

4种饲料养殖小龙虾营养分析及品质评价

杜雪莉¹, 张凌晶^{2,3}, 杨欣怡^{1*}, 宋军¹, 李德祥¹, 刘蕾¹, 尹刘益¹,
刘均¹, 陈俊利¹, 张凤枰^{1,4}

(1. 四川威尔检测技术股份有限公司, 成都 610041; 2. 集美大学海洋食品与生物工程学院, 厦门 361021;
3. 水产品深加工技术国家地方联合工程研究中心, 厦门 361021; 4. 通威股份有限公司,
水产畜禽营养与健康养殖农业部重点实验室, 成都 610041)

摘要: **目的** 研究湖北公安常见4种小龙虾养殖饲料对小龙虾营养价值的影响, 并评价其品质。 **方法** 采用国内外通用的营养测试方法测定饲料及养殖小龙虾的肌肉营养成分。 **结果** 小龙虾肌肉水分含量在79.0%~79.3%之间, 粗蛋白质含量在19.07%~19.53%之间, 粗脂肪和灰分含量分别为0.20%和1.30%。4种饲料养殖的小龙虾肌肉均检测出17种氨基酸, 4种虾肌肉中的鲜味氨基酸(delicious amino acid, DAA)含量在8.26%~8.71%之间, DAA含量占总氨基酸(total amino acid, TAA)比值约在44.00%左右; 4种虾肉的必需氨基酸(essential amino acid, EAA)含量在7.59%~7.77%之间, EAA占总氨基酸的比值约40%, 4种虾肉DAA和EAA之间无显著性差异; 氨基酸的组成比例均符合联合国粮农组织/世界卫生组织(Food and Agriculture Organization/World Health Organization, FAO/WHO)标准; 4种饲料养殖的小龙虾肌肉均检测出22种脂肪酸, 总不饱和脂肪酸与总饱和脂肪酸的比值(TUFA/TSFA)为2.50, 脂肪质量较高; 4种虾肉的二十碳五烯酸(eicosapentenoic acid, EPA)含量约在12.80%~14.50%之间, 不饱和脂肪酸(docosahexaenoic acid, DHA)含量约在4.11%~4.67%之间, EPA+DHA含量约为18.0%左右; 小龙虾肌肉中富含钾、磷、锌等元素。 **结论** 湖北公安常见4种饲料对养殖小龙虾肌肉的营养成分无明显差异影响, 4种养殖小龙虾的饲料均能满足小龙虾的生长需求。

关键词: 小龙虾; 肌肉; 营养成分; 饲料; 品质评价

Nutritional composition analysis and quality evaluation of *Procambarus clarkii* fed with 4 kinds of feeds

DU Xue-Li¹, ZHANG Ling-Jing^{2,3}, YANG Xin-Yi^{1*}, SONG Jun¹, LI De-Xiang¹, LIU Lei¹,
YIN Liu-Yi¹, LIU Jun¹, CHEN Jun-Li¹, ZHANG Feng-Ping^{1,4}

(1. Sichuan Wiltest Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. College of Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 3. National and Local Joint Engineering Research Center of Processing Technology for Aquatic Products, Xiamen 361021, China; 4. Key Laboratory of Aquatic, Livestock, Poultry Nutrition and Healthy Culturing, Ministry of Agriculture, Tongwei Co. Ltd., Chengdu 610041, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of the nutritional value of *Procambarus clarkii* farmed by 4 kinds of

基金项目: 四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(2019JDTD0025)、国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-49)

Fund: Supported by the Special Plan Project of Sichuan Youth Scientific and Technological Innovation Research Team (2019JDTD0025), and the National Modern Agricultural Industry Technology System Support Project (CARS-49)

*通信作者: 杨欣怡, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水产品营养与安全。E-mail: yangxinyime@163.com

*Corresponding author: YANG Xin-Yi, Master, Engineer, Sichuan Wiltest Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China. E-mail: yangxinyime@163.com

feeds at Gonggan, Hubei Province, and evaluate their quality. **Methods** The nutritional components of feed and cultured crayfish muscle were determined by general nutritional test methods at home and abroad. **Results** The moisture content of crayfish muscle was 79.0%-79.3%, the crude protein content was 19.07%-19.53%, and the crude fat and ash content were 0.20% and 1.30% respectively. Seventeen kinds of amino acids were detected in the muscle of crayfish fed with 4 kinds of feed. The content of delicious amino acids (DAA) in the muscle of 4 kinds of shrimp ranged from 8.26% to 8.71%, and the ratio of DAA content to total amino acids (TAA) was about 44.00%; the content of essential amino acid (EAA) in 4 kinds of shrimp meat was 7.59%-7.77%, and the ratio of EAA to total amino acid was about 40%, there was no significant difference between DAA and EAA; the composition of amino acids met the Food and Agriculture Organization/World Health Organization (FAO/WHO) standard; 22 kinds of fatty acids were detected in the muscle of crayfish cultured with 4 kinds of feeds. The ratio of unsaturated fatty acid to saturated fatty acid was 2.50, and the fat quality was high; the content of eicosapentaenoic acid (EPA) in 4 kinds of shrimp meat was about 12.80%-14.50%, the content of unsaturated fatty acid (DHA) was about 4.11%-4.67%, and the content of EPA+DHA was about 18.0%; crayfish muscle was rich in potassium, phosphorus, zinc and other elements. **Conclusion** The nutritional compositions of *Procambarus clarkii* muscle farmed by 4 kinds of feeds at Gonggan, Hubei Province have no significant difference. The 4 kinds of feeds of cultured crayfish can meet the growth needs of crayfish.

KEY WORDS: *Procambarus clarkii*; muscle; nutritional composition; feed; quality evaluation

0 引言

小龙虾(*Procambarus clarkii*)又叫淡水小龙虾和红螯虾, 学名为克氏原螯虾。它是世界范围内重要的水产资源^[1], 广泛养殖于我国湖北、江苏、湖南、安徽、江西等多个省市。渔业统计数据显示, 2017—2020 年, 我国养殖总产量由 100 万 t 增产至 239.37 万 t, 增长率高达 139%, 经济总值由 2600 亿元增加至 3448.46 亿元, 增长 32%^[2-3], 未来小龙虾产业的增值空间较大。

小龙虾是高蛋白, 低脂肪, 低胆固醇, 富含钙、磷、铁、锌、碘、硒等微量元素及维生素的优质水产食品。随着人们生活质量的日益提高和消费观念的转变, 消费者越来越重视虾肉的口感、营养、安全性等因素^[4], 这使得养殖端研究如何通过养殖饲料来提高养殖虾肉的营养价值。目前关于小龙虾的研究主要是侧重于养殖方式^[5-6]、冷藏品质研究^[7]、遗传生物学研究^[8]和元素检测^[9-10]等研究。关于营养方面的研究, 国内有研究不同养殖方式/模式、不同品种小龙虾和不同产地小龙虾肌肉营养成分评价^[4,6,11-13]。王广军等^[4]研究了澳洲淡水龙虾和克氏原螯虾肌肉的营养差异, 结果表明澳洲淡水龙虾的出肉率较高, 克氏原螯虾的脂肪酸组成丰富。周剑等^[13]研究池塘和稻田养殖模式下小龙虾的肌肉和肝脏营养成分差异, 结果表明两种养殖模式下除了水分和粗灰分外无明显差异。而对于不同饲料饲养小龙虾肌肉中营养成分及评价至今鲜有报道。

