董诗瑜, 马舒恬, 覃静凯, 等. 小龙虾头营养成分及风味滋味特性分析与评价 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 396−405. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100105

DONG Shiyu, MA Shutian, QIN Jingkai, et al. Analysis and Evaluation of Nutrient Composition, Flavor and Taste Characteristics of Crayfish Head[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 396−405. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100105

· 营养与保健 ·

小龙虾头营养成分及风味滋味特性分析与评价

董诗瑜, 马舒恬, 覃静凯, 周昕仪, 董鑫磊, 陈尚里, 刘小玲*
（广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004）

摘　要: 为充分利用小龙虾头等副产物，探讨小龙虾头作为食品加工原料的可行性。本文以广西稻田养殖小龙虾头为原料，采用国标测定虾头中蛋白质、脂肪、灰分、氨基酸、脂肪酸等基本营养成分，利用高效液相色谱仪测定虾头中呈味核苷酸和有机酸含量，并通过电子舌和气相离子迁移谱（GC-IMS）对新鲜虾头整体滋味和气味进行分析。结果表明：从营养组成来看，小龙虾头营养丰富，其中主要以粗蛋白（10.92 g/100 g）和粗脂肪（9.05 g/100 g）为主，脂肪中含磷脂 4.67 mg/g；虾头中有 17 种氨基酸，总含量为 97.28 mg/g，其中必需氨基酸有 7 种，占氨基酸总量的 50.01%；共检出 19 种脂肪酸（9 种饱和脂肪酸、10 种不饱和脂肪酸），不饱和脂肪酸含有 57.94%。从风味组成来看，虾头中的氨基酸、磷脂以及脂肪酸都是重要的风味前体物质；除此之外，在新鲜虾头中游离氨基酸总含量 900.70 mg/100 g，鲜、甜味氨基酸占 39.88%；虾头中的呈味核苷酸和有机酸也为虾头提供了更为丰富的滋味；并且虾头的电子舌鲜味响应值为 13.55，鲜味明显；在虾头中共定性出 23 种挥发性风味化合物，其中包括醛类、酮类和醇类等，具有一定的油脂香、肉香、类似青草和水果的味道以及土腥味等气味。总体来看，小龙虾头营养健康，含有丰富的风味前体物和滋味物质，在小龙虾头加工利用以及调味品的开发等方面具有一定的潜力和可行性。

关键词: 小龙虾头, 营养成分, 风味特性, 滋味特性
中图分类号: TS254.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2023)14−0396−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100105
本文网刊:

Analysis and Evaluation of Nutrient Composition, Flavor and Taste Characteristics of Crayfish Head

DONG Shiyu, MA Shutian, QIN Jingkai, ZHOU Xinyi, DONG Xinlei, CHEN Shangli, LIU Xiaoling*
（College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China）

Abstract: To make full use of crayfish head and other by-products, explore the feasibility of crayfish head as food processing ingredients. In this paper, the head of crayfish cultured in rice fields in Guangxi were used as raw materials. The basic nutrients such as protein, fat, ash, amino acids and fatty acids in crayfish head were determined by national standards, the contents of flavor nucleotides and organic acids in crayfish head were determined by high performance liquid chromatograph. The overall taste and odor of fresh crayfish head were analyzed by electronic tongue and gas chromatography ion mobility spectrometry (GC-IMS). The results showed that: From the perspective of nutritional composition, crayfish head is rich in nutrients, which mainly consists of crude protein (10.92 g/100 g) and crude fat (9.05 g/100 g), and the fat contains phospholipid 4.67 mg/g. There were 17 kinds of amino acids in crayfish head, and the total content was 97.28 mg/g, among which there were 7 kinds of essential amino acids, accounting for 50.01% of the total amino acids. A total of 19 kinds of fatty acids (9 kinds of saturated fatty acids and 10 kinds of unsaturated fatty acids) were

收稿日期: 2022−10−14
基金项目: 广西科技重大专项（桂科 AA20302019-7）。
作者简介: 董诗瑜（1996−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与风味研究, E-mail: 1023021712@qq.com。
*** 通信作者:** 刘小玲（1972−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品的开发与利用, E-mail: 1106133912@qq.com。

detected, and the unsaturated fatty acids contained 57.94%. In terms of flavor composition, amino acids, phospholipids and fatty acids were important flavor precursors. In addition, the total content of free amino acids in fresh crayfish head was 900.70 mg/100 g, and the fresh and sweet amino acids accounted for 39.88%. The flavor nucleotides and organic acids in the crayfish head also provided a richer taste. The umami response value of the electronic tongue of shrimp head was 13.55, indicating that the umami taste was obvious. A total of 23 volatile flavor compounds were identified in the crayfish head, including aldehydes, ketones and alcohols, etc., which had a certain aroma of oil, meat, similar to grass and fruit, and earthy smell. In general, crayfish head was nutritious and healthy, and contained rich flavor precursors and taste substances. It had certain potential and feasibility in the processing and utilization of crayfish head and the development of condiments.

Key words: crayfish head; nutrient composition; flavor characteristics; taste characteristics

小龙虾，学名克氏原螯虾（*Procambarus clarkii*），因其肉质鲜美、口感风味独特，深受当今消费者的喜爱。随着国家政策的扶持和带动，小龙虾已经成为我国重要的经济淡水养殖虾类[1]。据统计，2021 年我国小龙虾养殖面积达 2600 万亩，位列我国淡水养殖品种的第六位，虽受疫情影响，但小龙虾产业发展仍保持稳中有进，实现恢复性增长[2]。目前，结合养殖气候环境的差异性形成了具有地方特色的养殖模式，快速推进了绿色水产养殖的举措。在广西特殊的南亚热带气候和环境下，形成了池塘养殖和稻田养殖两种主要模式，广西养殖小龙虾可比主产区提前两月左右上市，具有更高的养殖经济价值[3]。

近年来，我国小龙虾的销售流通产品主要有生鲜、低温熟食制品和冷冻初加工产品等类型，初加工产品包括虾尾、虾仁、原味虾和预先调味的小龙虾产品[4]，其加工产量也在逐年增加。但是，在虾类产品加工过程中需去除头部和硬壳，产生大量副产物直接被丢弃或用作饲料，造成了生物资源的浪费和环境污染[5]。虾头是整个加工过程中最主要的副产物，虾头中含很多有益成分包括蛋白质、氨基酸、甲壳素、磷脂、虾青素等，若能充分利用这些虾头生产高附加值产品，既能减少环境污染，同时还能为水产品深加工提供一条新的途径，实现“双赢”[6]。

目前，小龙虾头的综合利用研究主要集中于功能性成分的开发，包括甲壳素、虾青素、蛋白质的提取。李美春[7] 和付星[8] 公开了甲壳素提取的新兴方法，相比传统提取方法更加高效。在甲壳素和虾青素提取前，需要脱除蛋白质，这也使得蛋白质被提取利用。另外，当前大多数水产品副产物都会被用于呈味物质提取以及调味料开发，包括一些鱼类[9] 和虾类[10−11]，而目前利用小龙虾头等副产物开发风味调料的研究还较少且很少得到实际应用，通常采用蛋白酶酶解[12]、发酵[13] 等方式获得调味基料，再添加香辛料进行调配获得具有浓郁小龙虾风味的调味料。

