

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241223003

引用格式: 李红艳, 刘振鲁, 刘天红, 等. 凡纳滨对虾营养、滋味及质构特性分析与评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 19–30.

LI HY, LIU ZL, LIU TH, *et al.* Analysis and evaluation of nutrition, flavor and texture characteristics of *Penaeus vannamei* cultured in salt fields [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 19–30. (in Chinese with English abstract).

# 凡纳滨对虾营养、滋味及质构特性分析与评价

李红艳<sup>1,2</sup>, 刘振鲁<sup>3,4</sup>, 刘天红<sup>1,2</sup>, 王 颖<sup>1,2\*</sup>, 张帅中<sup>1,2</sup>, 姜晓东<sup>1,2</sup>, 纪 蕾<sup>1,2</sup>

(1. 山东省海洋科学研究院, 青岛 266104; 2. 青岛市水产生物品质评价与利用工程研究中心, 青岛 266104;  
3. 滨州市海洋发展研究院, 滨州 256699; 4. 滨州市水产苗种繁育与健康养殖重点实验室, 滨州 256699)

**摘 要:** **目的** 分析和评价生长在海水盐度 30‰以上的盐田蒸发池或泥沙质大水面内的生态型盐田虾(凡纳滨对虾)的营养、滋味、质构特性等品质。**方法** 以淡水养殖的凡纳滨对虾(D0)为对照, 对滨州市两种不同盐度下生产的盐田虾(凡纳滨对虾, Y45 和 Y30)的常规营养成分、氨基酸、脂肪酸、主要矿质元素、活性物质、游离氨基酸、核苷酸、季胺化合物、有机酸、质构和熟制后的色度进行分析, 并进行营养品质评价。**结果** 与淡水虾相比, 盐田虾的蛋白质和灰分含量更高, 脂肪含量更低。盐田虾和淡水虾中均检出 18 种氨基酸, 谷氨酸含量最高, 其次为天门冬氨酸, 色氨酸含量最低, 必需氨基酸占氨基酸总量的比例均高于 35.38%, 必需氨基酸指数远高于 100, 氨基酸平衡效果好, 营养价值高; 3 组对虾中脂肪酸的不饱和程度高; 盐田虾中钙、钠、氯、镁等矿质元素显著高于淡水虾, 牛磺酸和虾青素等活性物质含量远高于淡水虾, 但其熟制后的体色偏淡; 盐田虾蛋白质、磷、钠、氯、镁的营养质量指数远高于 1, 提供这些营养素的能力远大于提供热能的能力。滋味物质中, 盐田虾中游离氨基酸含量高达 3119.88 mg/100 g (Y45), 无机离子中的 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>, 甜菜碱, 酒石酸含量显著高于淡水虾, 游离氨基酸中的精氨酸、甘氨酸、丙氨酸、谷氨酸, 无机离子、甜菜碱、酒石酸、乳酸和琥珀酸是其滋味的主要贡献者, 其他有机酸、呈味核苷酸、还原糖等也为其提供了更丰富的滋味。从质构结果看, 盐田虾的肌肉硬度和剪切力低, 弹性高, 肉质更细嫩。**结论** 盐田虾(凡纳滨对虾)是一种高蛋白、低脂肪、氨基酸组成均衡、滋味鲜甜、膳食营养价值较高的食品。

**关键词:** 凡纳滨对虾; 营养成分; 滋味物质; 质构特性; 营养评价

## Analysis and evaluation of nutrition, flavor and texture characteristics of *Penaeus vannamei* cultured in salt fields

LI Hong-Yan<sup>1,2</sup>, LIU Zhen-Lu<sup>3,4</sup>, LIU Tian-Hong<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>1,2\*</sup>,  
ZHANG Shuai-Zhong<sup>1,2</sup>, JIANG Xiao-Dong<sup>1,2</sup>, JI Lei<sup>1,2</sup>

(1. Marine Biology Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China; 2. Qingdao Aquatic Organisms Quality Evaluation and Utilization Engineering Research Center, Qingdao 266104, China; 3. Binzhou Marine Development Research Institute, Binzhou 256699, China; 4. Key Laboratory of Aquatic Seedling Breeding and Healthy Aquaculture in Binzhou City, Binzhou 256699, China)

收稿日期: 2024-12-23

基金项目: 青岛市海洋科技创新专项(2024 年海洋产业关键技术攻关)(24-1-3-hygg-25-hy); 国家重点研发计划项目(2024YFD2401604); 山东省现代农业虾蟹产业技术体系项目(SDAIT-13-01)

第一作者: 李红艳(1987—), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为水产品加工及贮藏。E-mail: aqlhy2008@126.com

\*通信作者: 王颖(1971—), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为海洋资源利用。E-mail: food\_rc@sina.com

**ABSTRACT: Objective** To systematically analyze the nutrition, taste and texture characteristics of salt field shrimp, an ecological shrimp (*Penaeus vannamei*) that grows in salt field evaporation ponds or muddy and sandy water surfaces with a salinity of over 30‰. **Methods** Taking freshwater cultured *Penaeus vannamei* (D0) as control, the conventional nutritional components, amino acids, fatty acids, major mineral elements, active substances, free amino acids, nucleotides, quaternary ammonium compounds, organic acids, texture, and color after cooking of two kinds of salt field shrimps cultured in different salinity fields (*Penaeus vannamei*, recorded as Y45 and Y30 separately) in Binzhou City were analyzed, and their nutritional quality was evaluated. **Results** Compared with freshwater shrimp, salt field shrimp had higher protein and ash content, and lower fat content. The 18 kinds of amino acids were detected in both salt field shrimp and freshwater shrimp, with glutamic acid being found the highest level, followed by aspartic acid, and tryptophan the lowest content. The proportion of essential amino acids to the total amino acid content in shrimp of all 3 groups were higher than 35.38%, and the essential amino acid index was much higher than 100, indicating balanced amino acids and high nutritional value. The unsaturation degree of fatty acids in all three groups of shrimp was high and the mineral elements such as calcium, sodium, chlorine, and magnesium in salt field shrimp were significantly higher than those in freshwater shrimp. The content of active substances such as taurine and astaxanthin was much higher than that in freshwater shrimp, but their body color tended to be lighter after cooking. The nutritional quality index of protein, phosphorus, sodium, chlorine, and magnesium in salt field shrimp was much higher than 1, indicating that salt field shrimp had greater ability to provide these nutrients than to provide thermal energy. In terms of flavor substances, the content of free amino acids in salt field shrimp was as high as 3119.88 mg/100 g (Y45), and the content of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , betaine, and tartaric acid was significantly higher than that in freshwater shrimp. Free amino acids Arg, Gly, Ala, Glu, inorganic ions, betaine, tartaric acid, lactic acid, and succinic acid were the main contributors to its taste, while other organic acids, flavor nucleotides, reducing sugars, etc. also provided it with richer taste. From the texture results, it could be seen that the muscle hardness and shear force of salt field shrimp were low and the elasticity was high, which means the meat of salt field shrimp was more tender than that of freshwater shrimp. **Conclusion** In summary, salt field shrimp (*Penaeus vannamei*) is a food with high protein, low fat, balanced amino acid composition, fresh and sweet taste, and high dietary nutritional value.

**KEY WORDS:** *Penaeus vannamei*; nutritional composition; taste compounds; texture characteristics; nutrition evaluation

## 0 引言

盐田虾,指生长在海水盐度 30‰以上的盐田蒸发池或泥沙质大水面内的生态型对虾,以南美白对虾为主。因生长水域的含盐量是普通海水的 2~3 倍,以天然海藻、卤虫、微生物为食,形成了“体色清亮、肉质紧糯、味美鲜甜、品质野生”的特性,深受消费者的喜爱。

南美白对虾,学名凡纳滨对虾(*Penaeus vannamei*),是世界上养殖产量最高的三大优良虾种之一,具有广盐性、生长快、肉质鲜美、抗病力强等优点,深受市场青睐。目前,在盐度对凡纳滨对虾影响的研究主要集中于对其生长、生理特性和免疫机制等方面<sup>[1-3]</sup>,也有学者对不同盐度凡纳滨对虾的营养成分和品质进行了评价和研究,如陈琴等<sup>[4]</sup>对盐度 6.6 和淡水养殖的凡纳滨对虾进行了含肉率、基本营养成分、氨基酸和矿物质元素的分析和评价;黄凯等<sup>[5]</sup>对室内不同盐度(0、1‰、5‰、10‰、20‰、30‰)

养殖凡纳滨对虾的生长、成活率和肌肉营养成分进行了分析和评价;李晓等<sup>[6]</sup>研究了不同盐度(5‰、26‰、30‰、50‰)对养殖凡纳滨对虾肌肉基本营养成分、氨基酸和脂肪酸含量的影响。上述研究主要关注盐度对凡纳滨对虾营养成分的影响,未对高盐条件下其活性成分和滋味物质等进行分析,难以全面反映不同盐度养殖凡纳滨对虾的品质差异;且目前鲜有对盐田虾营养和滋味成分的系统分析和评价。

本研究对滨州地区高盐度条件下生长的盐田虾(凡纳滨对虾)进行营养、滋味、活性成分和质构特点等方面的比较分析,旨在了解盐田虾与淡水养殖虾在营养品质、滋味等方面的差异,以期扩充盐碱地凡纳滨对虾营养学资料,为推动盐田虾的健康养殖和产品加工提供基础资料和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

盐田虾,取自山东省滨州市无棣县(盐度分别为 45‰

和 30%, 分别记为 Y45 和 Y30), 自 2024 年 5 月下旬放苗, 苗种 1 cm 左右, 每亩放苗 8000~12000 尾, 采取大塘散养方式养殖, 不投喂饵料, 3 个月后取样。Y45 组凡纳滨对虾体质量为(6.68±1.72) g, 体长为(9.24±1.01) cm; Y30 组凡纳滨对虾体质量为(8.01±2.18) g, 体长为(10.15±0.61) cm; 淡水虾取自山东省滨州市博兴县, 自 2024 年 4 月中旬左右放苗, 苗种 1 cm 左右, 每亩放苗 3 万~5 万尾, 采取池塘高密度精养模式养殖 3 个月后取样。淡水凡纳滨对虾(记为 D0)体质量为(22.69±3.29) g, 体长为(13.67±0.74) cm。将盐田虾和淡水虾样品各分成 3 份, 盐田虾每份 60 ind, 淡水虾每份 30 ind, 解剖取出腹部肌肉, 捣碎并混合均匀, 装入样品袋中-20 °C 冻存, 留待检测营养及活性成分。另将盐田虾和淡水虾各取 10 ind 剥壳后取第二虾节用于剪切力和质地剖面分析(texture profile analysis, TPA)检测。所有检测于 15 d 之内完成。

