muscle antioxidant and flesh quality of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Animal Nutrition*, 2015, 1(2): 77-84.
- [9] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Areas, National Aquatic Technology Promotion Station, Chinese Fisheries Society. China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese).
- [10] Xie N B, Feng L, Liu Y, *et al.* Growth, body composition, intestinal enzyme activities and microflora of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var.) fed graded levels of dietary phosphorus[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, 17(6): 645-656.
- [11] Wang B, Liu Y, Feng L, *et al.* Effects of dietary arginine supplementation on growth performance, flesh quality, muscle antioxidant capacity and antioxidant-related signalling molecule expression in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Food Chemistry*, 2015, 167: 91-99.
- [12] Wu Y P, Feng L, Jiang W D, *et al.* Influence of dietary zinc on muscle composition, flesh quality and muscle antioxidant status of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella* Val.) [J]. *Aquaculture Research*, 2015, 46(10): 2360-2373.
- [13] Zhao H F, Feng L, Jiang W D, *et al.* Flesh shear force, cooking loss, muscle antioxidant status and relative expression of signaling molecules (Nrf2, Keap1, TOR, and CK2) and their target genes in young grass carp

- (*Ctenopharyngodon idella*) muscle fed with graded levels of choline[J]. *PLoS One*, 2015, 10(11): e0142915.
- [14] Jiang W D, Wu P, Tang R J, *et al.* Nutritive values, flavor amino acids, healthcare fatty acids and flesh quality improved by manganese referring to up-regulating the antioxidant capacity and signaling molecules TOR and Nrf2 in the muscle of fish[J]. *Food Research International*, 2016, 89: 670-678.
- [15] 刘敬科. 鲢鱼风味特征及热历史对鲢鱼风味的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- Liu J K. Flavor character of silver carp and the influence of heating history on the silver carp flavor[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009 (in Chinese).
- [16] Liu C S, Meng F T, Tang X M, *et al.* Comparison of nonvolatile taste active compounds of wild and cultured mud crab *Scylla paramamosain*[J]. *Fisheries Science*, 2018, 84(5): 897-907.
- [17] Lall S P, Kaushik S J. Nutrition and metabolism of minerals in fish[J]. *Animals*, 2021, 11(9): 2711.
- [18] Periago M J, Ayala M D, López-Albors O, *et al.* Muscle cellularity and flesh quality of wild and farmed sea bass, *Dicentrarchus labrax* L.[J]. *Aquaculture*, 2005, 249(1-4): 175-188.
- [19] Liang J J, Liu Y J, Tian L X, *et al.* Dietary available phosphorus requirement of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, 18(2): 181-188.
- [20] Takeuchi M, Nakazoe J I. Effect of dietary phosphorus on lipid content and its composition in carp[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1981, 47(3): 347-352.
- [21] Roy P K, Lall S P. Dietary phosphorus requirement of juvenile haddock (*Melanogrammus aeglefinus* L.)[J]. *Aquaculture*, 2003, 221(1-4): 451-468.
- [22] Yang S D, Lin T S, Liu F G, *et al.* Influence of dietary phosphorus levels on growth, metabolic response and body composition of juvenile silver perch (*Bidyanus bidyanus*)[J]. *Aquaculture*, 2006, 253(1-4): 592-601.
- [23] 唐宏刚. 鱼蛋白水解物对大黄鱼生长代谢、肌肉品质、免疫及抗氧化性能的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- Tang H G. Effects of fish protein hydrolystate on growth, metabolism, flesh quality, immunity and antioxidant in large yellow croaker[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008 (in Chinese).
- [24] Thakur D P, Morioka K, Itoh Y, *et al.* Influence of muscle biochemical constituents on the meat texture of cultured yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) at different anatomical locations[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2002, 82(13): 1541-1550.
- [25] Johnston I A, Li X J, Vieira V L A, *et al.* Muscle and flesh quality traits in wild and farmed Atlantic salmon[J]. *Aquaculture*, 2006, 256(1-4): 323-336.
- [26] He H J, Wu D, Sun D W. Potential of hyperspectral imaging combined with chemometric analysis for assessing and visualising tenderness distribution in raw farmed salmon fillets[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 126: 156-164.
- [27] Moreno H M, Montero M P, Gómez-Guillén M C, *et al.* Collagen characteristics of farmed Atlantic salmon with firm and soft fillet texture[J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(2): 678-685.
- [28] Zhang M H, Wang D Y, Xu X L, *et al.* Comparative proteomic analysis of proteins associated with water holding capacity in goose muscles[J]. *Food Research International*, 2019, 116: 354-361.
- [29] Skipnes D, Østby M L, Hendrickx M E. A method for characterising cook loss and water holding capacity in heat treated cod (*Gadus morhua*) muscle[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(4): 1078-1085.
- [30] 李来好, 孙蕾蕾, 黄卉, 等. 冰藏奥尼罗非鱼片组织蛋白酶与品质变化的相关性分析[J]. 水产学报, 2015, 39(4): 589-597.
- Li L H, Sun L L, Huang H, *et al.* Correlation analysis of cathepsins and quality variations of tilapia (*Oreochromis niloticus* ♂ × *O. aureus* ♀) fillets during iced storage[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(4): 589-597 (in Chinese).
- [31] 卢涵. -20 °C下鲮鱼肉中组织蛋白酶B及L对其肌纤维微结构及持水力的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(5): 122-129.
- Lu H. Effects of cathepsin B and L on myofibrillar microstructure and water-holding capacity of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets stored at -20°C[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, 38(5): 122-129 (in Chinese).
- [32] Diesbourg L, Swatland H J, Millman B M. X-ray diffraction measurements of postmortem changes in the myofilament lattice of pork[J]. *Journal of Animal Science*, 1988, 66(4): 1048-1054.