从综合利用程度来看，我国小龙虾精深加工水平与国外相比还存在差距，有必要加大对小龙虾副产物高附加值产品的开发[14]。当前针对小龙虾头的营养组成和风味滋味特性的研究还存在欠缺，因此本文将对广西稻田养殖小龙虾头进行营养和风味滋味成分分析与评价，以期为小龙虾头的加工利用以及调味料的研究开发提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

小龙虾　购于大塘镇广西润爽有限公司。捕捞后在 4 ℃ 下保活运送至实验室，到达实验室进行清洗后，快速将虾头与虾尾分离（整个过程在冰浴上进行），将虾头分装放置于密封口袋中快速冻结至 −20 ℃ 冰箱中，保存备用。核苷酸标准品　上海源叶生物科技有限公司；18 种氨基酸混合标准溶液　中国国家标准中心；磺基水杨酸、高氯酸、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、硫酸　均为优级纯；氢氧化钠、硫酸铜、硫酸钾等其他试剂　均为分析纯。

YP10002 电子天平　上海衡际科学仪器有限公司；T25 D S25 粉碎机　德国 IKA 公司；L-8900 型全自动氨基酸分析仪　日本 Hitachi 公司；K9840 凯氏定氮仪　山东海能科技仪器有限公司；SZF-06A 脂肪测定仪　上海新嘉电子有限公司；FlavourSpec® 1H1-00053 气相离子迁移谱　德国 G.A.S 公司；SA-402B 电子舌　日本 INSENT 智能传感器有限公司；Waters e2695 高效液相色谱仪　上海沃特世科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　小龙虾体长、体重和虾头占全虾质量比测定　体长、体重的测定：随机选取新鲜小龙虾 15 只，先将其体表的水分擦拭干后分别用直尺和天平测量小龙虾体长和体重。

虾头占全虾质量比测定：利用随机选取的 15 只小龙虾，去除虾尾，称量全虾和虾头的质量，并计算其比值。试验均重复三次，取平均值。

1.2.2　虾头样品预处理　取解冻后的虾头，用粉碎机在 8000 r/min 下破碎 1 min 后用于营养成分和风味物质的测定。

1.2.3　虾头基本营养成分含量测定　水分：GB 5009.3-2016 中第一法直接干燥法[15]；灰分：GB 5009.4-2016 中第一法食品中总灰分的测定[16]；蛋白质：GB 5009.5-2016 中第一法凯氏定氮法[17]；脂肪：GB 5009.6-2016 中第一法索氏抽提法[18]。

1.2.4　虾头磷脂测定　称取 50.00 g 虾头样品，加入 350 mL 95% 的乙醇溶液，在 90 r/min 下振荡提取

16 h, 将提取液在 5000 r/min 离心 15 min, 收集上清液将有机溶剂蒸干得到粗磷脂, 再加入 500 mL 预冷过的丙酮沉淀磷脂, 蒸干后得到磷脂样品[19]。磷脂含量的测定采用钼蓝比色法[20]。标准曲线的回归方程为: y=4.4841x+0.0299, 决定系数 R^2=0.9945。

1.2.5 虾头总氨基酸测定 称取 1.000 g 虾头样品经酸水解处理后用 0.22 μm 的水系滤膜过滤, 置于样品瓶中待上机[21]。根据联合国粮农组织(FAO)/世界卫生组织(WHO)推荐的氨基酸标准模式和计算方法对虾头氨基酸进行营养评估[22−23]。氨基酸评分(AAS)、化学评分(CS)的计算公式如式(1)、(2)所示:

$$\text{氨基酸评分(AAS)} = \frac{\text{样品蛋白质中氨基酸含量}}{\text{FAO/WHO理想蛋白质评分标准模式中相应必需氨基酸含量}} \quad \text{式(1)}$$

$$\text{化学评分(CS)} = \frac{\text{样品蛋白质中氨基酸含量}}{\text{鸡蛋蛋白相应氨基酸含量}} \quad \text{式(2)}$$

1.2.6 虾头脂肪酸含量测定 称取虾头样品 45 g (0.001 g)于 500 mL 锥形瓶中, 分别加入氯仿-甲醇(2∶1, V∶V)450 mL 搅拌均匀, 在 4 ℃ 放置 24 h 后过滤残渣, 滤液中加入 67.5 mL 0.9% NaCl 溶液, 振荡 2 min, 静置 3 h 后参考 Folch 的方法分步去除甲醇溶液、氯仿和水后得到总脂肪[24]。经过脂肪的皂化和脂肪酸的甲酯化[25]后用 0.22 μm 有机系滤膜过滤于进样瓶, 待上样分析。

GC-MS 条件: 色谱柱 HP-INNOWax, 载气流量 1 mL/min, 进样量 1 μL; 升温程序: 以 10 ℃/min 升温至 185 ℃, 保持 2 min, 以 3 ℃/min 升至 200 ℃ 保持 3 min, 以 15 ℃/min 升至 230 ℃ 保持 30 min; 进样口温度 250 ℃; 检测器温度 230 ℃; 不分流; 采用 NIST14.L 标准谱库检索定性。

1.2.7 虾头游离氨基酸测定 准确称取虾头样品 2.000 g, 加入 5 倍体积的 4% 磺基水杨酸溶液, 混匀, 静置 2 h 后于 10000 r/min 冷冻离心 15 min, 上清液过 0.22 μm 水系微孔滤膜, 置于上样瓶中上机测定, 整个过程均在 4 ℃ 下进行[26]。

1.2.8 虾头呈味核苷酸测定 称取虾头样品 5.000 g 于 50 mL 离心管内, 加入 15 mL 预冷后的 10% 高氯酸搅拌均匀并振荡 1 min, 在 4 ℃ 下静置 30 min 后 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 剩余沉淀重复以上操作一次, 合并上清液。调整上清液 pH 至 6.5, 用纯水定容至 50 mL, 随后在 4 ℃ 下静置 30 min, 10000 r/min 离心 15 min, 其上清液过 0.22 μm 微孔滤膜于上样瓶中, 待上样[27]。高效液相色谱分析条件[28]: 流动相 A 为 10 mmol/L KH_2PO_4(pH4.0); 流动相 B 为乙腈; 色谱柱为 Agilent ZORBAX SB-C_{18} 柱; 柱温 30 ℃; 流速 1.0 mL/min, 等度洗脱(A∶B=97∶3); 进样量 10 μL, 检测波长 254 nm。

1.2.9 虾头有机酸测定 准确称取 5.000 g 虾头样品, 加入 20 mL 超纯水 10000 r/min 匀浆 2 min, 振荡 30 s, 纯水定容至 30 mL, 在 4 ℃ 静置 1 h 后 10000 r/min 离心 20 min, 上清液过 0.45 μm 水系滤膜后待分析[29]。高效液相色谱分析条件[30]: 流动相为 4 mmol/L H_2SO_4, 色谱柱为 Aminex HPX-87H 柱, 柱温 35 ℃, 流速 0.6 mL/min, 采用等度洗脱。进样量 20 μL, 检测波长 210 nm。

1.2.10 虾头电子舌测定 称取 20 g 虾头样品加入蒸馏水 200 mL 加热至沸腾, 煮沸 3 min 后 5000 r/min 离心 20 min, 收集上清液过滤, 于室温下进行电子舌测定分析[31]。电子舌检测程序采用 Sample Measurement(2steps washing, time: 426 s), 每个样品测定 4 次, 取后三次数据进行味觉分析。