本研究结合湖北公安常见的 4 种小龙虾的养殖饲料, 对小龙虾肌肉常规营养成分、氨基酸、脂肪酸等进行分析评价, 旨在充实小龙虾养殖学, 并为小龙虾的营养需求、饲料配方等方面提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 主要材料

小龙虾: 购买于湖北公安养殖区域。4 种实验用饲料为现场采集, 包括海大虾料、正大虾料、通威虾料、惠泽虾料。编号随机为饲料 1、饲料 2、饲料 3、饲料 4。

17 种氨基酸混合标准溶液(2.5 $\mu\text{mol/mL}$, 德国 Sykam 公司); 37 种脂肪酸甲酯混合标准溶液(上海安谱实验科技股份有限公司); $\text{BF}_3\text{-CH}_3\text{OH}$ 溶液(13%~15%, 美国 Sigma-Aldrich 公司); 正己烷、甲醇(色谱纯)、氢氧化钾、盐酸、硝酸(分析纯, 成都市科隆化学品有限公司); Milli-Q Gradient 超纯水(美国 Millipore 公司); N_2 、He(纯度 99.999%, 成都侨源气体有限公司)。

1.2 主要仪器与设备

FOSS 2300 定氮仪(丹麦福斯有限公司); SZC-101 脂肪测定仪(上海纤检仪器有限公司); Precellys 24 多功能样品均质器(法国 Bertin Technologies 公司); L-8900 氨基酸全自动分析仪(日本日立株式会社日立制作所); 7890A-5975C 气相色谱质谱联用仪、NIST 08 MS 数据库(美国安捷伦科技公司); CP224S、CP225D 电子天平(量程 220 g, 德国赛多力斯集团); 101A-2B 型电热鼓风干燥箱(北京中兴伟业仪器有限公司); SX2-8-10 箱式电阻炉(上海实验仪器厂)。

1.3 实验材料

1.3.1 样品制备

每种养殖模式随机捞取 15 kg 左右小龙虾(规格平均为 30 g/只), 每种样品总数约 500 尾, 随机抽取 30 尾活虾, 测体长、体高、螯夹臂展、螯夹重量、体重等。

剥虾肉,均质后,将每组虾肉样品分为 2 份,分别用于营养成分、氨基酸、脂肪酸测定和冷冻低温保存备用。

1.3.2 实验方法

以现场采集饲料样品为分析样品:采用 GB/T 6432—2018《饲料中粗蛋白测定方法》测定蛋白质含量,采用 GB/T 6433—2006《饲料中粗脂肪的测定》酸水解-索氏抽提法测定粗脂肪,采用 GB/T 6435—2014《饲料中水分及其他挥发性物质含量的测定》测定水分,采用 GB/T 6438—2007《饲料中灰分的测定》测定灰分。

以鲜虾肉为分析样品,采用 GB/T 18654.9—2008《养殖鱼类种质检验第 9 部分:含肉率测定》测定肌肉含肉率,采用 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》测定蛋白质,采用 GB/T 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》测定脂肪,采用 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》测定灰分;采用 GB/T 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》测定水分,采用 GB/T 5009.124—2016《食品中氨基酸的测定》测定氨基酸;采用 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》第三法归一化法测定脂肪酸。

1.4 营养价值评价

虾肉氨基酸营养价值评价按照联合国粮农组织/世界卫生组织(Food and Agriculture Organization/World Health Organization, FAO/WHO)建议的氨基酸评分模式^[14]和中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所提出的鸡蛋蛋白质的氨基酸评分模式^[15],按照公式(1)~(4)计算氨基酸评分(amino acid score, AAS)、化学评分(chemical score, CS)和必需氨基酸指数(essential amino acid index, EAAI)。

某种氨基酸含量(mg/g)=[实验样品某种氨基酸含量(% , 鲜样)/实验样品粗蛋白含量(% , 鲜样)]×6.25×1000 (1)

$$EAAI = \sqrt[n]{\frac{\text{Lys}(t)}{\text{Lys}(s)} \times 100 \times \frac{\text{Met}(t)}{\text{Met}(s)} \times 100 \times \dots \times \frac{\text{Val}(t)}{\text{Val}(s)} \times 100} (2)$$

$$AAS = \frac{\text{待测蛋白质中某种必需氨基酸含量}/\%}{\text{FAO / WHO评分模式中某种必需氨基酸含量}/\%} (3)$$

$$CS = \frac{\text{待测蛋白质中某种必需氨基酸含量}/\%}{\text{鸡蛋蛋白质中某种必需氨基酸含量}/\%} (4)$$

式中: n 为比较的氨基酸个数; t 为试样蛋白质必需氨基酸含量, mg/g; s 为全鸡蛋蛋白质的必需氨基酸含量, mg/g。

1.5 数据处理

每个指标均重复测定 3 次,用 WPS 2010 进行实验数据处理;采用 SPSS 20.0 软件,单因素方差分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)对数据进行分析,分析结果用平均值±标准偏差表示, $P < 0.05$ 为数据之间存在显著性分析。

2 结果与分析

2.1 养殖小龙虾饲料及小龙虾肌肉一般营养分析

2.1.1 养殖小龙虾饲料一般营养分析

4 种小龙虾饲料的水分检测值分别为 8.07%±0.06%、

7.40%±0.04%、8.40%±0.04%、7.27%±0.15%; 4 种龙虾饲料灰分检测值分别为 16.41%±0.05%、15.43%±0.40%、15.27%±0.20%、15.88%±0.08%; 饲料 3 的水分与其他 3 种饲料存在显著差异($P < 0.05$)。饲料 1 的灰分与其他 3 种饲料存在显著差异($P < 0.05$)。4 种饲料的蛋白质含量分别为: 29.35%±0.09%、30.89%±0.05%、29.82%±0.11%和 31.06%±0.04%。HUBBARD 等^[16]研究得出小龙虾配合饲料的最适蛋白质水平为 30%, 4 种配合饲料蛋白质含量均在 30%左右,均能满足生长需求。4 种饲料的脂肪含量分别为 5.80%±0.05%、4.42%±0.04%、3.43%±0.25%和 4.42%±0.08%。JOVER 等^[17]的研究数据得出,小龙虾配合饲料的最佳脂肪水平为 6%,仅饲料 1 脂肪含量与 6%相接近。

2.1.2 养殖小龙虾饲料一般营养分析

由表 1 知, 4 种小龙虾肌肉一般营养成分含量结果表明: 虾(饲料 1)蛋白质含量最高,与其他 3 种饲料养殖的小龙虾肌肉存在显著性差异($P < 0.05$),含量为 19.53%; 4 种饲料养殖条件下水分、粗脂肪和灰分无显著性差异($P > 0.05$)。小龙虾肌肉的脂肪含量为 0.20%,远低于周剑等^[13]稻田养殖模式下脂肪含量 1.03%。

表 1 4 种饲料养殖小龙虾肌肉的常规营养成分
Table 1 General nutritional components of muscle of *Procambarus clarkii* fed with 4 kinds of feeds