- [33] Bahuaud D, Mørkøre T, Østbye T K, *et al.* Muscle structure responses and lysosomal cathepsins B and L in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) *pre-* and *post-rigor* fillets exposed to short and long-term crowding stress[J]. *Food Chemistry*, 2010, 118(3): 602-615.
- [34] Sugiura S H, Ferraris R P. Dietary phosphorus-responsive genes in the intestine, pyloric ceca, and kidney of rainbow trout[J]. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2004, 287(3): R541-R550.
- [35] Mabuchi R, Ishimaru A, Tanaka M, *et al.* Metabolic profiling of fish meat by GC-MS analysis, and correlations with taste attributes obtained using an electronic tongue[J]. *Metabolites*, 2019, 9(1): 1.
- [36] 岳琪琪, 刘文, 韩千慧, 等. 保鲜处理对冷鲜鲟鱼肉特征性风味成分的影响[J]. *水产学报*, 2020, 44(12): 2076-2086.
- Yue Q Q, Liu W, Han Q H, *et al.* Effects of preservation treatment on the characteristic flavor composition of chilled sturgeon meat[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(12): 2076-2086 (in Chinese).
- [37] Kim J S, Shahidi F, Heu M S. Characteristics of salt-fermented sauces from shrimp processing byproducts[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(3): 784-792.
- [38] Kong Y, Zhang L L, Sun Y, *et al.* Determination of the free amino acid, organic acid, and nucleotide in commercial vinegars[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(5): 1116-1123.
- [39] 李婉君. 南极磷虾与南美白对虾营养与滋味成分比较 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- Li W J. Nutritional and flavor components analysis of Antarctic krill and white shrimp[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015 (in Chinese).
- [40] Wu P, Zhang L, Jiang W D, *et al.* Dietary vitamin a improved the flesh quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) in relation to the enhanced antioxidant capacity through Nrf2/Keap 1a signaling pathway[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(1): 148.
- [41] 徐祺, 杨航, 梁高杨, 等. 黄芩素对草鱼生长性能、血清抗氧化指标和肌肉品质的影响[J]. *水产学报*, 2019, 43(11): 2383-2393.
- Xu Z, Yang H, Liang G Y, *et al.* Effects of dietary baicalein on growth, serum anti-oxidation indicators and flesh quality of *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(11): 2383-2393 (in Chinese).
- [42] 翁丽萍. 养殖大黄鱼和野生大黄鱼风味的研究 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012.
- Weng L P. Research on flavor of breeding large yellow croaker and wild large yellow croaker[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012 (in Chinese).
- [43] Tocher D R. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish[J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2003, 11(2): 107-184.
- [44] Ji H, Li J, Liu P. Regulation of growth performance and lipid metabolism by dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2011, 159(1): 49-56.
- [45] Alasalvar C, Taylor K D A, Zubcov E, *et al.* Differentiation of cultured and wild sea bass (*Dicentrarchus labrax*): Total lipid content, fatty acid and trace mineral composition[J]. *Food Chemistry*, 2002, 79(2): 145-150.
- [46] Wood J D, Enser M, Fisher A V, *et al.* Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review[J]. *Meat Science*, 2008, 78(4): 343-358.
- [47] British Department of Health. Nutritional aspects of cardiovascular diseases: Report on health and social subjects n°46[R]. London: H. M. Stationery Office, 1994.
- [48] Djuricic I, Calder P C. Beneficial outcomes of omega-6 and omega-3 polyunsaturated fatty acids on human health: An update for 2021[J]. *Nutrients*, 2021, 13(7): 2421.
- [49] Schmitz G, Ecker J. The opposing effects of n-3 and n-6 fatty acids[J]. *Progress in Lipid Research*, 2008, 47(2): 147-155.