1.2.11 虾头气相离子迁移谱(GC-IMS)测定 取 2.0 g 虾头样品于顶空瓶中, 于 45 ℃ 500 r/min 振荡器加热孵化 10 min, 顶空进样口温度 80 ℃, 进样量 0.5 mL, 气相色谱柱为 FS-SE-54-CB, 柱温 40 ℃, 运行时间 26 min, 初流速 2.0 mL/min, 保持 3 min; 在 7 min 内线性升至 25 mL/min; 再以 5 mL/min 升至 50 mL/min; 10 mL/min 升至 150 mL/min。离子迁移谱检测温度为 45 ℃, 流速 150 mL/min, 漂移器为高纯 N_2[32]。利用 GC-IMS 系统自带软件 Laboratory Analytical Viewer(LAV)和 Library Search 进行化合物定性和指纹图谱分析。

1.2.12 味道强度值计算 味道强度值(Taste Activity Value, TAV)能够反映样品中某种呈味物质的含量对样品整体呈味的贡献。当 TAV 值>1 时, 该物质对样品的滋味有重要影响[33]。计算公式如式(3)所示:

$$\text{TAV} = \frac{C}{T} \quad \text{式(3)}$$

式中: C 为呈味物质的浓度大小(mg/100 g); T 为该呈味物质的阈值(mg/100 mL)。

1.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 24.0 进行数据分析, 显著性分析采用单因素方差 One-Way ANOVA 方法进行分析, P<0.05 表示数据之间存在显著性差异。利用 Origin 2022 软件进行绘图, 其分析结果均表示为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 小龙虾体长、体重和虾头占全虾质量比

由表 1 可知, 小龙虾体长 10.80 cm, 体重 24.37 g,

表 1 新鲜小龙虾基础数据

Table 1 Basic data of fresh crayfish

体长(cm)	体重(g)	虾头占全虾质量比(%)
10.80±0.80	24.37±2.17	81.24±0.73

虾头占全虾质量比为 81.24%。通过简单的基础数据可知，小龙虾头占全虾质量比较高，有必要对虾头副产物资源进行充分的开发利用，解决环境污染和虾头资源浪费的问题。

2.2　虾头基本营养组成及含量

小龙虾不同的部位在风味和基本化学组成上具有较大的差异，为了更好的了解和利用小龙虾头，对小龙虾头的基本营养成分进行分析。由表 2 可知，小龙虾头营养组成丰富，其中主要以粗蛋白质和粗脂肪为主，虾头中含有粗蛋白质 10.92 g/100 g，高于南美白对虾头的粗蛋白含量[34]。脂质作为提供人体能量的来源之一，是生物体的重要营养物质和功能活性物质。小龙虾头部的脂质较为丰富，虾头中含粗脂肪 9.05 g/100 g，有相关研究表明，虾头的肝胰腺中含有丰富的氨基酸与多不饱和脂肪酸[12]。另外，脂质中包含的磷脂还具有降低胆固醇和血脂，防治动脉粥样硬化等功能[35]，并且其与风味的形成有关。很多研究证明，磷脂是动物源食品中脂肪氧化的主要底物。脂质的氧化过程是转化为风味化合物的过程，磷脂的氧化降解会产生氢过氧化物，进一步的降解反应会产生酮类、醇类、醛类、酯类等挥发性物质[36]。磷脂在高温条件下（>160 ℃）发生的脂质热降解反应，可作为一种风味增强剂使用[37]。通过钼蓝比色法测定，小龙虾头中磷脂含量为 4.67 mg/g，虾头中含有丰富的磷脂可为小龙虾头产品提供更为丰富的香气物质。与其他虾类虾头相比，小龙虾头中水分含量高于南美白对虾头（78.44%）和凡纳滨对虾头（77.17%）[38]。综上所述，小龙虾头营养组成丰富，在小龙虾头的利用研究方面值得进一步挖掘。

表 2　新鲜小龙虾头营养组成及含量（湿基）
Table 2　Nutrient component analysis of fresh crayfish head (wet base)

粗蛋白质含量（g/100 g）	粗脂肪含量（g/100 g）	水分含量（g/100 g）	灰分含量（g/100 g）	磷脂含量（mg/g）
10.92±0.60	9.05±0.05	80.61±0.07	1.55±0.02	4.67±0.11

2.3　虾头总氨基酸组成及含量

蛋白质是人体所需的七大营养素之一，其中氨基酸的种类、含量和比例是衡量蛋白质营养价值的重要指标。食物中所含的必需氨基酸模式越接近人体氨基酸模式，其营养价值就越高[39]。在小龙虾头中共检测出 17 种氨基酸（表 3），总含量为 97.28 mg/g；虾头中含必需氨基酸 7 种，占总氨基酸的 50.01%；非必需氨基酸有 10 种，必需氨基酸与非必需氨基酸的比值高于 60%，符合 FAO/WHO 推荐的理想模式[40]（EAA/TAA×100 大于 35.38%，EAA/NEAA×100 大于 60%），虾头蛋白中氨基酸模式较佳，是一种理想的蛋白补充来源。

不同的氨基酸可以呈现不同的滋味特征。其中，天门冬氨酸、谷氨酸和丙氨酸是呈鲜、甜味的氨基酸。在小龙虾头中谷氨酸含量为 4.47 mg/g，天门冬氨酸含量为 10.94 mg/g，丙氨酸含量为 6.00 mg/g，为小龙虾头提供了更加鲜甜的食用味感。赖氨酸能够参与动物生长过程的蛋白质合成，在谷物氨基酸中通常缺乏赖氨酸，因此小龙虾可作为以谷物为主食人群的食物赖氨酸补充来源[41]。

表 3　新鲜小龙虾头氨基酸组成及含量（湿基）
Table 3　Amino acid composition and content of fresh crayfish head (wet base)

名称		氨基酸含量（mg/g）
天门冬氨酸	Asp	10.94±0.58
谷氨酸	Glu	4.47±0.19
丝氨酸	Ser	3.66±0.22
苏氨酸	Thr*	15.83±1.11
甘氨酸	Gly	5.29±0.31
丙氨酸	Ala	6.00±0.29
脯氨酸	Pro	3.86±0.11
半胱氨酸	Cys	1.34±0.02
缬氨酸	Val*	5.90±0.20
蛋氨酸	Met*	1.76±0.28
异亮氨酸	Ile*	4.79±0.26
亮氨酸	Leu*	7.90±0.47
酪氨酸	Tyr	1.75±0.09
苯丙氨酸	Phe*	5.06±0.21
赖氨酸	Lys*	7.41±0.48
组氨酸	His	3.58±0.08
精氨酸	Arg	7.74±0.61
总氨基酸TAA		97.28±5.51
必需氨基酸EAA		48.65±3.01
必需氨基酸/总氨基酸（EAA/TAA）×100		50.01%

注：标“*”号为必需氨基酸。

2.4　虾头蛋白质营养价值评价

虾头的氨基酸评分和化学评分如表 4 所示，若某个氨基酸分值低于 1，表明该氨基酸属于限制性氨基酸。在小龙虾头中 5 种必需氨基酸的氨基酸评分均大于 1，高于 FAO/WHO 相应必需氨基酸评分标准模式推荐，蛋白质营养价值高。小龙虾头中 Met+Cys 是第一限制性氨基酸，评分为 0.81；其中赖氨酸是 FAO/WHO 标准模式中推荐含量的 1.25 倍。与