混合氨基酸标准品(纯度≥99%, wako 日本和光纯药工业株式会社); 核苷酸标准品、苹果酸、L-乳酸、柠檬酸、L-酒石酸、琥珀酸标准品(纯度≥98%, 上海源叶生物科技有限公司); 甜菜碱(纯度 97%, 上海安普实验科技股份有限公司); 胆碱酒石酸氢盐[纯度 99.90%, BePure 曼哈格(上海)生物科技有限公司]; 氯化胆碱-D4(纯度 98.7%, 天津阿尔塔科技有限公司); 甲醇、乙醇、正己烷、乙腈(色谱纯, 美国天地公司); 石油醚、氯仿、无水乙醚、氢氧化铵、盐酸、甲酸、硫酸、硫酸钠、柠檬酸钠、氯化钠、碳酸钠、乙酸钠、盐酸甲胺、硫酸铜、硫酸氢钠、氢氧化钾、硫酸钾、硼酸、氢氧化钠、亚铁氰化钾、乙酸锌、N-氯-对甲苯磺酰胺钠盐、2,6-二叔丁基对甲酚、对二甲氨基苯甲醛、乙酸胺、硝酸银、冰乙酸、丙酮(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

## 1.2 仪器与设备

日立 LA8080 氨基酸自动分析仪(日立高新技术公司); Thermo U3000 超高效液相色谱仪、ICS5000+高压离子色谱系统、Hypersil ODS-2 C<sub>18</sub> 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm)(美国赛默飞世尔科技公司); 赛多利斯 CPA225D 电子分析天平[d=0.01 mg, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; Kjelttec 8400 全自动蛋白测定仪、Soxtec 8000 全自动脂肪测定仪(丹麦 FOSS 公司); GC6890 气相色谱仪、LC1290-6495C 三重四极杆液质联用系统(美国安捷伦有限公司); TMS-PRO 质构仪(美国 FTC 公司); CS-650A 全自动多功能色差仪(杭州彩谱科技有限公司)。

## 1.3 方法

### 1.3.1 营养成分测定

常规营养成分测定: 水分采用 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》105 °C 直接干燥法; 灰分采用 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》高温(550 °C)灰化法; 粗蛋白质采用 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》

凯氏定氮法; 粗脂肪采用 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》索式抽提法。

氨基酸测定: 参照 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》和 GB/T 18246—2019《饲料中氨基酸的测定》对样品进行前处理, 采用氨基酸自动分析仪检测其含量。

脂肪酸测定: 参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》, 样品经酸水解后, 加入甘油三酯和 C11:0 作为内标, 以乙醚萃取脂质, 然后于甲醇中以 BF<sub>3</sub> 转化为脂肪酸甲酯, 气相色谱仪(安捷伦 GC6890)分析。

磷、铁、镁、钾、钠、钙、锌的测定: 参照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第二法进行测定。

碘的测定: 参照 GB 5009.267—2020《食品安全国家标准 食品中碘的测定》第一法进行测定。

氯化物的测定: 参照 GB 5009.44—2016《食品安全国家标准 食品中氯化物的测定》第一法进行测定。

### 1.3.2 活性成分测定

虾青素的测定: 参照 SN/T 2327—2009《进出口动物源性食品中角黄素、虾青素的检测方法》测定。

牛磺酸的测定: 参照 GB 5009.169—2016《食品安全国家标准 食品中牛磺酸的测定》第二法进行测定。

羟脯氨酸的测定: 参照 GB/T 9695.23—2008《肉与肉制品 羟脯氨酸含量测定》测定。

### 1.3.3 滋味物质测定

游离氨基酸的测定: 参考 CHEN 等<sup>[7]</sup>的方法并略作调整, 采用氨基酸自动分析仪检测。

甜菜碱的测定: 参照 GB/T 23710—2009《饲料中甜菜碱的测定 离子色谱法》测定。

胆碱的测定: 参照 GB 5413.20—2022《食品安全国家标准 婴幼儿食品和乳品中胆碱的测定》第三法 液相色谱-串联质谱法测定。

有机酸的测定: 参照 GB 5009.157—2016《食品安全国家标准 食品中有机酸的测定》, 色谱条件为 Hypersil ODS-2 C<sub>18</sub> 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm), 流动相分别为 0.1% 的磷酸溶液和甲醇, 检测波长 210 nm, 柱温 40 °C, 进样量 20 μL。

游离核苷酸的测定: 参照 GB 5413.40—2016《食品安全国家标准 婴幼儿食品和乳品中核苷酸的测定》测定。

还原糖的测定: 参照 GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》第一法直接滴定法测定

### 1.3.4 滋味物质呈味强度评价

采用呈味强度值(taste activity value, TAV)评价呈味物质对整体的味觉贡献, 见公式(1):

$$TAV = \frac{C}{T} \quad (1)$$

式中: C 为滋味物质含量, mg/100 g; T 为滋味物质的滋味阈

值, mg/100 g。

### 1.3.5 色差值测定

将盐田虾和淡水虾分别煮熟后, 立即采用全自动色差计测量对虾第二腹节处的  $L^*$ (亮度属性)、 $a^*$ (红/绿色度)、 $b^*$ (黄/蓝色度), 每组对虾测 3 个平行样, 每个样品重复测量 5 次, 取平均值作为最终结果。色差计经黑白校正后进行检测。对虾的色彩度强度( $C$ )按式(2)计算<sup>[8]</sup>。

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

### 1.3.6 质构特性测定

TPA: 取虾剥壳后的第二虾节, 采用 50 N 力量感应元, 直径 25.4 mm 圆柱形探头, 触发力 0.08 N, 测试速度 60 mm/min, 形变量 50%; 每组对虾各测定 5 组数据, 取平均值。

剪切力: 采用 50 N 力量感应元, 直径 25.4 mm 圆柱形探头, 精准切割刀刃探头, 触发力 0.08 N, 测试速度 60 mm/min, 保证样品完全切断; 每组各测定 5 组数据, 取平均值。

### 1.3.7 营养价值评价

#### (1) 氨基酸品质评价

根据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)/世界卫生组织(World Health Organization, WHO)建议的氨基酸计分标准模式<sup>[9]</sup>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化学评分进行评价, 按式(3)~(5)计算凡纳滨对虾的氨基酸分(amino acid score, AAS)、化学分(chemical score, CS)和必需氨基酸指数(essential amino acid index, EAAI)<sup>[10]</sup>。

$$AAS = \frac{M_1}{M_0} \times 100 \quad (3)$$

$$CS = \frac{M_1}{M_2} \times 100 \quad (4)$$

$$EAAI = \sqrt[n]{\frac{100a}{A} \times \frac{100b}{B} \times \frac{100c}{C} \times \dots \times \frac{100h}{H}} \quad (5)$$

式中:  $M_1$  为待评蛋白质中必需氨基酸的含量, mg/g N;  $M_0$  为 FAO/WHO 模式中蛋白质相应必需氨基酸的含量, mg/g N;  $M_2$  为鸡蛋蛋白质中相应必需氨基酸的含量, mg/g N;  $n$  为比较的氨基酸种数;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ... $h$  分别为待评蛋白质的氨基酸含量, mg/g N;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ... $H$  分别为鸡蛋蛋白质的氨基酸含量, mg/g N。

#### (2) 脂肪酸品质评价

血栓形成指数(thrombosis index, IT)和动脉粥样硬化指数(atherosclerosis index, IA)是评估脂肪酸对人类心血管疾病发生影响的指标, 其计算公式<sup>[11]</sup>为(6)、(7):

$$IT = \frac{C_{14:0} + C_{16:0} + C_{18:0}}{0.5 \times \sum MUFA + 0.5 \times \sum PUFA(n-6) + 3 \times \sum PUFA(n-3) + \sum PUFA(n-6)} \quad (6)$$

$$IA = \frac{C_{12:0} + C_{14:0} + C_{16:0}}{\sum MUFA + \sum PUFA} \quad (7)$$

式中: MUFA 为单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid); PUFA 为多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid)。

#### (3) 营养指数评价

营养质量指数(index of nutritional quality, INQ)是指食物中营养素能满足人体营养需要的程度(营养素密度)与该食物能满足人体能量需要的程度(热能密度)的比值, 其计算公式为(8)~(10)<sup>[12]</sup>。

$$\text{营养素密度}/\% = \frac{\text{一定量某种食物中营养素含量(湿重)}}{\text{人体中该营养素供给量标准}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{热能密度}/\% = \frac{\text{一定量某种食物产生的热量}}{\text{热能供给标准}} \times 100\% \quad (9)$$

$$INQ/\% = \frac{\text{营养素密度}}{\text{热能密度}} \times 100\% \quad (10)$$

## 1.4 数据处理

采用 EXCEL 2010 和 SPSS 20.0 对数据进行统计和方差分析, 结果以平均值 $\pm$ 标准偏差( $\bar{x} \pm s$ )表示, 采用单因素方差进行数据显著性分析,  $P < 0.05$  表示数据统计学差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 常规营养成分分析

本研究中的 Y45 和 Y30 对虾由于养殖过程中几乎不投喂饵料, 其个体大小和体重显著小于淡水虾。对 3 组对虾进行常规营养成分测定, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 随着养殖环境盐度降低, 虾的水分含量和粗脂肪含量逐渐升高, 其中各组间粗脂肪含量差异显著, Y45 组对虾的水分含量与 D0 组和 Y30 组对虾间差异显著( $P < 0.05$ ); 养殖环境盐度降低, 粗蛋白和灰分含量呈下降趋势, 且各组间差异显著( $P < 0.05$ )。此研究结果与李晓等<sup>[6]</sup>认为凡纳滨对虾中水分和蛋白含量与盐度相关联, 盐度升高, 含水量下降, 蛋白质含量升高的结论一致, 与文国樑等<sup>[15]</sup>认为淡水养殖对虾水分和脂肪含量高于海水养殖对虾, 蛋白质和灰分含量低于海水养殖对虾的结论一致。Y45 组对虾的蛋白含量高达(23.21 $\pm$ 0.44) g/100 g, 同时其灰分含量也高达(2.30 $\pm$ 0.15) g/100 g, 富含矿物质元素。