种类	水分/%	蛋白质/%	脂肪/%	灰分/%
虾(饲料 1)	79.0±0.16 ^a	19.53±0.06 ^a	0.20±0.01 ^a	1.30±0.11 ^a
虾(饲料 2)	79.3±0.09 ^a	19.09±0.09 ^a	0.20±0.01 ^a	1.30±0.15 ^a
虾(饲料 3)	79.2±0.15 ^a	19.23±0.08 ^b	0.20±0.01 ^a	1.30±0.14 ^a
虾(饲料 4)	79.2±0.04 ^a	19.07±0.08 ^a	0.20±0.01 ^a	1.30±0.16 ^a

注: 同列中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 相同小写字母表示无显著性差异($P > 0.05$)。

结合 4 种饲料中常规营养成分来看, 饲料 1 的蛋白质含量最低,但其养殖的虾肌肉蛋白质含量却最高,这可能是饲料 1 的蛋白源有利于虾的吸收; 4 种小龙虾肌肉的蛋白质含量均在 19.00%左右,高于王广军等^[4](17.22%)和徐晨等^[12](15.88%)的小龙虾的粗蛋白含量,这可能与 4 种饲料中蛋白质配比存在一定关联; 4 种虾肉粗脂肪含量很低,可能与养殖饲料的粗脂肪含量不高有关,这也证实了 JOVER 等^[17]的研究结果。饵料中较低的脂肪含量即可更好地满足克氏原螯虾的生长,这与陈秀梅等^[18]研究的克氏原螯虾生长对脂肪需求低一致。

2.2 氨基酸组成、含量及其营养学评价

从表 2 知, 4 种饲料均检出 17 种氨基酸,均以谷氨酸含量最高,天门冬氨酸次之。虾类中 10 种必需氨基酸除了人体必需的 8 种之外,还包括精氨酸和组氨酸^[19]。4 种饲料含量较高的 3 种必需氨基酸含量为精氨酸、赖氨酸和亮氨酸。研究表明: 小龙虾对赖氨酸的最适需求量为 1.66%,精氨酸的需求量为 2.04%^[20],蛋氨酸适宜需求量为 0.94%^[21]; 4 种饲料的赖氨酸均能满足要求,精氨酸的含量仅饲料 1 (2.26%)能够满

足最适需求量, 4 种饲料的蛋氨酸含量均不满足要求。4 种饲料的必需氨基酸含量依次为: 饲料 1 (11.69%)>饲料 4 (11.41%)>饲料 2 (11.17%)>饲料 3 (10.84%), 4 种饲料中必需氨基酸均占总氨基酸总量的 42.67%~48.95%。

由表 3 知, 4 种小龙虾肌肉与饲料中均检出 17 种氨基酸, 这说明小龙虾的氨基酸种类与养殖的饲料存在一定的相似, 可能是养殖的饲料紧密地影响着养殖的虾肉^[22]。4 种小龙虾肌肉中氨基酸含量以谷氨酸最高, 精氨酸次之, 天门冬氨酸第三, 这与王广军等^[4]和徐晨等^[12]的研究一致; 虾肉味道鲜美的主要原因之一是虾肌肉中 3 种鲜味氨基酸含量较高(谷氨酸、丙氨酸和天门冬氨酸), 小龙虾肌肉中的鲜味氨基酸含量约在 8.26%~8.71%左右, DAA/TAA 比值约 44.10%~44.85%, 虾肉的 DAA/TAA 略高于李赵嘉等^[11]的研究结果; 结合饲料中 DAA 和 DAA/TAA 比值可以看出, 饲料中 DAA 的含量与饲料养殖后小龙虾肌肉的 DAA 含量

之间无关联。虾肌肉中 DAA/TAA 比值均高于养殖鲈鱼的 43.18%^[23]和养殖金鲳鱼的 38.51%^[24], 说明小龙虾肌肉鲜美, 这一结果与日本沼虾和秀丽白虾的研究结果一致^[25]。

除色氨酸在水解过程中遭破坏未检出, 小龙虾肉中检出人体所需要的其他必需氨基酸。例如苏氨酸通过降低脂肪在肝脏中的含量, 从而提高人体的免疫能力^[26]; 缬氨酸、蛋氨酸分别能辅治肝脏功能性衰竭和提高人体的抗氧化能力^[27-28]。赖氨酸是人类和哺乳动物的必需氨基酸之一, 有促进食欲、提高消化能力的作用, 还能提高机体对钙的吸收、促进生长发育, 机体不能自身合成, 必须从食物中补充^[15]。4 种小龙虾 EAA/TAA 为 40.00%左右, EAA/NEAA 在 66%左右, 这与丁建英等^[29]的研究结果一致。也符合 1973 年 FAO/WHO 提出的 EAA/TAA 和 EAA/NEAA 的理想值(40%左右、60%以上)评价标准^[30], 这 4 种饲料养殖的小龙虾肌肉可为人们提供氨基酸和必需氨基酸的食物来源。

表 2 4 种饲料的氨基酸组成及含量

Table 2 Amino acid compositions and content of 4 kinds of feeds

种类	饲料 1/(g/100 g)	饲料 2/(g/100 g)	饲料 3/(g/100 g)	饲料 4/(g/100 g)
天门冬氨酸	2.81±0.12 ^a	2.39±0.13 ^b	2.36±0.12 ^b	2.44±0.10 ^b
苏氨酸	1.21±0.15 ^a	1.18±0.13 ^a	1.07±0.08 ^a	1.2±0.11 ^a
丝氨酸	1.35±0.12 ^b	1.41±0.11 ^a	1.31±0.15 ^b	1.41±0.09 ^a
谷氨酸	5.18±0.18 ^c	5.26±0.14 ^b	5.15±0.16 ^c	5.33±0.12 ^a
甘氨酸	1.53±0.13 ^a	1.50±0.14 ^a	1.50±0.09 ^a	1.51±0.10 ^a
丙氨酸	1.38±0.05 ^{ab}	1.39±0.04 ^a	1.34±0.05 ^b	1.42±0.03 ^a
胱氨酸	0.32±0.02 ^b	0.36±0.04 ^{ab}	0.32±0.03 ^b	0.41±0.03 ^a
缬氨酸	1.23±0.10 ^d	1.37±0.07 ^b	1.27±0.08 ^c	1.43±0.13 ^a
异亮氨酸	1.04±0.12 ^a	1.09±0.15 ^a	1.09±0.11 ^a	1.1±0.07 ^a
亮氨酸	1.61±0.10 ^a	1.50±0.11 ^b	1.40±0.11 ^c	1.54±0.10 ^b
酪氨酸	0.89±0.03 ^a	0.87±0.05 ^a	0.81±0.06 ^b	0.89±0.03 ^a
苯丙氨酸	1.34±0.08 ^a	1.25±0.07 ^b	1.25±0.06 ^b	1.25±0.07 ^b
赖氨酸	1.94±0.14 ^b	2.04±0.16 ^a	1.90±0.13 ^b	2.07±0.16 ^a
组氨酸	0.72±0.02 ^a	0.70±0.02 ^a	0.68±0.02 ^a	0.71±0.02 ^a
精氨酸	2.26±0.13 ^a	1.65±0.14 ^c	1.80±0.011 ^b	1.70±0.13 ^c
脯氨酸	1.54±0.03 ^c	1.83±0.04 ^a	1.66±0.06 ^b	1.81±0.10 ^a
蛋氨酸	0.34±0.01 ^c	0.39±0.02 ^b	0.38±0.02 ^b	0.41±0.02 ^a
TAA	23.88±0.15 ^c	26.18±0.18 ^a	25.29±0.22 ^b	26.63±0.20 ^a
EAA	11.69	11.17	10.84	11.41
DAA	13.13	12.66	12.41	12.84
EAA/TAA	48.95%	42.67%	42.86%	42.85%
DAA/TAA	54.98%	48.36%	49.07%	48.22%