表 4　新鲜小龙虾头的氨基酸评分和化学评分（湿基）
Table 4　Amino acid scores and chemical scores of fresh crayfish head (wet base)

必需氨基酸	含量（mg/gN）	FAO/WHO模式（mg/gN）	鸡蛋蛋白模式（mg/gN）	AAS	CS
苏氨酸	255.91	250	292	1.02	0.88
缬氨酸	337.58	310	410	1.09	0.82
异亮氨酸	274.04	250	331	1.10	0.83
亮氨酸	452.22	440	534	1.03	0.85
赖氨酸	424.02	340	441	1.25	0.96
Met+Cys	177.77	220	386	0.81	0.46
Phe+Tyr	390.14	380	565	1.03	0.69

标准鸡蛋蛋白模式相较，小龙虾头中化学评分均低于 1。但是仅以第一限制性氨基酸作为蛋白质质量的判断标准存在不足，某种氨基酸过多同样会影响其蛋白质质量，为了更好的评价虾头蛋白质营养价值，也需要考虑蛋白质氨基酸的平衡性[42]。

2.5 虾头脂肪酸组成及含量

脂肪酸组成能影响食品的风味和品质，由表 5 可知，新鲜小龙虾头中共检出 19 种脂肪酸。其中饱和脂肪酸（SFA）9 种，总含量为 38.07%，不饱和脂肪酸有 10 种（单不饱和脂肪酸 MUFA 有 3 种，多不饱和脂肪酸 PUFA 有 7 种），总含量为 57.94%。脂肪氧化是挥发性风味成分产生的重要途经，在氧化过程中生成包括酮类、醛类、酯类等物质[43]。饱和脂肪酸是人体重要的能量来源，不饱和脂肪酸则具有降低血脂，防止动脉粥样硬化、预防心血管疾病等作用[44]。从脂肪酸组成来看，在新鲜小龙虾头中 ΣSFA>ΣPUFA>ΣMUFA。饱和脂肪酸主要包括月桂酸（$C_{12:0}$）、肉豆蔻酸（$C_{14:0}$）、十五烷酸（$C_{15:0}$）、棕榈酸（$C_{16:0}$）和硬脂酸（$C_{18:0}$），其中棕榈酸含量最高，含有 27.36%。与小龙虾虾肉脂肪酸组成相比，棕榈酸也是虾肉中含量最高的饱和脂肪酸[45]。另外，不饱和脂肪酸容易发生氧化反应，其产物通常具有特殊的肉香味和油脂味等，是食物加工中风味物质的重要来源[46]。虾头中单不饱和脂肪酸主要含有棕榈油酸（$C_{16:1}$）、油酸甲酯（$C_{18:1n9}$）、二十碳一烯酸（$C_{20:1}$）。研究表明，二十碳五烯酸（EPA）和二十二碳六烯酸（DHA）具有降低胆固醇和甘油三酯的功能，可以降低老年痴呆及心血管等疾病的发生率[47]，但在虾头中只检测到 EPA（$C_{20:5n3}$）含有 1.71%。

表 5 新鲜小龙虾头脂肪酸甲酯的组成及相对含量

Table 5 Composition and relative content of fatty acid methyl ester in fresh crayfish head

序号	保留时间(min)	化合物	相对百分含量(%)
1	20.406	十二烷酸甲酯 月桂酸$C_{12:0}$	0.23±0.04
2	22.96	12甲基-十三烷酸甲酯	0.19±0.04
3	23.852	十四烷酸甲酯 肉豆蔻酸甲酯$C_{14:0}$	2.64±0.41
4	24.884	13-甲基十四酸甲酯	1.49±0.31
5	25.924	十五烷酸甲酯$C_{15:0}$	1.67±0.26
6	27.184	14甲基-十五烷酸甲酯	0.38±0.06
7	28.368	十六烷酸甲酯 棕榈酸甲酯$C_{16:0}$	27.36±8.54
8	28.956	顺-9-十六烯酸甲酯 棕榈油酸$C_{16:1}$	7.82±1.21
9	29.404	14甲基-十六烷酸甲酯	0.74±0.17
10	30.085	3,7,11,15-十六碳四烯酸$C_{16:4}$	2.01±0.26
11	32.326	硬脂酸甲酯$C_{18:0}$	3.39±0.43
12	32.791	顺-9-十八碳烯酸甲酯 油酸甲酯$C_{18:1n9}$	19.79±1.66
13	33.866	顺, 顺-9,12-十八碳二烯酸甲酯 亚油酸甲酯$C_{18:2n6c}$	16.48±1.05
14	35.527	顺, 顺, 顺-9,12,15-十八碳三烯酸甲酯 亚麻酸甲酯$C_{18:3n3}$	7.38±0.00
15	36.386	顺-6,9,12,15--十八碳四烯酸甲酯$C_{18:4}$	0.34±0.00
16	37.857	顺-11-二十碳一烯酸甲酯$C_{20:1}$	0.21±0.04
17	39.604	顺,顺-11,14-二十碳二烯酸甲酯$C_{20:2}$	0.37±0.00
18	41.562	顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸甲酯 花生四烯酸甲酯$C_{20:4n6}$	1.31±0.20
19	44.386	顺-5,8,11,14,17-二十碳五烯酸甲酯（EPA）$C_{20:5n3}$	1.71±0.34
总量		饱和脂肪酸SFA	38.07±6.70
		不饱和脂肪酸MUFA+PUFA	57.94±2.94
		单不饱和脂肪酸MUFA	28.33±2.00
		多不饱和脂肪酸PUFA	29.61±0.94

虾头中含有的主要脂肪酸为棕榈酸、油酸和亚油酸，它们均能发生氧化反应生成不同种类的挥发性风味物质。油酸和亚油酸可氧化产生醛类化合物（辛醛、壬醛、E-2-辛烯醛、己醛等），而棕榈油酸的氧化会形成醇类化合物（壬醇、1, 4-戊二醇）[48]。综上，小龙虾头中脂肪酸组成种类丰富，且含有必需脂肪酸，具有一定的营养价值，其中含有的部分脂肪酸能够有助于虾头整体风味的形成。

2.6 新鲜小龙虾头游离氨基酸组成及含量

游离氨基酸是一类重要的非挥发性风味物质，其含量与总氨基酸之间没有直接的相关性。在小龙虾头中共有 18 种游离氨基酸，总含量为 900.70 mg/100 g，其中精氨酸（203.31 mg/100 g）、丙氨酸（105.67 mg/100 g）、谷氨酸（81.29 mg/100 g）为含量最高的三种氨基酸。包含的必需氨基酸有 7 种，可为人体提供重要的营养来源。游离氨基酸作为水产品中主要的呈味物质之一，其中天门冬氨酸、甘氨酸、谷氨酸和丙氨酸是主要的呈味氨基酸[27]。甘氨酸和丙氨酸具有令人舒适的甜味，其中甘氨酸广泛存在于各种海鲜水产品中，具有更加强烈的甜味口感。精氨酸虽然具有一定的苦味，但它有益于海鲜产品整体的风味形成[49]。在小龙虾头中鲜味氨基酸含量为 85.61 mg/100 g，甜味氨基酸含量为 276.56 mg/100 g。鲜、甜味氨基酸占总游离氨基酸含量的 39.88%。甘氨酸与谷氨酸同时存在会增加食物整体的鲜味[50]。