本研究中测得的盐田虾(Y45)粗蛋白含量高于黄艳青等<sup>[14]</sup>报道的上海奉贤地区海水池塘(盐度 12.14‰)养殖 4 个月的凡纳滨对虾和黄薇等<sup>[15]</sup>报道的立体混养模式下(淡水)养殖的凡纳滨对虾, 但低于李晓等<sup>[6]</sup>报道的在盐度 50‰条件下饲料投喂养殖 3 个月的凡纳滨对虾。这种差异可能是由养殖环境盐度、养殖周期及饲料投喂等的不同所导致的。

表 1 3 组凡纳滨对虾的常规营养成分分析(g/100 g, 湿重, n=3)  
Table 1 Conventional nutrient analysis in 3 groups of *Penaeus vannamei* (g/100 g, wet weight, n=3)

| 样品                    | 水分                      | 粗蛋白                     | 粗脂肪                    | 灰分                     |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Y45                   | 73.02±0.47 <sup>a</sup> | 23.21±0.44 <sup>a</sup> | 0.51±0.06 <sup>a</sup> | 2.30±0.15 <sup>a</sup> |
| Y30                   | 76.20±0.68 <sup>b</sup> | 21.06±0.38 <sup>b</sup> | 0.70±0.11 <sup>b</sup> | 1.71±0.12 <sup>b</sup> |
| D0                    | 76.91±0.72 <sup>b</sup> | 20.12±0.36 <sup>b</sup> | 0.90±0.08 <sup>c</sup> | 1.30±0.14 <sup>c</sup> |
| 凡纳滨对虾 <sup>[13]</sup> | 75.15±1.58              | 22.34±1.31              | 0.98±0.06              | 1.67±0.13              |
| 凡纳滨对虾 <sup>[6]</sup>  | 71.50±0.09              | 25.60±0.20              | 1.00±0.09              | 1.80±0.05              |
| 凡纳滨对虾 <sup>[14]</sup> | 77.17±0.18              | 21.38±0.17              | 0.80±0.03              | 1.39±0.01              |

注: 同列数据上标注的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 表 7 同。

2.2 氨基酸组成与营养品质评价

2.2.1 氨基酸组成评价

由表 2 可知, 3 组凡纳滨对虾均检出 18 种氨基酸, 包括 8 种必需氨基酸, 氨基酸种类齐全。从氨基酸组成上来看, 3 组对虾的谷氨酸含量最高, 其次为天门冬氨酸, 色氨酸含量最低。其中, 有 9 种氨基酸在 3 组对虾间差异不显著, 有 4 种氨基酸(谷氨酸、甘氨酸、精氨酸、脯氨酸)在 3 组间差异显著( $P<0.05$ )。3 组对虾的 TAA 呈 Y45>D0>Y30 趋势且差异显著( $P<0.05$ ), DAA 呈 Y45>D0>Y30 趋势, 与彭永兴等<sup>[16]</sup>报道的海水凡纳滨对虾 TAA、EAA、DAA 显著高于淡水凡纳滨对虾不一致, 这可能是养殖环境、投喂饲料、样品个体大小等不同导致的。根据 FAO/WHO 的理想模式, 质量较好的蛋白质其 EAA 与 NEAA 比值 EAA/NEAA 为 60%以上, EAA 与 TAA 比值 EAA/TAA 为 35.38%左右<sup>[17]</sup>。3 组对虾的 EAA/NEAA 均在 60%以上, EAA/TAA 均高于 35.38%, 氨基酸平衡效果好, 是优质的蛋白来源。

2.2.2 氨基酸营养品质评价

AAS 和 CS 是反映食物蛋白质构成和利用率关系的重要指标。根据表 3 数据, 从 AAS 来看, Y45 和 D0 组对虾的赖氨酸最高, 第一限制性氨基酸为色氨酸, 第二限制性氨基酸为缬氨酸; Y30 对虾的 AAS 以酪氨酸+苯丙氨酸最高, 第一限制性氨基酸为苏氨酸, 第二限制性氨基酸为色氨酸。从 CS 来看, Y45 和 D0 组对虾赖氨酸得分最高, Y30 对虾的 CS 以酪氨酸+苯丙氨酸得分最高, 3 组对虾的第一限制性氨基酸为色氨酸, 第二限制性氨基酸为半胱氨酸+蛋氨酸。为了保持饮食平衡, 在食用凡纳滨对虾时, 建议搭配富含色氨酸和半胱氨酸+蛋氨酸的食物进行相应的补充, 如小米、花生、大豆、瘦肉、鸡蛋等。

EAAI 是评价食物蛋白质质量的重要指标, 它可以反映食物蛋白与标准蛋白的必需氨基酸组成接近程度和蛋白质的消化利用率<sup>[18]</sup>。3 组对虾的 EAAI 由高到低依次为 Y45>D0>Y30。根据 EAAI 值适用评价标准<sup>[19-20]</sup>, EAAI>95

表 2 3 组凡纳滨对虾的氨基酸组成(g/100 g, 干重, n=3)  
Table 2 Amino acids composition in 3 groups of *Penaeus vannamei* (g/100 g, dry weight, n=3)

| 名称           | Y45                     | Y30                     | D0                       |
|--------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 天门冬氨酸*       | 7.93±0.32 <sup>a</sup>  | 7.31±0.16 <sup>b</sup>  | 7.58±0.22 <sup>b</sup>   |
| 苏氨酸 #        | 3.15±0.12 <sup>a</sup>  | 2.82±0.11 <sup>b</sup>  | 3.03±0.09 <sup>a</sup>   |
| 丝氨酸          | 2.74±0.10 <sup>a</sup>  | 2.52±0.13 <sup>a</sup>  | 2.73±0.06 <sup>a</sup>   |
| 谷氨酸*         | 13.07±0.25 <sup>a</sup> | 12.90±0.46 <sup>b</sup> | 13.90±0.48 <sup>c</sup>  |
| 甘氨酸*         | 6.41±0.23 <sup>a</sup>  | 5.84±0.21 <sup>b</sup>  | 5.32±0.19 <sup>c</sup>   |
| 丙氨酸*         | 5.30±0.16 <sup>a</sup>  | 5.21±0.18 <sup>a</sup>  | 5.80±0.18 <sup>b</sup>   |
| 缬氨酸 #        | 3.67±0.17 <sup>a</sup>  | 3.82±0.06 <sup>a</sup>  | 3.64±0.11 <sup>a</sup>   |
| 异亮氨酸 #       | 3.44±0.13 <sup>a</sup>  | 3.57±0.14 <sup>a</sup>  | 3.38±0.12 <sup>a</sup>   |
| 亮氨酸 #        | 6.15±0.18 <sup>a</sup>  | 6.30±0.17 <sup>a</sup>  | 6.19±0.24 <sup>a</sup>   |
| 酪氨酸          | 3.11±0.06 <sup>a</sup>  | 3.15±0.10 <sup>a</sup>  | 3.20±0.12 <sup>a</sup>   |
| 苯丙氨酸 #       | 3.44±0.08 <sup>a</sup>  | 3.61±0.10 <sup>a</sup>  | 3.59±0.13 <sup>a</sup>   |
| 赖氨酸 #        | 6.48±0.26 <sup>a</sup>  | 5.08±0.21 <sup>b</sup>  | 6.54±0.26 <sup>a</sup>   |
| 组氨酸△         | 1.70±0.09 <sup>a</sup>  | 1.76±0.08 <sup>a</sup>  | 1.90±0.09 <sup>a</sup>   |
| 精氨酸△         | 7.37±0.18 <sup>a</sup>  | 3.32±0.09 <sup>b</sup>  | 4.50±0.15 <sup>c</sup>   |
| 脯氨酸          | 4.30±0.14 <sup>a</sup>  | 3.40±0.14 <sup>b</sup>  | 4.72±0.20 <sup>c</sup>   |
| 胱氨酸          | 1.00±0.06 <sup>a</sup>  | 1.05±0.06 <sup>a</sup>  | 0.95±0.04 <sup>a</sup>   |
| 蛋氨酸 #        | 2.00±0.08 <sup>a</sup>  | 2.27±0.09 <sup>b</sup>  | 2.21±0.07 <sup>b</sup>   |
| 色氨酸 #        | 0.70±0.07 <sup>a</sup>  | 0.71±0.06 <sup>a</sup>  | 0.74±0.05 <sup>a</sup>   |
| TAA          | 81.96±1.37 <sup>a</sup> | 74.66±0.87 <sup>b</sup> | 79.91±1.08 <sup>c</sup>  |
| EAA          | 29.04±0.56 <sup>a</sup> | 28.19±0.28 <sup>b</sup> | 29.31±0.48 <sup>ab</sup> |
| SEAA         | 9.07±0.29 <sup>a</sup>  | 5.08±0.31 <sup>b</sup>  | 6.41±0.36 <sup>c</sup>   |
| NEAA         | 43.85±0.55 <sup>a</sup> | 41.39±0.57 <sup>b</sup> | 44.20±0.63 <sup>ac</sup> |
| (EAA/NEAA)/% | 66.22±0.27 <sup>a</sup> | 68.12±0.46 <sup>b</sup> | 66.31±0.23 <sup>a</sup>  |
| (EAA/TAA)/%  | 35.43±0.84 <sup>a</sup> | 37.76±0.35 <sup>b</sup> | 36.67±0.76 <sup>c</sup>  |
| DAA          | 32.70±0.49 <sup>a</sup> | 31.26±0.46 <sup>b</sup> | 32.60±0.58 <sup>a</sup>  |
| (DAA/TAA)/%  | 39.90±0.51 <sup>a</sup> | 41.87±0.55 <sup>b</sup> | 40.79±0.64 <sup>a</sup>  |

注: 氨基酸总量(total amino acids, TAA); 必需氨基酸(essential amino acids, EAA); 半必需氨基酸(semi-essential amino acids, SEAA); 非必需氨基酸(non-essential amino acids, NEAA); 呈味氨基酸(delicious amino acids, DAA); #表示 EAA; \*表示 DAA; △表示 SEAA。同行数据上标注的不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 表 4、5、6、9、10 同。