注: TAA: 总氨基酸(total amino acid); EAA(必需氨基酸, essential amino acid): 包括蛋氨酸、缬氨酸、赖氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸、色氨酸、苏氨酸、精氨酸和组氨酸; EAA/TAA: 必需氨基酸比总氨基酸。DAA(鲜味氨基酸, delicious amino acid): 天门冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸; DAA/TAA: 鲜味氨基酸比总氨基酸。同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 相同小写字母表示无显著性差异($P>0.05$), 下同。

表 3 4 种饲料养殖小龙虾的氨基酸组成及分析

Table 3 Amino acid compositions and analysis of *Procambarus clarkii* fed with 4 kinds of feeds

种类	虾(饲料 1)/%	虾(饲料 2)/%	虾(饲料 3)/%	虾(饲料 4)/%
天门冬氨酸	1.81±0.26 ^c	1.88±0.24 ^a	1.84±0.22 ^b	1.83±0.23 ^b
苏氨酸	0.89±0.05 ^c	0.98±0.03 ^b	0.99±0.05 ^b	1.10±0.04 ^a
丝氨酸	0.69±0.03 ^a	0.71±0.04 ^a	0.70±0.04 ^a	0.71±0.05 ^a
谷氨酸	2.82±0.30 ^c	2.90±0.35 ^a	2.88±0.38 ^{ab}	2.86±0.33 ^b
甘氨酸	0.78±0.03 ^d	0.89±0.03 ^a	0.80±0.03 ^c	0.86±0.05 ^b

表 3(续)

种类	虾(饲料 1)/%	虾(饲料 2)/%	虾(饲料 3)/%	虾(饲料 4)/%
丙氨酸	1.03±0.12 ^b	1.07±0.11 ^a	1.06±0.15 ^a	1.06±0.14 ^a
胱氨酸	0.11±0.01 ^a	0.10±0.01 ^a	0.10±0.01 ^a	0.10±0.01 ^a
缬氨酸	0.88±0.11 ^a	0.85±0.10 ^a	0.88±0.10 ^a	0.85±0.10 ^a
异亮氨酸	0.93±0.13 ^{ab}	0.96±0.12 ^a	0.92±0.15 ^{ab}	0.92±0.11 ^{ab}
亮氨酸	1.76±0.26 ^a	1.78±0.24 ^a	1.77±0.26 ^a	1.78±0.25 ^a
酪氨酸	0.92±0.04 ^b	1.02±0.05 ^a	1.03±0.07 ^a	1.04±0.02 ^a
苯丙氨酸	0.90±0.02 ^b	0.95±0.03 ^a	0.90±0.03 ^{ab}	0.89±0.03 ^{ab}
赖氨酸	1.73±0.30 ^a	1.71±0.34 ^a	1.64±0.35 ^b	1.62±0.38 ^b
组氨酸	0.39±0.10 ^a	0.41±0.10 ^a	0.40±0.12 ^a	0.40±0.10 ^a
精氨酸	2.00±0.28 ^c	2.07±0.29 ^a	2.05±0.28 ^b	2.05±0.26 ^b
脯氨酸	0.59±0.06 ^b	0.60±0.08 ^a	0.60±0.02 ^a	0.61±0.07 ^a
蛋氨酸	0.50±0.04 ^b	0.54±0.02 ^a	0.50±0.02 ^b	0.55±0.02 ^a
TAA	18.73±0.03 ^a	19.42±0.13 ^a	19.06±0.10 ^a	19.23±0.04 ^a
EAA	7.59	7.77	7.60	7.71
DAA	8.26	8.71	8.51	8.54
NEAA	11.14	11.65	11.46	11.52
EAA/TAA	40.52	40.01	39.87	40.09
DAA/TAA	44.10	44.85	44.65	44.41
EAA/NEAA	68.13	66.70	66.32	66.93

注: NEAA: 非必需氨基酸(non-essential amino acids)。

氨基酸组成的好坏在一定程度上可反映蛋白质营养价值的高低。食物蛋白质中必需氨基酸的组成比例越接近人体必需氨基酸的组成比例,其营养价值就越高。AAS 是 1973 年 FAO 和 WHO 以人体氨基酸均衡模式建立的一种标准^[14];鸡蛋蛋白被认为是优质的食物蛋白,CS 是以鸡蛋蛋白氨基酸建立的一种评价方式^[15]。可见,AAS 和 CS 可从不同的角度反映蛋白质构成和利用率的关系。

由表 4 可知,从 AAS 和 CS 看,4 种虾肉中赖氨酸、苯丙氨酸+酪氨酸、亮氨酸的得分均大于 1,可见大多数必需氨基酸得分达到了 FAO/WHO 理想模式。从 AAS 和

CS 看,4 种虾肉中 AAS、CS 评分均显示缬氨酸、蛋氨酸+胱氨酸为限制性氨基酸,与丁建英等^[29]研究的克氏原螯虾肌肉限制氨基酸一致,也与林星等^[31]研究的中国龙虾肌肉的限制性氨基酸一致。

必需氨基酸指数(EAAI)是评价食物蛋白质营养价值的重要指标之一,必需氨基酸含量与标准蛋白质的接近程度可用必需氨基酸指数衡量。当 EAAI>95 时,为优质蛋白源;当 86<EAAI<95,为良好蛋白源;75<EAAI<86,为可用蛋白源;EAAI<75,为不适蛋白源^[32]。这说明在目前 4 种饲料养殖小龙虾的蛋白质较好。

表 4 饲料 1 至饲料 4 养殖虾肉的 EAAI、AAS 及 CS 的比较
Table 4 Comparison of EAAI, AAS and CS of *Procambarus clarkii* under feed 1 to 4

