



食品与发酵工业
Food and Fermentation Industries
ISSN 0253-990X, CN 11-1802/TS

《食品与发酵工业》网络首发论文

题目： 基于层次分析法优化凡纳滨对虾（*Penaeus vannamei*）热风干燥工艺
作者： 张泽伟，董春雨，吉宏武，张迪，刘书成，苏伟明
DOI： 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032293
收稿日期： 2022-05-13
网络首发日期： 2022-07-14
引用格式： 张泽伟，董春雨，吉宏武，张迪，刘书成，苏伟明. 基于层次分析法优化凡纳滨对虾（*Penaeus vannamei*）热风干燥工艺[J/OL]. 食品与发酵工业. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032293>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于层次分析法优化凡纳滨对虾 (*Penaeus vannamei*) 热风干燥工艺

张泽伟¹, 董春雨¹, 吉宏武¹✉, 张迪¹, 刘书成^{1,2}, 苏伟明¹

1 (广东海洋大学 食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋生物制品工程实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心, 水产深加工广东普通高等学校重点实验室, 广东 湛江, 524088)

2 (海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心 (大连工业大学), 辽宁 大连, 116034)

*通信作者 吉宏武, 教授, 为通信作者, E-mail: jihw62318@163.com

摘要 为探究虾干的干燥温度和水分含量对其感官品质的综合影响, 该研究以凡纳滨对虾为原料, 控制热风干燥温度 (65~105 ℃), 调节干燥时间, 得到水分含量为 13%~25%的虾干。对其头胸部和腹部色泽 (L^* 、 a^* 、 b^* 值)、质构特性 (硬度、咀嚼性)、挥发性成分和菌落总数等指标进行测定, 采用层次分析法构建虾干感官品质综合评价模型, 得到最优的干燥条件。结果表明, 随着干燥温度上升和烘干时间延长, 水分含量减少, 虾干的硬度、咀嚼性与挥发性成分含量、种类和气味活性值逐渐增大, 菌落总数减少。并通过层次分析法共构建 1 个准则层和 4 个指标层的判断矩阵, 所有的判断矩阵均通过一致性检验。最终通过综合得分确定虾干最佳工艺条件为: 干燥温度 85 ℃、虾干水分含量 19%。在该干燥条件下, 得到一种红黄色, 虾肉紧密、柔韧、有嚼劲, 虾香味浓郁, 微生物指标合格, 品质优良的虾干。

关键词 凡纳滨对虾; 热风干燥; 品质; 层次分析法; 挥发性成分

DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032293

Optimisation of the hot-air drying process for shrimp (*Penaeus vannamei*) based on analytic hierarchy process

ZHANG Zewei¹, DONG Chunyu¹, JI Hongwu¹✉, ZHANG Di¹, LIU Shucheng^{1,2}, SU Weiming¹

1.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood, Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Product of Guangdong Higher Education Institution, Zhanjiang 524088, China 2.Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China

Abstract The comprehensive effects of drying temperature and final water content on dried shrimp sensory quality were studied. Using *Penaeus vannamei* as raw material, the dried shrimp with a moisture content of 13-25 g/100g were obtained by controlling the hot air drying temperature (65-105 ℃) and adjusting the drying time. The color of the cephalothorax and abdomen (L^* , a^* , b^* value), texture characteristics (hardness, chewiness), volatile components and total bacterial colony were measured. A comprehensive evaluation model for the sensory quality of dried shrimps was constructed using the analytic hierarchy process to obtain the optimal drying conditions. As the drying temperature and time increased, the moisture content of dried shrimp decreased, the hardness, chewiness and content, type and odor activity value of volatile component gradually increased, and the total number of bacterial colonies decreased. Based on analytic hierarchy process, a total of 1 rule layer and 4 Index layer judgement matrices were constructed and all matrice passed the consistency test. Finally, through the comprehensive score, the optimum process conditions for dried shrimp were determined to be the drying temperature of 85 ℃

收稿日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金 (32072340); 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-48); 广东普通高等学校海洋食品绿色加工技术研究团队 (2019KCXTD011)

作者简介: 张泽伟, 博士研究生

网络首发时间: 2022-07-14 15:32:20 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1802.TS.20220714.1022.004.html>

and the moisture content of 19 g/100g. Under the best conditions, dried shrimp was of excellent quality, including uniform red and yellow color, tight, flexible, chewy meat, rich flavor, and qualified microbiological indicators.

Key words *Penaeus vannamei*; hot-air drying; quality; analytic hierarchy process; volatile components

凡纳滨对虾 (*Penaeus vannamei*) 因肉质鲜美, 营养价值高, 而成为全世界最受欢迎的海产品之一^[1]。同时也是我国重要的经济养殖虾类, 2020 年总产量达到 186.29 万 t^[2]。鲜虾的易腐性、地域性和季节性等特性限制了其鲜活销售, 因此捕捞后需及时进行加工处理^[3]。目前虾的加工方式主要包括: 冷冻、蒸煮、干燥等。与冷冻和蒸煮方式相比, 干燥更具有优势, 其不仅可延长贮藏时间、减少贮藏空间, 还赋予产品浓郁的香气, 富有嚼劲的口感^[4]。热风干燥因设备投资少, 操作简单, 适应性强, 卫生条件较好, 仍是水产品主要加工方式^[5]。