表 3 3 组凡纳滨对虾的 EAA 组成的评价  
Table 3 Evaluation of EAA composition in 3 groups of *Penaeus vannamei*

| 氨基酸      | FAO/WHO 模式 | 鸡蛋蛋白质 | Y45    |        | Y30    |       | D0     |        |
|----------|------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
|          |            |       | AAS    | CS     | AAS    | CS    | AAS    | CS     |
| 异亮氨酸     | 250        | 331   | 101.08 | 76.34  | 102.38 | 77.32 | 103.23 | 77.96  |
| 亮氨酸      | 440        | 534   | 102.51 | 84.47  | 101.46 | 83.60 | 101.05 | 83.26  |
| 赖氨酸      | 340        | 441   | 139.87 | 107.84 | 105.92 | 81.66 | 138.09 | 106.46 |
| 半胱氨酸+蛋氨酸 | 220        | 386   | 100.05 | 57.02  | 106.87 | 60.91 | 103.18 | 58.81  |
| 苏氨酸      | 250        | 292   | 92.40  | 79.11  | 79.75  | 68.28 | 87.08  | 74.55  |
| 色氨酸      | 63         | 106   | 81.94  | 48.70  | 80.36  | 47.76 | 83.93  | 49.88  |
| 缬氨酸      | 310        | 441   | 86.77  | 61.00  | 87.36  | 61.41 | 84.25  | 59.23  |
| 酪氨酸+苯丙氨酸 | 380        | 565   | 126.57 | 85.13  | 126.10 | 84.81 | 128.47 | 86.40  |
| 氨基酸平均分   |            |       | 103.90 |        | 98.77  |       | 103.66 |        |
| EAAI     |            |       | 144.41 |        | 136.92 |       | 143.86 |        |

注: FAO/WHO 模式、鸡蛋蛋白质数据的单位为(mg/g N)。

为优质蛋白源, 86<EAAI<95 为良好蛋白源, 75<EAAI<86 为可用蛋白源, EAAI<75 为不适用蛋白源。由表 3 可见, 3 组对虾的 EAAI 值均高于 100, 高于斑节对虾(76.15)<sup>[21]</sup>、刀额新对虾(73.70)<sup>[22]</sup>、淡水石斑鱼(82.56)<sup>[23]</sup>、红罗非鱼(85.10)<sup>[23]</sup>, 为优质蛋白源。综合来看, 3 组凡纳滨对虾的氨基酸种类丰富, 组成合理, 营养价值较高。

2.3 脂肪酸组成及评价

脂肪的氧化是肉类产生香气的主要原因, 尤其是不饱和脂肪酸能显著增加香味<sup>[24]</sup>。由表 4 可知, Y45 和 Y30 对虾肌肉中检出 8 种脂肪酸, D0 对虾检出 7 种脂肪酸, 远少于李晓等<sup>[6]</sup>和黄薇等<sup>[15]</sup>报道的凡纳滨对虾肌肉脂肪酸种类(分别为 17 种和 21 种), 这可能是由于取样时间、检测方法、养殖模式和投喂饵料等不同导致的。3 组对虾中脂肪酸含量较高的是棕榈酸(C16:0)、油酸(C18:1)。UFA 中, EPA (C20:5)含量呈 Y45>Y30>D0 趋势, 且差异显著; 亚油酸(C18:2)含量呈 Y45<Y30<D0 趋势, 且差异显著; Y45 对虾肌肉中 DHA 未检出, 而 Y30 中和 D0 对虾肌肉的  $\alpha$ -亚麻酸(C18:3)未检出。3 组对虾肌肉的 PUFA 占比呈 Y45<Y30<D0, 与文国樑等<sup>[13]</sup>测定的淡水凡纳滨对虾肌肉 PUFA 高于海水对虾一致。3 组对虾的 IA 和 IT 远低于牛肉和羊肉(IA 分别为 0.71 和 1.00; IT 分别为 1.06 和 1.58)<sup>[25]</sup>, 说明 3 组凡纳滨对虾肌肉脂肪酸的不饱和程度高, 具有抑制动脉硬化、抗血栓和软化血管的作用。

2.4 矿质元素含量

凡纳滨对虾的矿质元素种类和含量受生长环境的影响较大。由表 5 可知, 3 组对虾的钙、镁、磷、铁、钾、锌等矿质元素含量较为丰富; 受高盐生活环境的影响, 盐田虾的钙、钠、氯、镁等矿质元素显著高于 D0 组, 其中, Y45 的钙含量约是 D0 的 2 倍。钙是动物不可或缺的常量

表 4 3 组凡纳滨对虾的脂肪酸组成(%)  
Table 4 Fatty acid composition in 3 groups of *Penaeus vannamei* (%)

| 脂肪酸                       | Y45                     | Y30                      | D0                       |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 棕榈酸 C16:0                 | 23.74±0.06 <sup>a</sup> | 23.71±0.05 <sup>a</sup>  | 24.35±0.06 <sup>a</sup>  |
| 硬脂酸 C18:0                 | 10.89±0.05 <sup>a</sup> | 12.17±0.08 <sup>b</sup>  | 12.17±0.06 <sup>b</sup>  |
| 棕榈油酸 C16:1                | 11.37±0.01 <sup>a</sup> | 6.10±0.05 <sup>b</sup>   | ND <sup>c</sup>          |
| 油酸 C18:1 (n-9)            | 19.67±0.16 <sup>a</sup> | 16.61±0.05 <sup>b</sup>  | 18.49±0.05 <sup>c</sup>  |
| 亚油酸 C18:2 (n-6)           | 7.19±0.04 <sup>a</sup>  | 14.47±0.09 <sup>b</sup>  | 18.84±0.13 <sup>c</sup>  |
| $\alpha$ -亚麻酸 C18:3 (n-3) | 4.44±0.01 <sup>a</sup>  | ND <sup>b</sup>          | ND <sup>b</sup>          |
| 花生四烯酸 C20:4 (n-6)         | 5.26±0.01 <sup>a</sup>  | 4.15±0.01 <sup>b</sup>   | 3.75±0.04 <sup>b</sup>   |
| EPA C20:5 (n-3)           | 17.30±0.13 <sup>a</sup> | 12.56±0.07 <sup>b</sup>  | 10.79±0.03 <sup>c</sup>  |
| DHA C22:6 (n-3)           | ND <sup>a</sup>         | 10.22±0.04 <sup>b</sup>  | 11.58±0.06 <sup>c</sup>  |
| $\Sigma$ SFA              | 34.63±0.08 <sup>a</sup> | 35.78±0.04 <sup>b</sup>  | 36.54±0.04 <sup>bc</sup> |
| $\Sigma$ MUFA             | 31.04±0.09 <sup>a</sup> | 22.72±0.06 <sup>b</sup>  | 18.49±0.05 <sup>c</sup>  |
| $\Sigma$ PUFA             | 34.19±0.14 <sup>a</sup> | 41.53±0.10 <sup>b</sup>  | 44.94±0.16 <sup>c</sup>  |
| $\omega$ -3 脂肪酸           | 21.74±0.13 <sup>a</sup> | 22.78±0.08 <sup>a</sup>  | 22.37±0.08 <sup>a</sup>  |
| $\omega$ -6 脂肪酸           | 12.44±0.03 <sup>a</sup> | 18.63±0.10 <sup>b</sup>  | 22.59±0.12 <sup>c</sup>  |
| $\omega$ -9 脂肪酸           | 19.67±0.16 <sup>a</sup> | 16.61±0.05 <sup>b</sup>  | 18.49±0.05 <sup>c</sup>  |
| $\Sigma$ UFA              | 65.19±0.18 <sup>a</sup> | 64.22±0.11 <sup>ab</sup> | 63.46±0.14 <sup>b</sup>  |
| EPA+DHA                   | 17.30±0.13 <sup>a</sup> | 22.78±0.09 <sup>b</sup>  | 22.37±0.05 <sup>b</sup>  |
| IA                        | 0.36                    | 0.37                     | 0.38                     |
| IT                        | 0.05                    | 0.07                     | 0.11                     |

注: 二十碳五烯酸(EPA); 二十二碳六烯酸(DHA); 饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA); 不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA); ND 表示未检出, 表 6、10 同。

元素, 具有维持神经与肌肉活动、促进生长发育, 维持细胞正常功能等多种活性; 铁具有促进血红蛋白合成, 缓解贫血等功能; 镁具有促进骨骼代谢、调节激素和能量代谢等作用; 锌具有增强创伤组织再生、提高食欲和免疫力的

作用; 碘具有促进蛋白质合成, 参与人体营养吸收和脂肪代谢等作用。盐田虾的矿质元素含量非常丰富, 是补钙和补充多种矿质元素的良好食物来源。

矿质元素不仅影响凡纳滨对虾的营养品质, 也影响对虾的货架期和风味<sup>[26]</sup>, 如铜、铁等可引起不饱和脂肪酸的氧化, 钠、钾、镁、钙等离子呈咸味, 锌离子呈甜味, 氯本身无味, 但能起到修饰风味的作用<sup>[27]</sup>。盐田虾(Y45 和 Y30)中的铁含量显著低于 D0 淡水虾, 提示盐田虾的脂肪酸不易被氧化; 钠、钙、氯、镁含量显著高于淡水虾, 这可能是盐田虾风味与淡水虾存在较大差异的原因之一。

| 表 5 3 组凡纳滨对虾的主要矿质元素含量(湿基)<br>Table 5 Main mineral content in 3 groups of <i>Penaeus vannamei</i> (wet basis) |                             |                             |                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 矿质元素                                                                                                         | Y45                         | Y30                         | D0                          |
| 磷/(mg/kg)                                                                                                    | 2780.00±138.00 <sup>a</sup> | 2590.00±206.00 <sup>b</sup> | 2780.00±231.00 <sup>a</sup> |
| 铁/(mg/kg)                                                                                                    | 5.81±0.29 <sup>a</sup>      | 6.45±0.18 <sup>a</sup>      | 8.25±0.19 <sup>b</sup>      |
| 镁/(mg/kg)                                                                                                    | 644.00±24.00 <sup>a</sup>   | 508.00±27.00 <sup>b</sup>   | 404.00±18.00 <sup>c</sup>   |
| 钾/(mg/kg)                                                                                                    | 3760.00±225.00 <sup>a</sup> | 3650.00±184.00 <sup>a</sup> | 3610.00±164.00 <sup>a</sup> |
| 钠/(mg/kg)                                                                                                    | 4570.00±298.00 <sup>a</sup> | 2840.00±152.00 <sup>b</sup> | 1250.00±104.00 <sup>c</sup> |
| 钙/(mg/kg)                                                                                                    | 826.00±31.00 <sup>a</sup>   | 709.00±25.00 <sup>b</sup>   | 418.00±23.00 <sup>c</sup>   |
| 锌/(mg/kg)                                                                                                    | 12.50±0.32 <sup>a</sup>     | 12.30±0.33 <sup>a</sup>     | 13.30±0.42 <sup>b</sup>     |
| 碘/(μg/kg)                                                                                                    | 86.40±0.42 <sup>a</sup>     | 113.00±1.90 <sup>b</sup>    | 86.00±0.67 <sup>a</sup>     |
| 氯/(mg/kg)                                                                                                    | 6900.00±240.00 <sup>a</sup> | 3900.00±140.00 <sup>b</sup> | 1600.00±100.00 <sup>c</sup> |