必需氨基酸	虾(饲料 1)	虾(饲料 2)	虾(饲料 3)	虾(饲料 4)	FAO 模式	全鸡蛋模式	AAS				CS			
							虾(饲料 1)	虾(饲料 2)	虾(饲料 3)	虾(饲料 4)	虾(饲料 1)	虾(饲料 2)	虾(饲料 3)	虾(饲料 4)
蛋氨酸+胱氨酸	195.21	209.53	195.01	213.03	220	386	0.89*	0.95*	0.89*	0.97*	0.51*	0.54*	0.51*	0.55*
缬氨酸	281.62	278.29	286.01	278.58	310	410	0.91**	0.90**	0.92**	0.90**	0.69**	0.68**	0.70**	0.68**
异亮氨酸	297.62	314.3	299.01	301.52	250	331	1.19	1.26	1.2	1.21	0.9	0.95	0.9	0.91
亮氨酸	563.24	582.77	575.27	583.38	440	534	1.28	1.32	1.31	1.33	1.05	1.09	1.08	1.09
苯丙氨酸+酪氨酸	582.44	644.97	627.28	632.54	380	565	1.53	1.7	1.65	1.66	1.03	1.14	1.11	1.12
苏氨酸	284.82	320.85	321.76	360.51	250	292	1.14	1.28	1.29	1.44	0.98	1.1	1.1	1.23
赖氨酸	553.64	559.85	533.02	530.94	340	441	1.63	1.65	1.57	1.56	1.26	1.27	1.21	1.20
必需氨基酸指数(EAAI)	88.2	93.14	90.07	93.42										

注: *为第一限制性氨基酸;**为第二限制性氨基酸。

2.3 小龙虾饲料及肌肉脂肪酸组成及其评价

表 5 知, 饲料 1、饲料 2、饲料 3、饲料 4 分别检出脂肪酸 27、24、22、24 种。饲料中的主要饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)为软脂酸(C16:0), 其次为硬脂酸(C18:0)和肉豆蔻酸(C14:0), SFA 相对含量依次为: 饲料 1 (27.81%)>饲料 4 (24.63%)>饲料 2 (24.34%)>饲料 3 (23.18%); 饲料 1~3 的 C16:0 含量存在显著性差异($P<0.05$), 以饲料 1 含量最高, 饲料 4 与饲料 2 无显著性差异($P>0.05$); C16:0 相对含量分别为饲料 1 (20.10%)>饲料 4 (17.60%)>饲料 2 (17.40%)>饲料 3 (16.80%)。4 种饲料的 C18:0 相对含量排序为饲料 1 (4.63%)>饲料 3 (3.87%)>饲料 2 (3.50%)>饲料 4 (3.39%)。不饱和单烯酸(monounsaturated fatty acid, MUFA)以 C18:1n9c(油酸)为主, 不饱和多烯酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)以 C18:2n6c(亚油酸)含量最高, 4 种饲料中 EPA+DHA 含量相差较大, 其中饲料 4>饲料 2>饲料 3>饲料 1。

表 6 可知, 4 种小龙虾肌肉都检出 22 种脂肪酸, 其中 SFA 占 9 种, MUFA 占 5 种, PUFA 占 8 种; 小龙虾肌肉的 SFA 均以 C16:0 最高, 其次为 C18:0, 与李赵嘉等^[11]的结果一致。研究发现, C16:0 对于血清中的胆固醇有降低作用, 因此建议日常食用月桂酸和肉豆蔻酸的血栓患者, 可食用棕榈酸, 以便缓解患者的血栓状况^[33]。小龙虾肌肉中的

MUFA 以 C18:1n9c(油酸)最高; 组成小龙虾肌肉中的 PUFA 主要为 C18:2n6c、C20:5n、C22:6n3 和 C18:3n3, 这一情况与饲料中各脂肪酸主要成分一致。

在某种程度上脂肪酸的不饱和度决定了动物脂肪的质量^[31]。4 种虾肌肉的总不饱和脂肪酸(total unsaturated fatty acid, TUFA)与总饱和脂肪酸(total saturated fatty acid, TSFA)的比值(TUFA/TSFA)均在 2.50 左右, 高于林星等^[31]研究的中国龙虾 2.24, 远高于日本对虾(1.01)、哈氏仿对虾(1.09)和中华管鞭虾(1.38)^[34]。研究^[35-36]表明 MUFA 具有降血糖、调节血脂、降低胆固醇和防止记忆下降等多种作用, PUFA 具有明显的降血脂、减少血小板的凝聚、防止血栓形成、抗癌和免疫调节、延缓衰老等作用, 能显著降低心血管病的发生率。从脂肪酸的含量看, PUFA 的总量均远高于 MUFA, 这与养殖饲料中的含量无紧密的关联性, 4 种虾肌肉的 PUFA 均在 45.00%左右, 以虾(饲料 3)含量最高(45.81%), PUFA 对动脉血栓形成和血小板功能有明显影响^[37]。研究表明, EPA 和 DHA 这两种多不饱和脂肪酸主要存在于海洋生物中, 如鱼类、虾类等^[38], EPA 和 DHA 已被称为人和动物生长发育的必需脂肪酸。DHA 含量在小龙虾中含量较高, 其中以虾(饲料 3)相对含量为 4.67%最高, 虾(饲料 1)4.60%次之, 它对脑、视网膜和神经组织发育起着重要作用^[37]。

表 5 4 种饲料的脂肪酸含量
Table 5 Fatty acid content of 4 kinds of feeds

脂肪酸种类	饲料 1/%	饲料 2/%	饲料 3/%	饲料 4/%
C12:0	0.05±0.01 ^c	0.07±0.01 ^b	ND	0.08±0.01 ^a
C14:0	1.29±0.05 ^c	1.78±0.02 ^b	0.80±0.04 ^d	1.95±0.05 ^a
C14:1n5	0.03±0.01 ^a	ND	ND	ND
C15:0	0.20±0.02 ^b	0.23±0.02 ^a	0.13±0.01 ^c	0.25±0.01 ^a
C16:0	20.10±0.04 ^a	17.40±0.06 ^b	16.80±0.02 ^c	17.60±0.04 ^b
C16:1n7	2.11±0.01 ^b	2.24±0.05 ^b	1.13±0.04 ^c	2.43±0.04 ^a
C17:0	0.25±0.01 ^a	0.22±0.02 ^a	0.21±0.01 ^a	0.25±0.03 ^a
C17:1n7	0.11±0.01 ^a	0.11±0.01 ^a	0.10±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a
C18:0	4.63±0.14 ^a	3.50±0.12 ^b	3.87±0.13 ^b	3.39±0.15 ^c
C18:1n9c	29.90±0.12 ^a	30.00±0.13 ^a	30.10±0.16 ^a	29.70±0.13 ^a
C18:2n6c	33.00±0.12 ^b	29.60±0.12 ^c	37.60±0.13 ^a	28.90±0.14 ^c
C20:0	0.47±0.02 ^a	0.50±0.02 ^a	0.51±0.02 ^a	0.49±0.02 ^a
C18:3n6	0.40±0.01 ^a	ND	ND	ND
C20:1	0.92±0.10 ^d	1.99±0.13 ^b	1.05±0.03 ^c	2.03±0.15 ^a
C18:3n3	2.88±0.15 ^c	3.79±0.12 ^b	3.93±0.14 ^a	3.80±0.12 ^b
C21:0	0.04±0.01 ^a	ND	ND	ND
C20:2	0.39±0.01 ^a	0.21±0.01 ^b	0.13±0.01 ^c	0.22±0.01 ^b
C22:0	0.34±0.01 ^b	0.30±0.01 ^b	0.42±0.01 ^a	0.28±0.01 ^c
C20:3n6	0.30±0.02 ^a	0.12±0.01 ^b	ND	0.14±0.01 ^b
C22:1n9	0.09±0.01 ^c	1.76±0.01 ^a	0.32±0.01 ^b	1.82±0.13 ^a
C20:3n3	0.12±0.01 ^b	0.62±0.04 ^a	0.05±0.01 ^c	0.60±0.02 ^a
C20:4n6	0.40±0.01 ^a	0.40±0.01 ^a	0.20±0.01 ^b	0.43±0.02 ^a
C23:0	0.08±0.01 ^a	0.07±0.01 ^{ab}	0.09±0.01 ^a	0.10±0.01 ^a
C20:5n3(EPA)	0.47±0.03 ^d	1.77±0.13 ^b	0.81±0.08 ^c	1.92±0.15 ^a
C24:0	0.36±0.02 ^a	0.27±0.01 ^b	0.35±0.03 ^a	0.25±0.04 ^b
C24:1n9	0.26±0.01 ^c	0.43±0.03 ^a	0.38±0.02 ^b	0.42±0.02 ^a
C22:6n3(DHA)	0.88±0.02 ^c	2.64±0.14 ^a	1.04±0.10 ^b	2.83±0.11 ^a
SFA	27.81	24.34	23.18	24.63
MUFA	33.43	36.53	33.08	36.52
PUFA	38.46	38.94	43.64	38.62
EPA+DHA	1.35	4.41	1.85	4.75