游离氨基酸的呈味贡献程度需要考虑其含量和呈味阈值，当某些游离氨基酸的含量足够高时，它们将独立于其他风味成分对鱼的整体风味起作用，因此游离氨基酸有其独特的风味特征[51]。结合表 6 中 TAV 值可看出，呈鲜味的谷氨酸，呈甜味的丙氨酸的 TAV 值均大于 1，说明它们对虾头的鲜甜味有一定的贡献。除此之外，赖氨酸、组氨酸、精氨酸的 TAV 值也大于 1。目前，已有研究发现苯丙氨酸和酪氨酸等苦味氨基酸的含量远低于其味道阈值时，还可以增强其他氨基酸的鲜味和甜味[52]。呈味氨基酸之间或与其他呈味物质之间会有一定的协同作用，能增强鲜味，形成了小龙虾头鲜、甜的滋味。综上所

表 6　新鲜小龙虾头的游离氨基酸组成及含量(湿基)

Table 6　Free amino acid composition and content of fresh crayfish head (wet base)

呈味特性	氨基酸		阈值[23] (mg/100 mL)	游离氨基酸含量 (mg/100 g)	TAV值
鲜味氨基酸	天门冬氨酸	Asp	100	4.32	0.04
	谷氨酸	Glu	30	81.29	2.71
甜味氨基酸	丝氨酸	Ser	150	38.29	0.26
	苏氨酸	Thr*	260	30.46	0.12
	甘氨酸	Gly	130	65.76	0.51
	丙氨酸	Ala	60	105.67	1.76
	脯氨酸	Pro	300	36.38	0.12
	半胱氨酸	Cys	/	2.95	/
	缬氨酸	Val*	40	26.83	0.67
	蛋氨酸	Met*	30	17.69	0.59
	异亮氨酸	Ile*	90	18.07	0.20
	亮氨酸	Leu*	190	38.15	0.20
苦味氨基酸	酪氨酸	Tyr	/	37.13	/
	苯丙氨酸	Phe*	90	39.55	0.44
	赖氨酸	Lys*	50	81.06	1.62
	组氨酸	His	20	37.67	1.88
	精氨酸	Arg	20	203.31	4.07
	羟脯氨酸	Hypro	/	36.14	/
鲜味氨基酸总量及占比			85.61 mg/100 g	9.17%	
甜味氨基酸总量及占比			276.56 mg/100 g	30.71%	
苦味氨基酸总量及占比			538.55 mg/100 g	59.79%	
游离氨基酸总量(TFAA)			900.70 mg/100 g		

注：标“*”号为必需氨基酸，标“/”表示未有文献报道。

述，小龙虾头具有水产品特征的鲜甜滋味，如考虑利用小龙虾头进行调味料开发研究，可考虑最大程度的保留其特殊风味，达到有效成分的最大化利用。

2.7　新鲜小龙虾头呈味核苷酸组成及含量

核苷酸及其衍生物是虾、蟹类水产品的特征滋味物质，如 5’-单磷酸肌苷二钠(IMP)、5’-单磷酸鸟苷二钠(GMP)和 5’-单磷酸腺苷二钠(AMP)，它们与味精(MSG)、天冬氨酸单钠同时存在时，可以产生更强烈的鲜味[53]。通过对 3 种核苷酸标准品进行定性定量，以不同的浓度梯度绘制核苷酸浓度与峰面积之间的回归曲线，对新鲜小龙虾头进行核苷酸组成及含量分析。结果如表 7 所示，虾头中 AMP 含量为 19.502 mg/100 g，IMP 含量为 19.676 mg/100 g，GMP 含量为 9.235 mg/100 g。通过计算 TAV 值，数值均小于 1，说明 3 种呈味核苷酸不是虾头中最直接的鲜味贡献者。但是，呈味核苷酸会与 MSG、游离氨基酸以及无机离子等产生协同增鲜作用。在食品加工中，通常会使用核苷酸结合谷氨酸去增强产品的鲜味。在食品加工中，IMP 及其盐类常被用于汤、酱汁和调味料中去调和、强化整体鲜味[54]。

表 7　新鲜小龙虾头中呈味核苷酸含量及 TAV 值(湿基)

Table 7　Taste nucleotide content and TAV value in fresh crayfish head (wet basis)

呈味核苷酸	含量(mg/100 g)	阈值(mg/100 mL)	TAV值
5’-AMP	19.502±0.504	50	0.390
5’-GMP	9.235±0.103	12.5	0.739
5’-IMP	19.676±0.321	25	0.787
总量	48.413±0.928		

2.8　新鲜小龙虾头有机酸组成及含量

水产品中含有多种有机酸，它们是水产品中重要的呈味物质，可以有效改善食品的风味，包括柠檬酸、酒石酸、琥珀酸、苹果酸和乳酸。小龙虾头有机酸组成及含量如表 8 所示，在虾头中可以检测到 5 种有机酸。有研究证明，琥珀酸在与 MSG 结合时，具有增强鲜味的作用[55]，琥珀酸和乳酸是虾蟹类动物中的主要代谢产物，两者对于鲜味和海产品的特征滋味有一定的贡献[56]。琥珀酸及其钠盐主要存在于贝类等水产品中，在新鲜小龙虾头中琥珀酸和乳酸含量分别为 53.92、202.54 mg/100 g。五种有机酸的 TAV 值均大于 1，因此它们对于虾头的滋味有着直接的作用，能够赋予新鲜虾头更加柔和的酸味，丰富虾头整体的滋味。

表 8　新鲜小龙虾头中有机酸含量及 TAV 值(湿基)

Table 8　Organic acid content and TAV value in fresh crayfish head (wet basis)

有机酸种类	含量(mg/100 g)	阈值(mg/100 mL)	TAV值
柠檬酸	562.49±20.06	45	12.50
酒石酸	26.08±1.50	1.5	17.39
琥珀酸	53.92±1.68	10.6	5.09
苹果酸	293.86±9.18	50	5.88
乳酸	202.54±10.20	126	1.61

2.9　新鲜小龙虾头电子舌分析

当前已有很多研究使用电子舌与化学计量、感官结合来有效区分样品的滋味差异[57−58]。电子舌检测时选择的参比溶液为氯化钾与酒石酸以一定比例

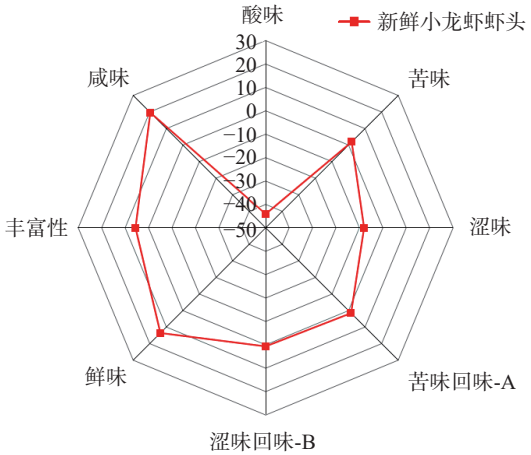

图 1　新鲜小龙虾头电子舌雷达图

Fig.1　Radar map of the electronic tongue of the fresh crayfish head

混合的溶液，该溶液测定值为无味点，将大于无味点的味觉项目作为评价对象，无味点以下的项目可以认为是样品没有的味道[59]。新鲜小龙虾头的整体滋味雷达图如图 1 所示，酸味和涩味响应值均在无味点之下，其余味觉均在无味点以上，可以作为有效的评价指标。苦味值(1.93)大于无味点，说明新鲜小龙虾头具有一定的苦味，这会影响小龙虾头整体的感受。但是，虾头鲜味值(13.55)，说明虾头鲜味明显。小龙虾头整体鲜味较为突出，但也存在一定的苦味。