2.5 活性物质含量

由表 6 可知, Y45 组的虾青素含量显著高于 Y30 组 ( $P<0.05$ ), 而 D0 组对虾肌肉中虾青素含量过低未检出。与沈敏等<sup>[28]</sup>报道的高盐虾肌肉的虾青素含量(5‰盐度凡纳滨对虾肌肉约 4 μg/g, 22‰盐度凡纳滨对虾肌肉约 2.3 μg/g, 分光光度法检测)、齐宇等<sup>[29]</sup>报道的南美白对虾肌肉虾青素含量(约 40 μg/g, 分光光度法检测)、张旭飞<sup>[30]</sup>报道的凡纳滨对虾肌肉虾青素含量(12.69 μg/g, 液相色谱法)相比, 本研究检测的盐田虾中的虾青素含量偏低, 这可能是由于检测方法、取样季节、养殖地域等的不同导致的。虾青素是自然界最强的抗氧化剂之一, 能有效清除自由基和活性氧, 其抗氧化活性是  $\alpha$ -生育酚的 100 倍<sup>[31]</sup>。杨梦焯等<sup>[32]</sup>报道对虾在遭受环境胁迫时, 会优先将用于着色部分的虾青素(虾壳中)转运到肝胰腺中参与抗氧化, 进而表现为体色的减弱和抗氧化能力的上升, 本研究结果也表明, 在高盐度胁迫下, 盐田虾(凡纳滨对虾)肌肉和内脏会大量富集虾青素以应对恶劣环境。

Y30 组牛磺酸含量高于 Y45 组, 远高于 D0 组。牛磺酸作为一种含硫的非蛋白质氨基酸, 在水产动物代谢、渗透调节、免疫调节和抗氧化等方面发挥着重要作用<sup>[33-34]</sup>。SHI 等<sup>[35]</sup>研究发现, 在低鱼粉饲料(10%鱼粉)中添加 0.4%牛磺酸, 可提高南美白对虾的抗氧化指标, 增强铁蛋白、谷胱

甘肽过氧化物酶、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶等抗氧化基因的表达, 激活了 Toll 和 IMD 免疫通路, 提升了抗菌肽 *alf*、*cru* 和 *pen3* 的基因表达, 表明牛磺酸能从细胞层面增强对虾的抗氧化和免疫能力。两组盐田虾的牛磺酸含量远高于淡水虾, 推测可能是高盐环境促使凡纳滨对虾在肌肉中富集牛磺酸, 以应对不利的环境条件。3 组对虾的羟脯氨酸含量无显著差异。

| 表 6 3 组凡纳滨对虾的活性物质含量(mg/kg, 湿基)<br>Table 6 Active ingredients in 3 groups of <i>Penaeus vannamei</i> (mg/kg, wet basis) |                            |                            |                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 活性物质                                                                                                                   | Y45                        | Y30                        | D0                         |
| 虾青素                                                                                                                    | 1.65±0.08 <sup>a</sup>     | 0.41±0.04 <sup>b</sup>     | ND <sup>c</sup>            |
| 牛磺酸                                                                                                                    | 1280.00±11.00 <sup>b</sup> | 1390.00±27.00 <sup>a</sup> | 236±15.00 <sup>c</sup>     |
| 羟脯氨酸                                                                                                                   | 1100.00±48.00 <sup>a</sup> | 1200.00±56.00 <sup>a</sup> | 1100.00±55.00 <sup>a</sup> |

2.6 色度值

色泽是评价水产品品质最直接的感官指标, 在产品的外观和可接受程度中起着重要的作用, 色泽的变化会有意识或潜意识影响消费者的购买趋势<sup>[36]</sup>。加热处理后, 肉眼观察可见淡水虾色泽较红, 盐田虾的色泽偏淡。由表 7 色度检测结果来看, 盐田虾 Y30 和 Y45 与淡水虾 D0 的  $a^*$  差异显著, D0 组体色显著红于 Y45 和 Y30; 虾体表面色彩强度(C)值呈 D0>Y30>Y45, 推测除饵料不同外, 这也可能是由于高盐环境下盐田虾虾壳中的虾青素被转移到内脏和肌肉中辅助抗氧化所导致的。

| 表 7 3 组凡纳滨对虾加热熟制后色度值<br>Table 7 Color parameters of 3 groups of <i>Penaeus vannamei</i> after cooking |                                                                                      |                         |                         |                         |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 组别                                                                                                    | 图像                                                                                   | $L^*$                   | $a^*$                   | $b^*$                   | 色彩度强度(C) |
| Y45                                                                                                   |  | 61.97±1.03 <sup>a</sup> | 14.80±1.29 <sup>b</sup> | 20.70±1.49 <sup>a</sup> | 45.11    |
| Y30                                                                                                   |  | 60.82±2.20 <sup>a</sup> | 17.13±1.98 <sup>a</sup> | 21.33±2.78 <sup>a</sup> | 48.50    |
| D0                                                                                                    |  | 57.63±1.86 <sup>a</sup> | 24.83±2.50 <sup>c</sup> | 28.66±2.34 <sup>b</sup> | 67.21    |

2.7 营养质量指数

根据中国营养协会推荐的每日膳食中营养素供给量, 以成年男子轻体力活动计算 3 组对虾的营养质量指数, 结果如表 8 所示。营养质量指数法是国际上膳食评价时, 判断食物中的各种营养素对人体需要的满足程度时普遍采用的方法<sup>[37]</sup>, INQ=1 时, 表示该食物营养素与能量的供给能

力相当; INQ>1, 表示该食物营养素的供给能力高于能量, 特别适合体重超重和肥胖者; INQ<1, 表示该食物中该营养素的供给能力低于能量, 长期食用此类食物, 会发生营养素不足或热能过剩的危险, 为营养价值较低的食物<sup>[12]</sup>。由表 8 可知, 除脂肪外, 3 组对虾各营养素的 INQ 均大于 1, 即对脂肪而言, 凡纳滨对虾的营养价值并不高, 需要从其他食物中补充; Y45 和 Y30 凡纳滨对虾肌肉的蛋白质、磷、钠、氯、镁的 INQ 指数均特别高, D0 凡纳滨对虾肌肉的蛋白质、磷和镁的 INQ 指数较高, 即 3 组对虾分别提供

相应营养素的能力较高。

2.8 游离氨基酸组成及含量

游离氨基酸是水产品的主要呈味物质和风味前体物质<sup>[38]</sup>。不同的游离氨基酸具有不同的呈味特征, 某些游离氨基酸与游离核苷酸、无机盐等相互作用, 可进一步提高食物的味道强度<sup>[39]</sup>。如表 9 所示, Y45 中检出 17 种游离氨基酸, Y30、D0 中检出 16 种游离氨基酸; 游离氨基酸总量随着盐度的降低呈下降趋势, Y45 的游离氨基酸含量最高, 这可能

表 8 100 g 3 组凡纳滨对虾肌肉中几种主要营养素的营养质量指数(%)  
Table 8 Nutritional quality index of several main nutrients in 100 g muscle of 3 groups of *Penaeus vannamei* (%)

| 名称          | 营养素推荐供给量 | 营养素密度     |           |           | INQ       |           |           |
|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|             |          | Y45       | Y30       | D0        | Y45       | Y30       | D0        |
| 热量/(kcal/d) | 2250     | 4.53      | 4.15      | 4.14      | -         | -         | -         |
| 蛋白质/g       | 65       | 35.38     | 32.31     | 30.92     | 7.81      | 7.78      | 7.47      |
| 脂肪/%        | 20~30    | 1.70~2.55 | 2.33~3.50 | 3.00~4.50 | 0.38~0.56 | 0.56~0.84 | 0.72~1.09 |
| 钙/(mg/d)    | 800      | 10.33     | 8.86      | 5.23      | 2.28      | 2.47      | 1.46      |
| 磷/(mg/d)    | 720      | 38.61     | 35.97     | 38.61     | 8.52      | 10.02     | 10.76     |
| 钾/(mg/d)    | 2000     | 18.80     | 9.44      | 10.17     | 4.15      | 2.63      | 2.83      |
| 钠/(mg/d)    | 1500     | 30.47     | 18.93     | 8.33      | 6.73      | 5.27      | 2.32      |
| 镁/(mg/d)    | 330      | 19.52     | 15.39     | 12.24     | 4.31      | 4.29      | 3.41      |
| 氯/(mg/d)    | 2300     | 30.00     | 16.96     | 6.96      | 6.62      | 4.72      | 1.94      |
| 铁/(mg/d)    | 12       | 4.84      | 5.38      | 6.88      | 1.07      | 1.50      | 1.92      |
| 碘/(μg/d)    | 120      | 7.20      | 9.42      | 7.17      | 1.59      | 2.62      | 2.00      |
| 锌/(mg/d)    | 12.5     | 10.00     | 9.84      | 10.64     | 2.21      | 2.74      | 2.96      |