注: ND: 未检出。EPA: 二十碳五烯酸(eicosapentemacnioc acid); DHA: 不饱和脂肪酸(docosaheaxaenoic acid)。

表 6 4 种不同饲料养殖小龙虾脂肪酸含量
Table 6 Fatty acid content of *Procambarus clarkii* fed with 4 kinds of different feeds

种类	虾(饲料 1)/%	虾(饲料 2)/%	虾(饲料 3)/%	虾(饲料 4)/%
C12:0	0.15±0.01 ^a	0.15±0.01 ^a	0.11±0.01 ^a	0.21±0.01 ^a
C14:0	0.48±0.01 ^a	0.51±0.02 ^a	0.45±0.02 ^a	0.47±0.03 ^a
C15:0	0.70±0.01 ^b	0.84±0.03 ^a	0.69±0.05 ^b	0.84±0.02 ^a
C16:0	16.50±0.02 ^a	15.50±0.03 ^b	16.60±0.04 ^a	15.60±0.01 ^b
C16:1n7	1.72±0.01 ^b	3.23±0.15 ^a	1.79±0.02 ^b	3.46±0.08 ^a
C17:0	0.67±0.01 ^b	0.98±0.01 ^a	0.65±0.01 ^b	0.95±0.01 ^a
C17:1n7	0.25±0.02 ^b	0.43±0.02 ^a	0.25±0.02 ^b	0.42±0.02 ^a
C18:0	8.46±0.10 ^a	7.99±0.12 ^a	8.06±0.13 ^a	8.12±0.12 ^a
C18:1n9	22.80±0.32 ^a	22.20±0.29 ^a	22.60±0.30 ^a	21.60±0.26 ^b
C18:2n6	17.90±0.12 ^a	14.80±0.21 ^b	17.70±0.22 ^a	14.80±0.24 ^b
C20:0	0.99±0.02 ^a	0.96±0.02 ^a	0.97±0.02 ^a	0.99±0.02 ^a
C20:1	0.81±0.01 ^a	0.72±0.01 ^a	0.80±0.01 ^a	0.71±0.01 ^a
C18:3n3	3.60±0.12 ^a	3.74±0.16 ^a	3.61±0.18 ^a	3.64±0.20 ^a
C21:0	0.17±0.01 ^a	0.18±0.01 ^a	0.18±0.01 ^a	0.20±0.01 ^a
C20:2	1.34±0.04 ^a	1.27±0.06 ^a	1.31±0.03 ^a	1.28±0.02 ^a
C22:0	0.75±0.03 ^a	0.78±0.04 ^a	0.79±0.02 ^a	0.58±0.02 ^b
C20:3n6	0.22±0.03 ^a	0.36±0.02 ^a	0.25±0.02 ^a	0.33±0.02 ^a
C22:1n9	0.39±0.01 ^a	0.25±0.01 ^b	0.26±0.01 ^b	0.34±0.01 ^a
C20:3n3	0.48±0.01 ^a	0.48±0.01 ^a	0.47±0.01 ^a	0.48±0.01 ^a
C20:4n6	4.32±0.14 ^b	6.25±0.16 ^a	4.42±0.18 ^b	6.34±0.14 ^a
C20:5n3 (EPA)	12.80±0.20 ^c	14.10±0.20 ^a	13.40±0.18 ^b	14.50±0.16 ^a
C22:6n3 (DHA)	4.60±0.12 ^a	4.15±0.16 ^a	4.67±0.18 ^a	4.11±0.18 ^a
SFA	28.87	27.89	28.48	27.95
MUFA	25.95	26.83	25.59	26.52
PUFA	45.26	45.15	45.81	45.48

2.4 矿物元素分析与评价

如表 7 所示,对 4 种小龙虾肌肉中矿物质元素含量进行测定,4 种小龙虾含有丰富的常量元素和微量元素,其中常量元素以钾和磷含量较高,微量元素以锌含量最高;常量元素以钾含量最高,钾元素含量均在 3700.00 mg/kg 以上,其中以虾(饲料 4)含量最高,含量为 4150.00 mg/kg。小龙虾肌肉中含有丰富的磷,含量高达 3100.00 mg/kg,这与中国龙虾的研究结果一致^[31]。微量元素以锌含量最高,其中以虾(饲料 1)含量最高,高达 17.40 mg/kg。

矿物质是人体必需的元素,人体自身无法产生和合成,只能从膳食中摄取、补充,并且它对人体还发挥着多种重要的生理功能、参与各类代谢活动。其中,钾元素是碱性元素的一种,参与维持人体体液的酸碱平衡、维持人体肌肉的正常功能,缺乏该元素会导致四肢无力、下腿肌肉松软、注意力不集中、精神萎靡、呼吸困难等症状^[39]。锌是一种人体必需的微量元素,有重要的生理功能和营养作用,特别是对儿童的免疫功能、创伤愈合、智力发育等具有不可忽视的作用^[40]。因此,小龙虾肌肉能够较好地满足人体对矿物元素的需要。

3 结论与讨论

本研究采用国内外通用的营养测试方法对 4 种湖北

公安常见的小龙虾养殖饲料及肌肉营养成分进行分析,结果表明:4 种养殖饲料的蛋白质均在 30%左右,均能满足养殖需求,但仅饲料 1 的脂肪含量(5.8%)满足最佳脂肪水平(6%)^[17]。4 种养殖饲料中仅饲料 1 的必需氨基酸含量最高,赖氨酸和精氨酸两者同时满足生长需求。

4 种虾肌肉的蛋白质含量以虾(饲料 1)最高(19.53%);4 种肌肉脂肪含量很低,均为 0.20%,水分和灰分无明显差异;4 种虾肌肉的必需氨基酸含量均较高,EAA/TAA 在 40.0%左右,EAA/NEAA 在 60%以上,符合 FAO/WHO 的评价标准;4 种小龙虾肌肉鲜味氨基酸占总氨基酸的比值约在 44.0%左右,高于味道鲜美的养殖鲈鱼和养殖金鲳鱼;4 种小龙虾肌肉中的 EPA 和 DHA 两种 n-6 不饱和脂肪酸含量均较高,两者之和在 18.0%左右,高于李赵嘉等^[11]研究的冀东区稻田养殖小龙虾(12.74%);虾肌肉的 TUFU/TSFA 均在 2.50 左右,可见 4 种饲料养殖的小龙虾肌肉的脂肪质量较高。