Effect of dietary phosphorus on physicochemical properties, composition of free amino acid, flavor nucleotide and free fatty acid in muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)

HU Kai^{1,2}, CHEN Kang¹, FENG Lin^{1,3,4}, JIANG Weidan^{1,3,4}, LIU Yang^{1,3,4}, ZHOU Xiaoqiu^{1,3,4*}

(1. Animal Nutrition Institute, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. Department of Animal and Veterinary Science, Chengdu Agricultural College, Chengdu 611130, China;

3. Fish Nutrition and Safety Production, University Key Laboratory of Sichuan Province,

Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

4. Key Laboratory of Animal Disease-Resistance Nutrition, Ministry of Education, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China)

Abstract: To assess the effect of dietary phosphorus on physicochemical properties, composition of free amino acid (AA), flavor nucleotide and free fatty acid in muscle of grass carp, a 60 d growth trial by feeding graded levels of available phosphorus (0.95-8.75 g/kg diet) was conducted. Results demonstrated that optimal available phosphorus levels increased the protein and hydroxyproline contents and pH value, while decreased the contents of lipid and lactate, cooking loss, shear force, and cathepsin activity to improve fish muscle physicochemical characteristics. In addition, optimal available phosphorus levels increased the contents of total essential amino acids (EAAs), umami taste AAs, sweet taste AAs and inosine monophosphate (IMP) contents enhancing fish muscle flavor. In addition, when the available phosphorus level in the feed was increased to 3.96 and 5.68 g/kg, the taste activity value (TAV) of IMP and total taste amino acids (UAAs+SAAs) reached the maximum values in fish muscle, respectively. And optimal available phosphorus levels increased muscle total polyunsaturated fatty acids (PUFAs) contents and the fatty acid ratio of PUFAs/saturated fatty acids (SFAs), and n-3/n-6. In conclusion, appropriate available phosphorus supplementation improved flesh quality, which might be in part attributed to the enhancement of tenderness, water holding capacity and pH, and increase of flavor amino acid, nucleotide and PUFAs contents in muscle of fish.

Key words: *Ctenopharyngodon idella*; phosphorus; muscle; amino acid; flavor nucleotide; fatty acid

Corresponding author: ZHOU Xiaoqiu. E-mail: zhouxq@sicau.edu.cn

Funding projects: National Key R&D Program of China (2018YFD0900400, 2019YFD0900200); The Earmarked Fund for CARS (CARS-45); Outstanding Youth Science Foundation of Sichuan Province (2020JDJQ0043).