注: -表示无此项。

表 9 3 组凡纳滨对虾中游离氨基酸的含量、呈味特征、滋味阈值及 TAVs  
Table 9 Content, taste attributes, taste thresholds and TAVs of free amino acids in 3 groups of *Penaeus vannamei*

| 氨基酸成分   | 呈味特征 <sup>[40]</sup> | 滋味阈值/(mg/100 g) <sup>[41]</sup> | Y45/(mg/100 g)            | Y30/(mg/100 g)            | D0/(mg/100 g)             | TAVs  |       |      |
|---------|----------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|-------|------|
|         |                      |                                 |                           |                           |                           | Y45   | Y30   | D0   |
| 天门冬氨酸*  | 鲜/甜(+)               | 100                             | 9.01±0.21 <sup>a</sup>    | 33.03±0.05 <sup>b</sup>   | 20.05±0.04 <sup>c</sup>   | 0.09  | 0.33  | 0.20 |
| 苏氨酸 #   | 甜(+)                 | 260                             | 80.03±0.35 <sup>a</sup>   | 56.32±0.14 <sup>b</sup>   | 60.11±0.11 <sup>b</sup>   | 0.31  | 0.22  | 0.23 |
| 丝氨酸     | 甜(+)                 | 150                             | -                         | -                         | -                         | -     | -     | -    |
| 谷氨酸*    | 鲜(+)                 | 30                              | 112.10±0.42 <sup>a</sup>  | 336.70±0.35 <sup>b</sup>  | 207.46±0.35 <sup>c</sup>  | 3.73  | 11.20 | 6.90 |
| 甘氨酸*    | 甜(+)                 | 130                             | 788.96±0.36 <sup>a</sup>  | 614.15±0.27 <sup>b</sup>  | 460.69±0.33 <sup>c</sup>  | 6.07  | 4.72  | 3.55 |
| 丙氨酸*    | 甜(+)                 | 60                              | 359.04±0.29 <sup>a</sup>  | 388.81±0.45 <sup>b</sup>  | 440.15±0.32 <sup>c</sup>  | 5.98  | 6.47  | 7.33 |
| 胱氨酸     | -                    | -                               | 17.95±0.17 <sup>a</sup>   | 43.97±0.11 <sup>b</sup>   | 73.02±0.11 <sup>c</sup>   | -     | -     | -    |
| 缬氨酸 #   | 苦/甜(+)               | 40                              | 99.06±0.31 <sup>a</sup>   | 174.83±0.28 <sup>b</sup>  | 141.17±0.17 <sup>c</sup>  | 2.48  | 4.38  | 3.53 |
| 蛋氨酸 #   | 苦/甜(-)               | 300                             | 54.05±0.27 <sup>a</sup>   | 123.06±0.15 <sup>b</sup>  | 90.03±0.16 <sup>c</sup>   | 0.18  | 0.41  | 0.30 |
| 异亮氨酸 #  | 苦(-)                 | 90                              | 57.98±0.15 <sup>a</sup>   | 118.24±0.17 <sup>b</sup>  | 83.13±0.05 <sup>c</sup>   | 0.64  | 1.31  | 0.92 |
| 亮氨酸 #   | 苦(-)                 | 190                             | 123.89±0.42 <sup>a</sup>  | 285.82±0.13 <sup>b</sup>  | 187.09±0.24 <sup>c</sup>  | 0.65  | 1.51  | 0.99 |
| 酪氨酸     | 苦(-)                 | 90                              | 62.97±0.14 <sup>a</sup>   | 67.26±0.18 <sup>a</sup>   | 64.04±0.12 <sup>a</sup>   | 0.70  | 0.74  | 0.71 |
| 苯丙氨酸 #  | 苦(-)                 | 90                              | 50.10±0.22 <sup>a</sup>   | 100.14±0.22 <sup>b</sup>  | 84.06±0.11 <sup>c</sup>   | 0.56  | 1.11  | 0.93 |
| 赖氨酸 #   | 苦/甜(-)               | 50                              | 42.92±0.18 <sup>a</sup>   | 86.07±0.07 <sup>b</sup>   | 128.10±0.08 <sup>c</sup>  | 0.86  | 1.72  | 2.56 |
| 组氨酸     | 苦(-)                 | 20                              | 59.00±0.23 <sup>a</sup>   | 84.15±0.04 <sup>b</sup>   | 100.17±0.07 <sup>c</sup>  | 2.95  | 4.20  | 5.00 |
| 精氨酸     | 苦/甜(+)               | 50                              | 703.88±0.27               | -                         | -                         | 14.08 | -     | -    |
| 脯氨酸     | 甜/苦(+)               | 300                             | 487.87±0.38 <sup>a</sup>  | 332.42±0.25 <sup>b</sup>  | 565.55±0.13 <sup>c</sup>  | 1.63  | 1.11  | 1.89 |
| 色氨酸 #   | -                    | 90                              | 11.07±0.09 <sup>a</sup>   | 24.02±0.06 <sup>b</sup>   | 23.01±0.04 <sup>b</sup>   | -     | -     | -    |
| 游离氨基酸总量 |                      |                                 | 3119.88±0.76 <sup>a</sup> | 2868.99±0.82 <sup>b</sup> | 2727.83±1.02 <sup>c</sup> |       |       |      |

注: -表示未检出。



是盐田虾味道鲜美的原因之一。黄凯等<sup>[42]</sup>认为高盐度下对虾会通过升高体内的游离氨基酸浓度来保持渗透压平衡,与本研究结果一致。Y45 的精氨酸、甘氨酸、脯氨酸、丙氨酸含量较高;Y30 与 D0 的甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、谷氨酸含量较高。甘氨酸和丙氨酸是甘甜味的主要贡献者;精氨酸是一种苦味氨基酸,带有微弱甜味,高含量时与呈甜味的丙氨酸协同作用赋予虾肉特有的风味<sup>[43]</sup>;脯氨酸不仅可以增加甜味,还可以减少虾肉中的不愉快滋味<sup>[44]</sup>;谷氨酸是鲜味的主要贡献者,可以改善对虾的总体风味。

不同的呈味物质具有不同地滋味阈值,可根据 TAV 判断其对整体滋味的贡献程度,当 TAV>1 时,认为该物质对样品的整体滋味有重要贡献<sup>[45]</sup>。由 TAV 结果来看(表 9),Y45 中精氨酸的 TAV 值高达 14.08,是其滋味的主要贡献者,其他对滋味贡献较多的游离氨基酸为呈甘味的甘氨酸、丙氨酸,呈鲜味的谷氨酸,呈苦味的组氨酸、呈甜/苦味的缬氨酸和脯氨酸;Y30 中 TAV 最高的是谷氨酸,是滋味的主要贡献者,其他对滋味贡献较多的是丙氨酸、甘氨酸、组氨酸、缬氨酸等;D0 中 TAV 最高的是呈甘味的丙氨酸,对淡水虾的滋味起到重要作用,其他对滋味贡献较多的是谷氨酸、组氨酸、甘氨酸和缬氨酸。

2.9 无机盐离子、季胺化合物、有机酸、核苷酸等滋味物质

3 组对虾中无机离子、季胺化合物、还原糖、有机酸、核苷酸等滋味物质的含量、呈味特征、滋味阈值及 TAV 如

表 10 所示。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 和  $\text{PO}_4^{3-}$ 是评价水产品滋味的重要指标<sup>[46]</sup>, $\text{Na}^+$ 和  $\text{K}^+$ 一般产生咸味, $\text{Cl}^-$ 和  $\text{PO}_4^{3-}$ 本身无味,往往起到修饰风味的作用。凡纳滨对虾中的  $\text{Na}^+$ 和  $\text{Cl}^-$ 含量与盐度呈显著正相关,Y45 含量最高,D0 组最低; $\text{K}^+$ 各组间差异不显著。3 组对虾中各离子的 TAV 均远高于 1,表明无机离子对凡纳滨对虾的滋味具有重要贡献。

甜菜碱和胆碱是存在于水产品中的重要季胺化合物。甜菜碱具有令人爽快的甜味和一定的鲜味,能增强浓厚味<sup>[47]</sup>。3 组对虾的胆碱含量差异显著,但由于胆碱的滋味阈值较高,其 TAV 均小于 1,对滋味的贡献相对较小;Y45 和 Y30 的甜菜碱 TAV 大于 1,这可能是其浓厚味强的一个重要因素。

乳酸和琥珀酸等有机酸是水产品重要的呈味物质,可以有效改善水产品的风味。D0 组除酒石酸未检出之外,其余有机酸含量均显著高于 Y45 和 Y30 组。Y45 和 Y30 组的酒石酸、乳酸和琥珀酸 TAV 大于 1,是其滋味的重要贡献者;D0 组的乳酸、琥珀酸和苹果酸 TAV 大于 1,是其滋味的重要贡献者。研究表明,琥珀酸与乳酸是虾蟹类动物中的主要代谢产物,对海产品的特征滋味有一定的贡献<sup>[48]</sup>,它们赋予了凡纳滨对虾更柔和的酸味,丰富整体的滋味。

游离核苷酸是虾蟹类水产品的特征滋味物质,能够赋予水产品强烈的鲜味。3 组对虾的 TAV 均小于 1,说明 3 种呈味核苷酸不是对虾鲜味的直接贡献者。但是,呈味核苷酸可以与谷氨酸钠、游离氨基酸以及无机离子等产生协同增鲜作用,对凡纳滨对虾的呈味起到一定的作用。

表 10 3 组凡纳滨对虾中无机离子、季胺化合物、还原糖、有机酸、核苷酸的含量、呈味特征、滋味阈值及 TAVs  
Table 10 Content, taste attributes, taste thresholds and TAVs of inorganic salts, quaternary amine compounds, reducing sugars, organic acids and nucleotides in 3 groups of *Penaeus vannamei*