综上,湖北公安常见 4 种养殖小龙虾的饲料,基本能够满足小龙的生长所需的蛋白质、脂肪的需求;养殖的小龙虾肌肉富含多种必需氨基酸和鲜味氨基酸,营养丰富、味道鲜美,是补充人体营养物质的理想优质蛋白来源。

表 7 4 种饲料养殖虾肌肉中元素含量(mg/kg)
Table 7 Content of elements in *Procambarus clarkii* muscle under different feeds (mg/kg)

微量元素种类	虾(饲料 1)	虾(饲料 2)	虾(饲料 3)	虾(饲料 4)
铜	6.40±0.26 ^a	5.30±0.22 ^c	5.70±0.24 ^b	6.20±0.21 ^a
铁	7.80±0.10 ^b	4.90±0.26 ^c	4.00±0.28 ^a	5.30±0.30 ^c
锰	8.40±0.30 ^b	11.60±0.32 ^a	11.80±0.30 ^a	6.60±0.26 ^c
锌	17.40±0.60 ^b	15.20±0.80 ^b	17.30±1.20 ^a	14.90±1.30 ^b
钾	4060.00±30.00 ^b	3910.00±31.00 ^c	3700.00±30.00 ^d	4150.00±35.00 ^a
钙	176.00±2.80 ^b	168.00±3.00 ^b	171.00±3.60 ^a	166.00±3.80 ^b
镁	315.00±3.80 ^a	306.00±4.60 ^b	305.00±4.20 ^b	308.00±3.90 ^b
磷	2810.00±32.00 ^c	3100.00±33.00 ^a	3010.00±30.00 ^b	3080.00±31.00 ^a

注: 常量元素: 钾、钙、镁、磷; 微量元素: 铜、铁、锰、锌。

参考文献

- [1] 彭倩. 小龙虾重金属污染及人体健康风险评估[D]. 南京: 南京大学, 2015.
PENG Q. Health metal pollution characteristics and health risk assessment of crayfish in China [D]. Nanjing: Nanjing University 2015.
- [2] 中国水产. 中国小龙虾产业发展报告(2018)[J]. 中国水产, 2018, (7): 20–27.
China Fisheries. China crayfish industry development report (2018) [J]. China Aquatic, 2018, (7): 20–27.
- [3] 中国水产. 中国小龙虾产业发展报告(2021)[J]. 中国水产, 2021, (7): 27–33.
China Fisheries. China crayfish industry development report (2021) [J]. China Aquatic, 2021, (7): 27–33.
- [4] 王广军, 孙悦, 郁二蒙, 等. 澳洲淡水龙虾与克氏原螯虾肌肉营养成分分析与品质评价[J]. 动物营养学报, 2019, 31(9): 4339–4348.
WANG GJ, SUN Y, YU ERM, et al. Analysis and quality evaluation of nutritional components in muscle of thecherax quadricarinatus and *Procambarus clarkii* [J]. Chin J Anim Nutr, 2019, 31(9): 4339–4348.
- [5] 周泽湘, 范文浩, 方刘, 等. 温度对克氏原螯虾幼虾生长、摄食及消化酶活性的影响[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(20): 127–130.
ZHOU ZX, FAN WH, FANG L, et al. Effects of temperature on growth, feeding and digestive enzyme activities of *Procambarus clarkii* Juveniles [J]. Hubei Agric Sci, 2021, 60(20): 127–130.
- [6] LI J, HUANG J, LI C, et al. Evaluation of the nutritional quality of edible tissues (muscle and hepatopancreas) of cultivated *Procambarus clarkii* using biofloc technology [J]. Aquatic Rep, 2021, 19(1): 100586.
- [7] ZHANG ZW, DUAN WW, CHEN M, et al. Effect of two sterilization treatment on the quality of cooked crayfish (*Procambarus clarkii*) product during refrigerated storage [J]. J Guangdong Ocean Univ, 2019, 39(6): 93–100.
- [8] ALMER AO, MAURIC IO, PEREIR A, et al. Genetic diversity of the invasive crayfish *Procambarus clarkii* in France [J]. Elect Res, 2018. DOI: 10.1016/j.limno.2018.01.002
- [9] TAN XH, LI JJ, YANG HS, et al. ICP-MS determination of 11 kinds of elements in muscle and hepatopancreas of *Procambarus clarkii* [J]. Food Ind, 2019, 40(10): 315–319.
- [10] ARIANO A, SCIVICCO M, D'AMBOLA M, et al. Heavy metals in the muscle and hepatopancreas of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in Campania (Italy) [J]. Animals, 2021, 11(7): 1933.
- [11] 李赵嘉, 郑振宇, 左永梅, 等. 冀东稻区克氏原螯虾肌肉营养成分分析及评价[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(20): 206–209.
LI ZJ, ZHENG ZY, ZUO YM, et al. Analysis and evaluation on nutritional components in muscle of *Procambarus clarkii* in rice area of Eastern Hebei [J]. J Anhui Agric Sci, 2019, 47(20): 206–209.
- [12] 徐晨, 葛庆丰, 诸永志, 等. 不同地区小龙虾营养价值和品质的比较研究[J]. 肉类研究, 2019, 33(8): 7–11.
XU C, GE QF, ZHU YZ, et al. Comparative analysis of nutritional value and quality of crayfish from different areas of China [J]. Meat Res, 2019, 33(8): 7–11.
- [13] 周剑, 赵仲孟, 黄志鹏, 等. 池塘和稻田养殖模式下克氏原螯虾肌肉和肝脏营养成分比较[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 162–169.
ZHOU J, ZHAO ZM, HUANG ZP, et al. Comparison of nutrient components in muscles and hepatopancreas of pond- and paddy field-cultured *Procambarus clarkii* [J]. Prog Fish Sci, 2021, 42(2): 162–169.
- [14] CONSULTATION J. Protein and amino acid requirements in human nutrition [J]. World Health Organ Technol Rep Seri, 2007, (935): 1.
- [15] PELLET PL, YOUNG VR. Nutritional evaluation of protein foods [J]. Food Nutr Bull, 1980, 18(1): 4.
- [16] HUBBARD DM, ROBINSON EH, BROWN PB, et al. Optimum ratio of dietary protein to energy for red crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. Prog Fish Culturist, 1986, 48(4): 233–237.
- [17] JOVER M, FERN NCJ, RiO MCD, et al. Effect of feeding cooked-extruded diets, containing different levels of protein, lipid and carbohydrate on growth of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. Aquaculture, 1999, 178(1–2): 127–137.
- [18] 陈秀梅, 王桂芹, 申斌, 等. 克氏原螯虾营养需求的研究进展[J]. 饲料工业, 2014, 35(19): 69–73.
CHEN XM, WANG GQ, SHEN B, et al. Research progress in nutrition requirement of *Procambarus clarkii* [J]. Feed Ind, 2014, 35(19): 69–73.
- [19] 程玉冰, 夏伦志, 施培松, 等. 克氏原螯虾饲料的配制及营养需要研究概况[J]. 粮食与饲料工业, 2011, (10): 4.
CHENG YB, XIA LZ, SHI PS, et al. Research progress on feed preparation and nutritional requirements of *Procambarus clarkii* [J]. Food Feed Ind, 2011, (10): 4.
- [20] 张微微. 克氏原螯虾对赖氨酸和精氨酸需求量的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.