2.10 新鲜小龙虾头 GC-IMS 分析

水产原料都具有自己特殊的风味，新鲜水产品通常也带有各自特殊的气味。采用 GC-IMS 对新鲜小龙虾头的挥发性物质进行检测分析。将三维谱图通过降维处理得到如图 2 所示的新鲜小龙虾头的 GC-IMS 二维谱图，图中的亮点代表新鲜虾头样品的全部顶空成分。每一个亮点代表一种挥发性有机物，由白色到红色，颜色越深代表物质含量越高，颜色越浅代表物质越低[60]。从图中可以看出，小龙虾头的挥发性组分得到较好的分离，大多数信号峰基本出现在保留时间为 100~500 s 内。

运用 GC-IMS Library Search 插件与 LAV 软件对数据进行二维定性以及特征峰区域框选，得到如图 3 的指纹图谱，在新鲜小龙虾头中共定性出 23 种化合物。其中包括正戊醛、壬醛、正己醛、乙缩醛、丁醛、甲氧乙醛、2-壬酮、2-丁酮、2,3-戊二酮、1-辛醇、丙醇、一丁醇、乙醇、乙酸乙酯、丙烯酸乙酯、呋喃、噻吩、六甲基环三硅氧烷。醛类物质有 6 种，醛类物质阈值低，对腥味的形成贡献较大[61]。己醛可以赋予食品类似青草和水果的味道，丁醛具有花、草、叶等气味[48]。壬醛主要是由油酸氧化产生的，具有一定的油脂香和肉香[62]。亚油酸和花生四烯酸的氧化可以产生正己醛，具有类似青菜的气味[63]。酮类物质则具有果香和焦甜的香气[64]。由此可知，新鲜虾头无强烈的异味，同时存在新鲜水产品独特的土腥味，虾头加工工艺需在保留其特有风味的同时，掩盖或去除异味和腥味，获得良好的风味。

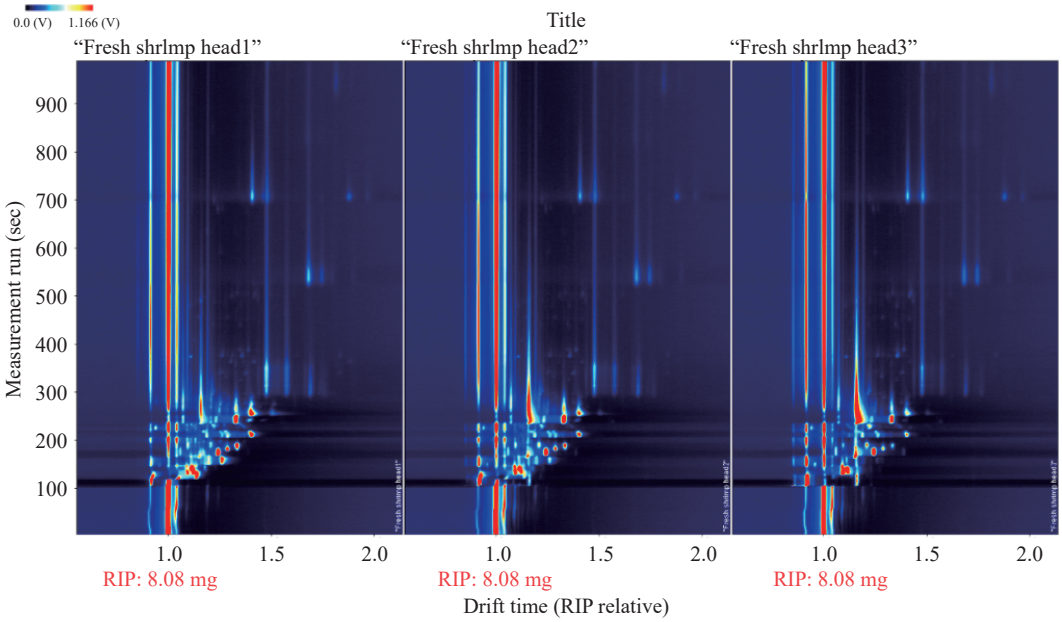

图 2 新鲜小龙虾头中挥发性有机物的 GC-IMS 二维谱图

Fig.2 GC-IMS two-dimensional profiles of volatile organic compounds in fresh crayfish heads

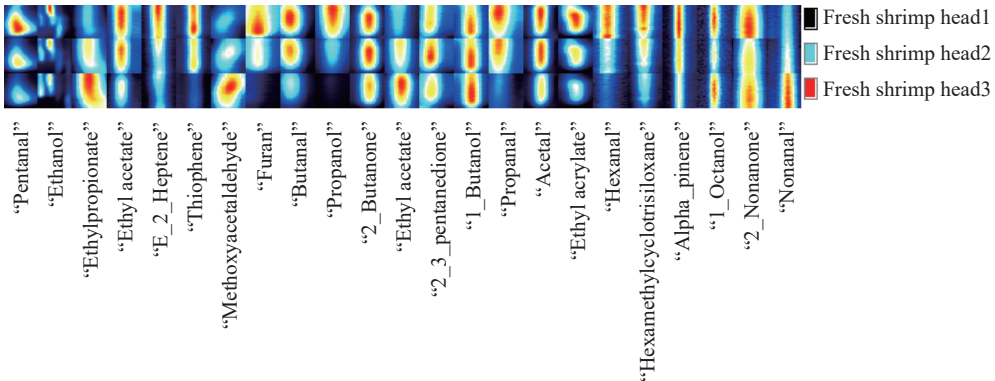

图 3 新鲜小龙虾头 GC-IMS Gallrey plot

Fig.3 GC-IMS Gallrey plot of fresh crayfish head

3　结论

本文通过对广西地区稻田养殖小龙虾头进行营养成分和风味滋味特性的分析发现，小龙虾头占比为 81.24%，营养组成丰富，其中主要以粗蛋白质和粗脂肪为主；氨基酸种类齐全，组成模式较优；脂肪酸组成丰富，其中的棕榈酸、油酸和亚油酸是重要的风味前体物质，可为热加工后的小龙虾头提供丰富的香气物质。除此之外，虾头中的非挥发性风味化合物，如游离氨基酸、呈味核苷酸和有机酸，为小龙虾头提供了丰富的滋味感受。通过分析可知，新鲜虾头的气味主要包括醛类、酮类和醇类等物质，具有一定的油脂香、肉香、类似青草和水果的味道以及土腥味等气味，电子舌鲜味响应值较为明显。综上所述，小龙虾头营养健康，含有丰富的滋味物质和风味前体物质，本研究可以为小龙虾头的高值化利用以及小龙虾风味调味料的开发提供理论基础。

参考文献

[1] 李楚君, 涂宗财, 温平威, 等. 中国小龙虾产业发展现状和未来发展趋势[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 463−470. [LI C J, TU Z C, WEN P W, et al. Development status and future trend of Chinese crawfish industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 463−470.]