| 类别    | 滋味成分               | 呈味特征   | 含量/(mg/kg)                  |                             |                              | 滋味阈值<br>(/mg/kg) | TAVs  |       |       |
|-------|--------------------|--------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------|-------|-------|-------|
|       |                    |        | Y45                         | Y30                         | D0                           |                  | Y45   | Y30   | D0    |
| 无机离子  | $\text{Na}^+$      | 咸/苦(-) | 4570.00±298.00 <sup>a</sup> | 2840.00±152.00 <sup>b</sup> | 1250.00±104.00 <sup>c</sup>  | 89.7             | 50.95 | 31.66 | 13.94 |
|       | $\text{K}^+$       | 咸(+)   | 3760.00±225.00 <sup>a</sup> | 3650.00±184.00 <sup>a</sup> | 3610.00±164.00 <sup>a</sup>  | 507              | 7.42  | 7.00  | 7.12  |
|       | $\text{PO}_4^{3-}$ | 改善风味   | 8519.36±422.90 <sup>a</sup> | 7937.10±631.29 <sup>b</sup> | 8519.36±707.90 <sup>a</sup>  | 1425.85          | 5.97  | 5.57  | 5.97  |
|       | $\text{Cl}^-$      | 改善风味   | 6900.00±240.00 <sup>a</sup> | 3900.00±140.00 <sup>b</sup> | 1600.00±100.00 <sup>c</sup>  | 138.26           | 49.91 | 28.21 | 11.57 |
| 季胺化合物 | 甜菜碱                | 鲜/甜(+) | 7840.80±32.80 <sup>a</sup>  | 6840.60±47.30 <sup>b</sup>  | ND                           | 2343             | 3.35  | 2.92  | ND    |
|       | 胆碱                 |        | 707.45±15.52 <sup>a</sup>   | 421.32±16.29 <sup>b</sup>   | 883.26±22.37 <sup>c</sup>    | >5000            | <0.14 | <0.08 | <0.18 |
| 还原糖   | 葡萄糖                |        | 8600.00±400.00 <sup>a</sup> | 4100.00±500.00 <sup>b</sup> | 12000.00±500.00 <sup>c</sup> | 16214.4          | 0.53  | 0.25  | 0.74  |
| 有机酸   | 苹果酸                | 酸/苦(-) | 32.60±1.80 <sup>a</sup>     | 54.40±2.40 <sup>b</sup>     | 97.10±2.90 <sup>c</sup>      | 49.6             | 0.66  | 1.10  | 1.96  |
|       | 酒石酸                | 酸      | 5.60±0.40 <sup>a</sup>      | 3.9±0.20 <sup>b</sup>       | ND                           | 1.5              | 3.73  | 2.60  | ND    |
|       | 乳酸                 | 酸/苦(-) | 799.00±32.00 <sup>a</sup>   | 863.00±19.00 <sup>b</sup>   | 1080.00±21.00 <sup>c</sup>   | 126              | 6.34  | 6.85  | 8.57  |
|       | 柠檬酸                | 酸/收敛   | 2.40±0.10 <sup>a</sup>      | 4.90±0.20 <sup>b</sup>      | 11.40±0.20 <sup>c</sup>      | 45               | 0.05  | 0.11  | 0.25  |
|       | 琥珀酸                | 酸/鲜(+) | 18.60±0.80 <sup>a</sup>     | 14.10±0.60 <sup>b</sup>     | 37.7±1.10 <sup>c</sup>       | 10.6             | 1.75  | 1.33  | 3.56  |
| 核苷酸   | 鸟嘌呤核苷酸             | 鲜(+)   | 0.90±0.10 <sup>a</sup>      | 0.80±0.00 <sup>a</sup>      | 1.20±0.10 <sup>b</sup>       | 72.64            | 0.01  | 0.46  | 0.02  |
|       | 次黄嘌呤核苷酸            | 鲜(+)   | 2.50±0.20 <sup>a</sup>      | 4.50±0.50 <sup>b</sup>      | 5.30±0.30 <sup>c</sup>       | 208.92           | 0.01  | 0.02  | 0.03  |
|       | 腺嘌呤核苷酸             | 鲜/甜(+) | 0.40±0.00 <sup>a</sup>      | 0.50±0.00 <sup>a</sup>      | 1.70±0.10 <sup>b</sup>       | 868.05           | 0.00  | 0.00  | 0.00  |

## 2.10 质构分析

3 组对虾肌肉的 TPA 和剪切力分析结果可知, 硬度上  $D0>Y30>Y45$ ; 咀嚼性上  $Y30$  与  $D0$  组接近, 二者均大于  $Y45$ ; 剪切力上  $D0>Y30>Y45$ ; 黏附性  $Y30$  较高,  $D0$  与  $Y45$  无显著差异; 胶黏性上  $Y30>D0>Y45$ ; 弹性系数  $D0$  最小,  $Y45$  与  $Y30$  接近, 这个结果与沈敏等<sup>[28]</sup>报道的高盐虾硬度和内聚性高于低盐虾, 黏性和胶着性相近的结果较为一致。硬度是描述虾肉变形或穿透虾肉所需要的力, 是虾肉保持形状的内部结合力; 咀嚼性是指将虾肉咀嚼成吞咽状态所需的能量; 剪切力是评价肌肉嫩度的重要指标, 也是肌肉内部结构的反映, 一般来讲, 剪切力越小, 肉质越嫩<sup>[49]</sup>。胶黏性表示当食品表面与其他物体(舌、牙齿和口腔)附着时, 剥离它们所需的力, 它反映了虾肌肉细胞间结合力的大小, 结合力越小, 黏性值越大<sup>[50]</sup>; 弹性反映了虾体受外力作用时变形, 去除外力后的恢复程度, 一定条件下, 含水率越高, 弹性越大, 弹性还受蛋白质含量的影响, 蛋白含量尤其是胶原蛋白含量越高, 弹性越强; 内聚性反映了对虾体肌肉咀嚼时的抵抗性, 抵抗外界因素的损伤并紧密连接, 使自身保持完整的性质。比值在 0 到 1 之间时, 内聚性越大肌肉口感越好, 越细腻<sup>[51]</sup>。相对而言,  $Y45$  对虾肌肉的硬度和剪切力较低, 弹性较高, 其肉质较嫩, 口感细腻, 易咀嚼, 弹性好;  $Y30$  对虾肌肉咀嚼性、胶黏性和弹性均最高, 剪切力和硬度居中, 可能是其胶原蛋白含量较高(羟脯氨酸含量高), 肌肉细胞间结合力偏小导致的, 其肌肉耐咀嚼;  $D0$  组对虾肌肉硬度、剪切力和咀嚼性高, 弹性较低, 其肉质偏硬且不易咀嚼。

## 3 结 论

总体说来, 盐田虾与淡水养殖的凡纳滨对虾一样, 均是高蛋白、低脂肪的优质虾类, 其肌肉中含有丰富的人体必需的氨基酸和矿物质, 呈味氨基酸含量高, 味道鲜美, 营养丰富。比较而言, 盐田虾的蛋白含量, 矿质元素钙、镁, 活性物质虾青素、牛磺酸等含量高于淡水凡纳滨对虾, 营养价值更高; 盐田虾的游离氨基酸含量, 无机离子中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ , 甜菜碱, 酒石酸含量显著高于淡水虾, 游离氨基酸中的精氨酸、甘氨酸、丙氨酸、谷氨酸, 无机离子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ )、甜菜碱、酒石酸、乳酸和琥珀酸是其滋味的主要贡献者, 其他有机酸、呈味核苷酸、还原糖等也为盐田虾提供了更丰富的滋味; 肌肉硬度和剪切力低, 弹性高, 肉质更为细嫩; 色泽上看, 盐田虾的体色相对较浅, 这可能是盐田虾在推广过程中的一个不利因素, 需要引起重视。

## 参考文献

- [1] 展文豪, 周书洪, 袁春营, 等. 盐度对凡纳滨对虾血细胞吞噬与免疫相关因子基因表达的影响[J]. 水产学杂志, 2021, 34(1): 18–22.

ZHAN WH, ZHU SH, YUAN CY, *et al.* Effect of salinity on lymphocytes phagocytosis and expression of immune-related factor genes in Pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2021, 34(1): 18–22.

- [2] 王林薇, 程曦, 甘宏宽, 等. 盐度和亚硝酸盐氮慢性胁迫对凡纳滨对虾生长、抗氧化及免疫的影响[J]. 南方农业学报, 2024, 55(4): 1194–1206.
- [3] 王兴强, 马钰, 董双林. 盐度和蛋白质水平对凡纳滨对虾存活、生长和能量转换的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005, 35(1): 33–37.
- [4] 陈琴, 陈晓汉, 谢达祥, 等. 不同盐度养殖的南美白对虾含肉率及其肌肉营养成分[J]. 海洋科学, 2001, 25(8): 16–18.
- [5] 黄凯, 王武, 卢洁, 等. 盐度对南美白对虾的生长及生化成分的影响[J]. 海洋科学, 2004, 28(9): 20–25.
- [6] 李晓, 王晓璐, 王颖, 等. 盐度对养殖凡纳滨对虾肌肉营养成分的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(1): 130–137.
- [7] CHEN W, WANG X, WANG Y, *et al.* Effects of different salinities on nutritional composition in muscle of *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(1): 130–137.
- [8] CHEN Q, CHEN XH, XIE DX, *et al.* Effect of different salinity culture on flesh content and nutrients of *Penaeus vannamei* [J]. Marine Sciences, 2001, 25(8): 16–18.
- [9] CHEN W, WANG X, WANG Y, *et al.* Determination of content of amino acid in abalone by *Precolumn derivatization* and its nutritional value evaluation [J]. Agricultural Biotechnology, 2018, 7(3): 182–187, 214.
- [10] 李锐, 王颖, 刘洪军, 等. 0 °C 贮藏下南美白对虾品质变化研究[J]. 核农学报, 2020, 34(12): 2734–2741.
- [11] LI X, WANG Y, LIU HJ, *et al.* Quality changes of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during 0 °C storage [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(12): 2734–2741.
- [12] KUCUKGULMEZ A, YANAR Y, CELIK M, *et al.* Fatty acids profile, atherogenic, thrombogenic, and polyene lipid indices in golden grey mullet (*Liza aurata*) and gold band goatfish (*Upeneus moluccensis*) from Mediterranean sea [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2018, 27(8): 912–918.
- [13] 孙长颢, 凌文华, 黄国伟, 等. 营养与食品卫生学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1980.
- [14] 中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所. 食物成分表[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1980.
- [15] Institute of Nutrition and Food Hygiene, Chinese Academy of Preventive Medical Sciences. Food composition table [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1980.
- [16] FAO/WHO/UNU Expert Consultation. Amino acid requirements of adults. In protein and amino acids requirements in human nutrition [Z]. 2007.
- [17] 孙长颢, 凌文华, 黄国伟, 等. 营养与食品卫生学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1980.