- ZHANG WW. Study on lysine and arginine requirements of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural College, 2012.
- [21] 朱杰, 徐维娜, 张微微, 等. 克氏原螯虾的适宜蛋氨酸需求量[J]. 中国水产科学, 2014, 21(2): 340-350.
- ZHU J, XU WN, ZHANG WW, *et al.* Study on methionine requirement of *Procambarus clarkii* [J]. Chin Fish Sci, 2014, 21(2): 340-350.
- [22] 姬红臣. 饲料对凡纳滨对虾生长、生化成分及养殖水质的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2005.
- JI HC. The effects of dietaries on growth, body biochemical composition of *Litopenaeus vannamei* and the culture water quality [D]. Xiamen: Xiamen University, 2005.
- [23] 曹湛慧, 黄和, 操玉涛, 等. 淡水和海水养殖花鲈营养成分的比较[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 44-48.
- CAO ZH, HUANG H, CAO YT, *et al.* Comparison of the nutritional composition of freshwater and marine seabass [J]. Food Mach, 2014, 30(3): 44-48.
- [24] 杨欣怡, 张凤枰, 赵鑫, 等. 网箱海养卵形鲳鲹饲料与肌肉品质评价[J]. 食品科学, 2015, 36(21): 243-248.
- YANG XY, ZHANG FP, ZHAO X, *et al.* Evaluation of nutritional composition and quality of feed and muscle of sea cage cultured *Trachinotus ovatu* [J]. Food Sci, 2015, 36(21): 243-248.
- [25] 张彤晴, 林海, 葛家春, 等. 日本沼虾和秀丽白虾野生群体肌肉营养成分分析[J]. 饲料研究, 2008, (1): 59-63.
- ZHANG TQ, LIN H, GE JC, *et al.* Analysis of muscle nutritional quality of wild populations of *Macrobrachium nipponense* and *White shrimp* [J]. Feed Res, 2008, (1): 59-63.
- [26] AMATI L, MARZULLI G, MARTULLI M, *et al.* Donkey and goat milk intake and modulation of the human aged immune response [J]. Curr Pharm Desig, 2010, 16(7): 864-869.
- [27] KHEDR NF, KHEDR EG, BRANCHE D. Chain amino acids supplementation modulates TGF- β 1/smad signaling pathway and interleukins in CCl4-induced liver fibrosis [J]. Fund Clin Pharmacol, 2017, 31(5): 1120-1128.
- [28] MARZANNA H, ANNA GŚ, ANNA GM. The effect of antioxidants on quantitative changes of lysine and methionine in linoleic acid emulsions at different pH conditions [J]. Acta Scient Polonorum Technol Aliment, 2017, 16(1): 53-67.
- [29] 丁建英, 康璉, 徐建荣. 克氏原螯虾肌肉营养成分分析与评价[J]. 水产科技情报, 2010, 37(6): 298-301.
- DING JY, KANG J, XU JR. Analysis and evaluation of nutrient composition of *Procambarus clarkii* muscle [J]. Aquatic Sci Technol Inform, 2010, 37(6): 298-301.
- [30] 王芮, 高惠, 滕丽微, 等. 宁夏贺兰山岩羊肌肉营养成分分析[J]. 兽类学报, 2018, 38(4): 352-358.
- WANG R, GAO H, TENG LW, *et al.* Nutrient composition of blue sheep (*Pseudois nayaur*) in the Helan Mountains, Ningxia, China [J]. Acta Theriol Sin, 2018, 38(4): 352-358.
- [31] 林星, 邱金海. 中国龙虾肌肉营养成分分析与品质评价[J]. 养殖与饲料, 2016, (5): 24-28.
- LIN X, QIU JH. Analysis of nutritional components and quality evaluation of Chinese lobster muscle [J]. Anim Breed Feed, 2016, (5): 24-28.
- [32] 冯东勋, 赵保国. 利用必需氨基酸指数(EAAI)评价新饲料蛋白源[J]. 中国饲料, 1997, (7): 10-13.
- FENG DX, ZHAO BG. Evaluation of new feed protein sources by using the essential amino acid index (EAAI) [J]. China Feed, 1997, (7): 10-13.
- [33] SUNDRAM K, HAYES KC, SIRU OH. Dietary palmitic acid results in lower serum cholesterol than does a lauric-myristic acid combination in normolipemic humans [J]. Am J Clin Nutr, 1994, (4): 841-846.
- [34] 王潇, 张继光, 徐坤华, 等. 3 种海捕虾肌肉营养成分分析与品质评价[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(8): 209-214.
- WANG X, ZHANG JG, XU KH, *et al.* Analysis and quality evaluation of nutrition in the muscle of three kinds of marine shrimps [J]. Food Ferment Ind, 2014, 40(8): 209-214.
- [35] 张伟敏, 钟耕, 王伟. 单不饱和脂肪酸营养及其生理功能研究概况[J]. 粮食与油脂, 2005, (3): 13-15.
- ZHANG WM, ZHONG G, WANG W. Study survey of nutrition and biological function of MUFA [J]. J Cere Oils, 2005, (3): 13-15.
- [36] 孙翔宇, 高贵田, 段爱莉, 等. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 418-423.
- SUN XY, GAO GT, DUAN AIL, *et al.* Research progress in polyunsaturated fatty acids [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(7): 418-423.
- [37] 鲍建民. 多不饱和脂肪酸的生理功能及安全性[J]. 中国食物与营养, 2006, (1): 45-46.
- BAO JM. Physiological function and safety of polyunsaturated fatty acids [J]. Food Nutr China, 2006, (1): 45-46.
- [38] GARG ML, LEITCH J, BLAKE RJ, *et al.* Long-chain n3 polyunsaturated fatty acid incorporation into human atrium following fish oil supplementation [J]. Lipids, 2006, 41(12): 1127-1132.
- [39] NEUMANN C, HARRIS DM, ROGERS LM. Contribution of animal source foods in improving diet quality and function in children in the developing world [J]. Nutr Res, 2002, 22(1): 193-220.
- [40] 孙淑萍, 王学琳, 丁高峡, 等. DS 区元素 Zn、Cu 与眼病关系研究[J]. 微量元素与健康研究, 1994, (1): 16, 36-37.
- SUN SP, WANG XL, DING GX, *et al.* Study on the relationship between elements Zn, Cu in DS region and eye disease [J]. Trace Element Health Res, 1994, (1): 16, 36-37.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



杜雪莉, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水产品营养与安全。
E-mail: duxl@willtest.cn



杨欣怡, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水产品营养与安全。
E-mail: yangxinyi@163.com