[2] 全国水产技术推广总站, 中国水产学会, 中国水产流通与加工协会. 中国小龙虾产业发展报告 (2022)[N]. 中国渔业报, 2022-06-13(004). [National Aquatic Technology Promotion Station, Chinese Fisheries Society, China Aquatic Products Circulation and Processing Association. Report on the development of crawfish industry in China(2022)[N]. China Fisheries News, 2022-06-13(004).]

[3] 赵文彬, 王大鹏, 陆专灵, 等. 广西小龙虾产业现状及存在问题分析[J]. 大众科技, 2019, 21(10): 110−112. [ZHAO W B, WANG D P, LU Z L, et al. Analysis on the current situation and existing problems of crayfish industry in Guangxi[J]. Popular Science and Technology, 2019, 21(10): 110−112.]

[4] FAN H, FAN D, HUANG J, et al. Cooking evaluation of crayfish (*Procambarus clarkia*) subjected to microwave and conduction heating: A visualized strategy to understand the heat-induced quality changes of food[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62(7): e102368.

[5] DAYAKAR B, XAVIER K A M, DAS O, et al. Application of extreme halophilic archaea as biocatalyst for chitin isolation from shrimp shell waste[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, Volume ER2, 2021: 100093.

[6] 王凤霞, 张姗姗, 张轩铭, 等. 山东 4 种常见虾虾头品质分析与评价[J]. 渔业科学进展, 2022(2): 228−235. [WANG F X, ZHANG S S, ZHANG X M, et al. Analysis and evaluation of shrimp head quality from four kinds of common shrimps in Shandong province[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022(2): 228−235.]

[7] 李美春, 李子燕. 一种微波辅助低共熔溶剂从小龙虾壳中提取甲壳素的方法, 江苏省: CN114044835A[P]. 2022-02-15. [LI M C, LI Z Y. A method of extracting chitin from lobster shell by microwave assisted eutectic solvent, Jiangsu province: CN114044835A[P]. 2022-02-15.]

[8] 付星, 梁传祥, 吕继冉, 等. 南极微小杆菌 DW2 及其制备几丁寡糖的方法, 中国: 113862192A[P]. 2021-12-31. [FU X, LIANG C X, LÜ J R, et al. *Microbacillus antarctica* DW2 and its preparation method of chitosan oligosaccharides, China: 113862192A[P]. 2021-12-31.]

[9] ZHANG N L, YANG Y F, WANG W L, et al. A potential flavor seasoning from aquaculture by-products: An example of *Takifugu obscurus*[J]. LWT, 2021, 151: 112160.

[10] YU J, LU K, SUN J Y, et al. The flavor and antioxidant activity change pattern of shrimp head paste during fermentation[J]. Journal of Ocean University of China, 2022, 21(1): 195−203.

[11] CHANONKARN R, SUNISA S, WORAPONG U, et al. Quality changes of shrimp head fermented with garlic[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): e16701.

[12] 王紫微. 超声辅助酶解制备克氏原螯虾调味料的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019. [WANG Z W. Study on ultrasonic assisted enzymatic hydrolysis for preparation of crayfish flavoring[D]. Changchun: Jilin University, 2019.]

[13] 贾建波. 发酵型龙虾调味料制备工艺研究[J]. 中国调味品, 2011, 36(8): 63−66. [JIA J B. Study on the preparation process of fermented lobster seasoning[J]. China Seasoning, 2011, 36(8): 63−66.]

[14] 全沁果, 张泽伟, 陈铭, 等. 小龙虾的综合利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(3): 213−219. [QUAN Q G, ZHANG Z W, CHEN M, et al. Research progress on comprehensive utilization of crayfish[J]. Food Research and Development, 2019, 40(3): 213−219.]

[15] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.5-2016 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.5-2016 Determination of moisture in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[16] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.4-2016 食品中灰分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.4-2016 Determination of ash in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[17] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.5-2016 Determination of protein in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[18] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.6-2016 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.6-2016 Determination of fat in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[19] CHEN D W, BALAGIANNIS D P, PARKER J K. Egg yolk phospholipids: A functional food material to generate deep-fat frying odorants[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(14): 6638−6643.

[20] 国家卫生和计划生育委员会. GB/T 5537-2008 粮油检验磷脂含量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [National Health and Family Planning Commission. GB/T 5537-2008 Grain and oil inspection Determination of phospholipid content[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.]

[21] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.124-2016 食品中氨基酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.124-2016 Determination of amino acids in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[22] FAO/WHO and Hoc Expert Committee Energy and protein requirement[R]. Rome: World Health Organization, Geneva FAO, 1973.