- 生出版社, 2020.
- SUN CH, LING WH, HUANG GW, *et al.* Nutrition and food hygiene [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2020.
- [13] 黄艳青, 杨絮, 王怡菊, 等. 西北硫酸盐型盐碱水与低盐度海水养殖凡纳滨对虾营养成分及品质评价[J]. 渔业信息与战略, 2023, 38(1): 60–66.
- HUANG YQ, YANG X, WANG YJ, *et al.* Analysis and quality evaluation of nutrient components in muscle of *Litopenaeus vannamei* of two saline-alkali aquaculture and mariculture [J]. Fishery Information & Strategy, 2023, 38(1): 60–66.
- [14] 黄薇, 杨明, 陆根海, 等. 立体混养和单养模式下凡纳滨对虾肌肉营养成分的分析与评价[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(2): 309–317.
- HUANG W, YANG M, LU GH, *et al.* Analysis and evaluation of muscle nutrient components of *Litopenaeus vannamei* in multistory culture mode and monoculture mode [J]. Journal of Shanghai University, 2023, 32(2): 309–317.
- [15] 文国樑, 李卓佳, 林黑着, 等. 规格与盐度对凡纳滨对虾肌肉营养成分的影响[J]. 南方水产, 2007, 3(3): 31–34.
- WEN GL, LI ZJ, LIN HZ, *et al.* Effect of salinity and scale on nutrient contents of muscle of *Litopenaeus vannamei* [J]. South China Fisheries Science, 2007, 3(3): 31–34.
- [16] 彭永兴, 许祥, 程玉龙, 等. 海水和淡水养殖凡纳滨对虾肌肉营养成分的比较[J]. 水产科学, 2013(8): 435–440.
- PENG YX, XU X, CHENG YL, *et al.* Comparative analysis of nutrients in muscles of Pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei* cultured in seawater and freshwater [J]. Fisheries Science, 2013(8): 435–440.
- [17] 张艳霞, 谢成民, 周芬, 等. 两种养殖模式大黄鱼肌肉营养价值评价及主体风味物质差异性分析[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 220–227.
- ZHANG YX, XIE CM, ZHOU F, *et al.* Evaluation of muscle nutritional value and differences in main flavor substances of *Pseudosciaena crocea* in two cultivation modes [J]. Food Science, 2020, 41(8): 220–227.
- [18] LUI LM, LIANG XF, LI J, *et al.* Effects of supplemental phytic acid on the apparent digestibility and utilization of dietary amino acids and minerals in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. Aquaculture Nutrition, 2018, 24(2): 850–857.
- [19] 邓泽元. 食品营养学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1984.
- DENG ZY. Food nutrition [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1984.
- [20] 佩特利. 蛋白质食物营养评价[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1984.
- PETRIE. Nutritional evaluation of protein foods [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1984.
- [21] 崔茜, 王伟, 谢益韬, 等. 不同养殖模式金刚虾(斑节对虾)肌肉营养成分比较分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 276–281.
- CUI Q, WANG W, XIE YT, *et al.* Comparative analysis of nutrient composition in the muscle of *Penaeus monodon* in different culture models [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 276–281.
- [22] 冀德伟, 闫茂仓, 胡利华, 等. 不同规格野生刀额新对虾肌肉营养成分分析[J]. 水产科学, 2022, 41(6): 1045–1051.
- JI DW, YAN MC, HU LH, *et al.* Analysis of nutritional compositions in muscle of wild sword prawn *Metapenaeus ensis* with different sizes [J]. Fisheries Science, 2022, 41(6): 1045–1051.
- [23] 王志芳, 郭忠宝, 罗永巨, 等. 淡水石斑鱼与 3 种罗非鱼肌肉营养成分的分析比较[J]. 南方农业学报, 2018, 49(1): 164–171.
- WANG ZF, GUO ZB, LUO YJ, *et al.* Nutrient compositions in muscle of *Cichlasoma managuense* and three tilapia species [J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(1): 164–171.
- [24] 刁小琴, 孙薇婷, 徐筱君, 等. 肉制品风味物质分析及其在加工中变化的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(8): 2991–2999.
- DIAO XQ, SUN WT, XU XJ, *et al.* Research progress on analysis of flavor compounds in meat products and their changes during processing [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(8): 2991–2999.
- [25] SARI M, SISMAN T, ONK K, *et al.* Effects of different fattening systems on technological properties and fatty acid composition of goose meat [J]. European Poultry Science, 2015, 79(18): 1–12.
- [26] 丁玉琴, 刘友明, 熊善柏. 鲢与草鱼肌肉营养成分的比较研究[J]. 营养学报, 2011, 33(2): 196–198.
- DING YQ, LIU YM, XIONG SB. The comparative study on nutritional components between the muscle of *Elopichthys bambusa* and *Ctenopharyngodon idellus* [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2011, 33(2): 196–198.
- [27] 贾倩男, 侯虎, 王聪, 等. 基于感官组学解析热加工鹰爪虾关键滋味成分的变化[J]. 食品科学, 2023, 44(20): 212–218.
- JIA QN, HOU H, WANG C, *et al.* Sensomics analysis of the changes in key taste components of *Trachypenaeus curvirostris* during thermal treatment [J]. Food Science, 2023, 44(20): 212–218.
- [28] 沈敏, 熊英, 王颖, 等. 高盐养殖对凡纳滨对虾肌肉品质的影响[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(2): 38–43.
- SHEN M, XIONG Y, WANG Y, *et al.* Effects of high-salinity on muscle flavor and texture in *Litopenaeus vannamei* [J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2020, 10(2): 38–43.
- [29] 齐宇, 贾喆, 宋茹. 南美白对虾不同部位虾青素的提取及特征分析[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(18): 188–190, 193.
- QI Y, JIA Z, SONG R. Analysis of extraction and characteristics of astaxanthin derived from different parts of *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2020, 48(18): 188–190, 193.
- [30] 张旭飞. 冻藏条件及加热方法对凡纳滨对虾色泽、虾青素含量及体外抗氧化活性研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021.
- ZHANG XF. Study on frozen storage conditions and heating methods on the color, astaxanthin content and in vitro antioxidant activity of *Litopenaeus vannamei* [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021.
- [31] AMBATI RR, PHANG SM, RAVI S, *et al.* Astaxanthin: Sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications—A review [J]. Marine Drugs, 2014, 12(1): 128–152.
- [32] 杨梦煊, 王宝杰, 刘梅, 等. 盐度胁迫下凡纳滨对虾体内虾青素在着色与抗氧化的资源权衡[J]. 海洋科学, 2023, 47(10): 32–42.
- YANG MX, WANG BJ, LIU M, *et al.* Resource tradeoff between coloring and antioxidation of astaxanthin in *Litopenaeus vannamei* under salinity stress [J]. Marine Science, 2023, 47(10): 32–42.
- [33] 吴坤岚, 龚洋洋, 于凯, 等. 牛磺酸在低鱼粉水产饲料中的应用研究进展[J]. 饲料研究, 2024(16): 177–181.
- WU KL, GONG YY, YU K, *et al.* Research progress of taurine application in low-fishmeal aquatic feed [J]. Feed Research, 2024(16): 177–181.
- [34] CHEN YH, DENG M, DONG ZQ, *et al.* Function of taurine and its synthesis-related genes in hypertonic regulation of *Sinonovacula constricta* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A:

- Molecular & Integrative Physiology, 2024, 287: 111536.
- [35] SHI ML, YAO XZ, QU KY, *et al.* Effects of taurine supplementation in low fishmeal diet on growth, immunity and intestinal health of *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture Reports, 2023, 32: 101713.
- [36] JIANG JW, WANG HL, GUO XQ, *et al.* Effect of radio frequency tempering on the color of frozen tilapia fillets [Z]. 2021.
- [37] 朱圣陶, 于守洋. 食物的营养质量指数评价[J]. 食品科学, 1987(9): 1-4.
- ZHU ST, YU SY. Evaluation of food nutrition index [J]. Food Science, 1987(9): 1-4.
- [38] CHEN G, LI J, SUN ZW, *et al.* Rapid and sensitive ultrasonic-assisted derivatisation microextraction (UDME) technique for bitter taste-free amino acids (FAA) study by HPLC-FLD [J]. Food Chemistry, 2014, 143(1): 97-105.
- [39] KOMATA Y. Umami taste of seafoods [J]. Food Reviews International, 1990, 6(4): 457-487.
- [40] 姚静玉, 刘洁, 柏雪莹, 等. 利用  $^1\text{H}$  NMR 研究小龙虾的特征性滋味组成[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 170-175.
- YAO JY, LIU J, BAI XY, *et al.* Determination of characteristic taste compounds of crayfish by  $^1\text{H}$  nuclear magnetic resonance [J]. Food Science, 2023, 44(8): 170-175.
- [41] 向晨曦, 钟明慧, 徐新星, 等. 蒸制鲟鱼肉特征性滋味组分的鉴定[J]. 肉类研究, 2021(6): 22-27.
- XIANG CX, ZHONG MH, XU XX, *et al.* Identification of characteristic taste components of steamed sturgeon [J]. Meat Research, 2021(6): 22-27.
- [42] 黄凯, 蒋焕超, 吴宏玉, 等. 盐度对凡纳滨对虾肌肉中游离氨基酸含量的影响[J]. 海洋渔业, 2010, 32(4): 422-426.
- HUANG K, JIANG HC, WU HY, *et al.* Salinity responses of free amino acids in the muscle of *Litopenaeus vannamei* [J]. Marine Fisheries, 2010, 32(4): 422-426.
- [43] 郭建港. 中国对虾“黄海 3 号”风味品质影响因素的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- GUO JG. Study on the influencing factors of flavor quality of *Fenneropenaeus chinensis* “Huanghai No.3” [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [44] 孙鲁浩. 加热方法对凡纳滨对虾中 ATP 关联化合物和游离氨基酸的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020.
- SUN LH. Effects of heating methods on ATP-related compounds and free amino acids in *Penaeus vannamei* [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020.
- [45] 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 WJ. Nutritional and flavor components analysis of antarctic krill and white shrimp [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [46] 赵巧灵, 吴佳佳, 李春萍, 等. 3 种鱿鱼的特征滋味成分分析与比较[J]. 中国食品学报, 2014, 14(6): 244-250.
- ZHAO QL, WU JJ, LI CP, *et al.* Analysis and comparison on characterization of taste components in muscle of three species squids [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(6): 244-250.
- [47] 刘天天, 梁中永, 范思华, 等. 北海沙蟹特征滋味成分的分析[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 236-241.
- LIU TT, LIANG ZY, FAN SH, *et al.* Analysis of characteristic taste components of soldier crab (*Mictyris brevidactylus*) [J]. Food Science, 2018, 39(14): 236-241.
- [48] KANI Y, YOSHIKAWA N, OKADA S, *et al.* Taste-active components in the mantle muscle of the oval squid *Sepioteuthis lessoniana* and their effects on squid taste [J]. Food Research International, 2008, 41(4): 371-379.
- [49] 李桢桢. 冷链流通中温度波动对南美白对虾色泽和质构的影响及其品质调控[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- LI ZZ. Quality control and effect of temperature fluctuation on color and texture of *Litopenaeus vannamei* during cold chain circulation [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [50] 李学鹏. 中国对虾冷藏过程中品质评价及新鲜度指示蛋白研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012.
- LI XP. Study on quality evaluation and freshness indicator proteins of Chinese shrimp during refrigeration process [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012.
- [51] 李红艳, 刘天红, 姜晓东, 等. 工厂化循环水养殖珍珠龙胆石斑鱼营养成分、食用安全性和质构特性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 4083-4090.
- LI HY, LIU TH, JIANG XD, *et al.* Study of nutritional quality, edible safety and texture properties of ♀*Epinephelus fuscoguttatus*×♂*Epinephelus lanceolatus* in industrial recirculating aquaculture systems [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(12): 4083-4090.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)