[23] 中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所. 食品成分表

[M]. 北京: 北京人民卫生出版社, 1980. [Institute of Nutrition and Food Hygiene, Chinese Academy of Preventive Medicine. Food composition table[M]. Beijing: Beijing People's Health Publishing House, 1980.]
[24] FOLCH J M, LEE S, SLOANE-STANLEY G H. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues[J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 22(6): 24−36.
[25] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.168-2016 食品中脂肪酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.168-2016 Determination of fatty acids in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]
[26] 刘玮. 封鳊鱼营养品质、风味特征及其防腐保鲜[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017. [LIU W. Nutritional quality, flavor characteristics and preservation of the closed bream[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.]
[27] CHEN D, ZHANG M. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 1200−1205.
[28] 余远江. 五种广西优势水产原料及其油炸制品的风味特征研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021. [YU Y J. Study on the flavor characteristics of five Guangxi superior aquatic raw materials and their fried products[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.]
[29] 陈德慰. 熟制大闸蟹风味及冷冻加工技术的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007. [CHEN D W. Study on the flavor of cooked hairy crab and its freezing processing technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.]
[30] EYÉGHÉ-BICKONG H A, ALEXANDERSSON E O, GOUWS L M, et al. Optimisation of an HPLC method for the simultaneous quantification of the major sugars and organic acids in grapevine berries[J]. Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 2012, 885-886: 43−49.
[31] YOUNG-HWA H W, ISHAMRI I, SEON-TEA J. The relationship between muscle fiber composition and pork taste-traits assessed by electronic tongue system[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2018, 38(6): 1305−1314.
[32] CHEN K, YANG X, HUANG Z, et al. Modification of gelatin hydrolysates from grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) scales by Maillard reaction: Antioxidant activity and volatile compounds[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 569−578.
[33] CHEN D W, SU J, LIU X L, et al. Amino acid profiles of bivalve mollusks from Beibu Gulf, China[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2012, 21(4): 369−379.
[34] 蓝尉冰, 张庆健, 陈美花, 等. 响应面分析法优化广西北部湾南美白对虾虾头酶解工艺[J]. 中国调味品, 2019, 44(4): 97−103. [LAN W B, ZHANG Q J, CHEN M H, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of shrimp head of *Penaeus vannamei* in Beibu Gulf of Guangxi by response surface methodology[J]. China Condiment, 2019, 44(4): 97−103.]
[35] MADRIGAL S, LIMB S, RODRIGUEZA G, et al. Optimization of the preparation technology of astaxanthin microcapsule of crayfish crayfish[J]. Journal of Functional Foods, 2010, 2(2): 99−106.
[36] BYRNE D V, BREDIE W L P, MOTTRAM D S, et al. Sensory and chemical investigations on the effect of oven cooking on warmed-over flavour development in chicken meat[J]. Meat Science, 2002, 61(2): 127−139.
[37] 郭栋. 利用蛋黄磷脂提高炸鱼和薯条香气的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020. [GUO D. Study on improving the aroma of fried fish and chips with egg yolk phospholipid[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.]
[38] 李晓, 王颖, 李红艳, 等. 凡纳滨对虾虾头与肌肉营养成分分析与评价[J]. 水产科学, 2018, 37(1): 66−72. [LI X, WANG Y, LI H Y, et al. Analysis and evaluation of nutrient composition in the head and muscle of *Litopenaeus vannamei*[J]. Fisheries Science, 2018, 37(1): 66−72.]
[39] 李海波, 杨雪, 白冬, 等. 鲣鱼(*Katsuwonus pelamis*)肌肉蛋白在热处理过程中的营养变化及功能性评价[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(1): 155−160. [LI H B, YANG X, BAI D, et al. Nutritional changes and functional evaluation of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) muscle protein during heat treatment[J]. Oceans and Lakes, 2017, 48(1): 155−160.]
[40] 陈跃文, 蔡文强, 祁立波, 等. 俄罗斯鲟鱼不同部位肌肉营养组成分析与评价[J]. 中国食品学报, 2019, 19(8): 286−293. [CHEN Y W, CAI W Q, QI L B, et al. Analysis and evaluation of muscle nutritional composition in different parts of *Acipenser schrenckii*[J]. Chinese Journal of Food, 2019, 19(8): 286−293.]
[41] JIANG H F, CHENG X F, GENG L W, et al. Comparative study of the nutritional composition and toxic elements of farmed and wild *Chanodichthys mongolicus*[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limmology, 2017, 35(4): 737−744.
[42] 朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价—氨基酸比值系数法[J]. 营养学报, 1998, 10(2): 187−190. [ZHU S T, WU K. Nutritional evaluation of protein—Ratio cocfficicnt of amino acid[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 1998, 10(2): 187−190.]
[43] 刘勇. 犊牦牛肉用品质、脂肪酸及挥发性风味物质研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010. [LIU Y. Study on meat quality, fatty acids and volatile flavors of yak calves[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010.]
[44] STRANDBERG U, PALVIAINEN M, ERONEN A, et al. Spatial variability of mercury and polyunsaturated fatty acids in the European perch (*Perca fluviatilis*): Implications for risk-benefit analyses of fish consumption[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 305−314.
[45] 杨冰, 张艳凌, 姜绍通, 等. 不同地区稻田小龙虾的营养品质比较研究[J]. 肉类研究, 2021, 35(12): 7−12. [YANG B, ZHANG Y L, JIANG S T, et al. Comparative study on nutritional quality of rice-field male crayfishes from different areas[J]. Meat Research, 2021, 35(12): 7−12.]
[46] 徐斯婕, 张权, 胡明明, 等. 6 种鱼类鱼汤中脂肪酸组成和挥发性风味物质比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3115−3122. [XU S J, ZHANG Q, HU M M, et al. Comparison of fatty acid composition and volatile flavor substances in six kinds of fish soup[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2022, 13(10): 3115−3122.]
[47] 许丹, 丁国芳, 方益, 等. 7 种海产品不同部位营养成分分析与评价[J]. 营养学报, 2018, 40(4): 409−411, 414. [XU D, DING G F, FANG Y, et al. Analysis and evaluation of nutrient components in different parts of seven kinds of marine products[J]. Journal of Nutrition, 2018, 40(4): 409−411, 414.]
[48] 赵笑颖. 前处理工艺对炸制罗非鱼风味前体物质与风味作用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021. [ZHAO X Y. Study on the effect of pretreatment process on flavor precursors and flavor of fried Tilapia[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.]
[49] SPURVEY S, PAN B S, SHAHIDI F. Flavour of shellfish. In flavor of meat, meat products, and seafoods[M]. 2nd ed; Shahidi, F, ED Blackie Academic and Professional: London, United Kingdom.

1998: 159-196.
［50］翁世兵, 孙恢礼. 海产鲜味物质及海产品特征滋味的研究进展[J]. 中国调味品, 2007(11): 21−27. ［WENG S B, SUN H L. Research progress on seafood flavor substances and characteristic taste of seafood[J]. China Condiment, 2007(11): 21−27.］
［51］ANG W, SHI W, ZHOU S, et al. Research on the changes of water-soluble flavor substances in grass carp during steaming[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(11): e12993.
［52］LIOE H N, APRIYANTONO A, TAKARA K, et al. Low molecular weight compounds responsible for savory taste of Indonesian soy sauce[J]. J Agric Food Chem, 2004, 52(19): 5950−5956.
［53］YAMAGUCHI S. Measurement of the relative taste intensity of some *α*-amino acid and 5′-nucleotides[J]. J Food Sci, 1971(36): 846−849.
［54］HONG H, REGENSTEIN J M, LUO Y. The importance of ATP-related compounds for the freshness and flavor of post-mortem fish and shellfish muscle: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(9): 1787−1798.
［55］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. Comparison of nutrient and taste components between Antarctic krill and South American white shrimp[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.］
［56］KANI Y, YOSHIKAWA N, OKADA S, et al. Taste-active compoents in the mantle muscle of the oval squid *Sepioteuthis lessoniana* and their effects on squid taste[J]. Food Research International, 2008, 41(4): 3771−379.
［57］LI X Q, YANG Y H, ZHU Y T, et al. A novel strategy for discriminating different cultivation and screening odor and taste flavor compounds in Xinhui tangerine peel using E-nose, E-tongue, and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132519.
［58］WU S M, YU Q Y, SHEN S, et al. Non-targeted metabolomics and electronic tongue analysis reveal the effect of rolling time on the sensory quality and nonvolatile metabolites of congou black tea[J]. LWT, 2022, 169: 113971.
［59］乙丛敏, 杨茗媛, 申慧婷, 等. 金枪鱼碎肉酶解液对巴马香猪肉风味和滋味的作用[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 259−264. ［YI C M, YANG M Y, SHEN H T, et al. Effect of enzymatic hydrolysate of tuna minced meat on flavor and taste of Bama Xiang pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(3): 259−264.］
［60］YAO W, CAI Y, LIU D, et al. Comparative analysis of characteristic volatile compounds in Chinese traditional smoked chicken (specialty poultry products) from different regions by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Poultry Science, 2020, 99(12): 7192−7201.
［61］姚梦柯, 张敏, 罗天淇, 等. 蛋白质强化对发酵乳品质和风味特性的影响[J]. 中国乳品工业, 2021, 49(12): 21−27, 38. ［YAO M K, ZHANG M, LUO T Q, et al. The effect of protein fortification on the quality and flavor characteristics of fermented milk[J]. China Dairy Industry, 2021, 49(12): 21−27, 38.］
［62］DING A Z, ZHU M, QIAN X Q, et al. Effect of fatty acids on the flavor formation of fish sauce[J]. LWT, 2020, 134: 110259.
［63］顾赛麒, 唐锦晶, 周绪霞, 等. 腌腊鱼传统日晒干制过程中品质变化与香气形成[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 36−44. ［GU S Q, TANG J J, ZHOU X X, et al. Quality change and aroma formation in cured fish during traditional sun drying processing[J]. Food Sci, 2019, 40(17): 36−44.］
［64］张艳荣, 吕呈蔚, 刘通, 等. 不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 116−121. ［ZHANG Y R, LU C W, LIU T, et al. Analysis of volatile flavor components of *Agaricus blazei* by different drying methods[J]. Food Science, 2016, 37(10): 116−121.］