在干燥过程中, 干燥温度、时间和虾干的水分含量等因素影响着虾干的感官品质, 如质构、色泽、气味等。蔡林林等^[6]研究发现干燥温度与虾仁的硬度、彩度 C 值呈正相关; 胡梦月等^[7]报道了随热风干燥时间增长, 水分含量减少, 虾干硬度增大, 挥发性成分含量显著增加, 使虾干呈现果香和浓郁的烤肉香。因此在评价虾干的品质优劣时, 需要同时考察虾干的多种感官指标。感官评分是一种通过人的味觉、触觉、视觉、嗅觉和听觉等感官对食品品质进行评分的科学方法, 具有简便、判断迅速的优点, 但其属于主观评价的方法, 其结果受感官人员个人嗜好, 口味等不稳定因素影响^[8]。此外, 虾干的感官品质指标较多, 简单的感官评价已无法满足对虾干制品的综合评价。而层次分析法可把复杂问题表示为有序的递阶层次结构, 是一种对各评价指标赋予权重系数, 通过权重系数与客观数据进行定量计算, 对方案进行综合评分的决策方法^[9]。该方法还能反应指标的重要程度, 又避免单一指标评价的片面性, 其计算结果客观合理, 得到的决策更加客观化, 可克服主观评价的缺陷^[10]。目前已逐步应用于中药提取工艺^[11]、鲜虾品质评价^[12]、鲜虾热烫-冷冻工艺^[13]等领域, 然而在虾干品质的综合评价中鲜见报道。

本研究以凡纳滨对虾为原料, 控制热风干燥温度 (65~105 °C), 调节干燥时间, 使虾干水分含量低于 25%, 对虾干的色泽、质构特性、挥发性成分和初始菌落总数等指标进行测定, 基于层次分析法对虾干品质进行综合评价, 以探究热风干燥工艺和虾干的品质变化, 为热风干燥工艺的优化和虾干品质质控提供基础。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

鲜活的凡纳滨对虾 [(18±2) g] 购自湛江市霞山水产品批发市场, 加冰保鲜, 运送至实验室。

壬酸甲酯标准品 (纯度≥99.8%, 色谱纯), 美国 Supelco 公司; PCA 平板计数琼脂, 北京陆桥技术股份有限公司; 氯化钠 (分析纯), 广东光华科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

InertCap® Pure-WAX 石英毛细柱 (30 m × 0.25 mm, 0.25 μm)、TQ8050NX 型气相色谱-质谱联用仪, 日本岛津公司; 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相萃取头, 美国 Supelco 公司; DHG-9023A 型电热鼓风干燥箱, 上海合恒仪器设备有限公司; CR-20 色差仪, 日本柯尼卡美能达公司; TMS-Pro 型物性分析质构仪, 美国 FTC 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 虾干制备

对虾洗净、沥干附水, 平铺于不锈钢丝网上, 置于风速为 0.5 m/s 的恒温鼓风干燥箱中。设置不同干燥温度 (65、75、85、95、105 °C) 进行干燥, 烘至水分含量为 25、22、19、16、13 g/100g 后停止干燥, 将虾干样品取出放入干燥器中备用。虾干水分含量的测定方法参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》。样品命名格式为“温度-水分含量”, 例 65-13。

1.3.2 质构的测定

根据段少奇等^[14]方法, 稍作修改。将样品剥壳, 剪取虾腹的第二腹节, 采用质构剖面分析 (texture profile analysis, TPA) 法测定虾干的硬度和咀嚼性。测试参数: 平底柱形探头 P/0.5(5 mm 直径), 初始力 0.5 N, 测试前速率 1 mm/s, 测试速率 1 mm/s, 测试后速率 1 mm/s, 变形程度 25%, 间隔 2 s。每组样品设定 6 个平行样, 取平均值。

1.3.3 虾干制备

取头胸侧面与倒数第二腹节, 用色差仪分别测量其色泽, 记录 L^* 、 a^* 和 b^* 值, 其中 L^* 代表明度值, 值越大, 越明亮; a^* 值表示红-绿色度值, 值越大, 色泽越红; b^* 值代表黄-蓝色度, 值越大, 色泽越黄。每组样品设定 5 个平行样, 取平均值。

1.3.4 初始菌落总数的测定

样品烘干后, 装入已高温灭菌的包装袋中, 封口, $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱中保存备用。菌落总数的测定方法参照 GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》。

1.3.5 挥发性成分的萃取

参考 ZHANG 等^[15]的方法, 稍作改动。虾干经万能粉碎机打碎成粉末。准确称取 2.00 g 虾粉装入 40 mL 的顶空瓶内, 加入 2 μL 的壬酸甲酯标准溶液 (218.75 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 溶于甲醇), 加盖密封。将提前老化好的萃取针插入密封的顶空瓶中, 将瓶子放置于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温水浴锅中, 萃取 35 min。萃取完后立即将萃取针转移到 GC 进样口, 于 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下解吸 5 min, 同时启动仪器采集检测数据。

1.3.6 GC-MS 条件

色谱条件: 色谱柱为 InertCap® Pure-WAX 石英毛细柱(30 m \times 0.25 mm, 0.25 μm); 载气为 He, 流速为 1.0 mL / min; 不分流进样。程序升温: 柱子初温 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min, 以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 2 min, 再以 $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min。

MS 条件: 电子轰击 (electron ionization, EI) 离子源, 电子能量 70 eV, 接口温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 离子源温度 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, 质量扫描范围 m/z 33~550, 采集方式为 Q3 扫描。

1.3.7 挥发性成分定性与定量

依据挥发性成分的总离子流图, 对峰面积最大的前 200 个峰进行积分, 通过对 NIST05 和 Wiley07 数据库进行相似度检索, 选择相似度达 80% 以上的成分结构信息, 确定各挥发性成分的名称。

根据内标物 (壬酸甲酯) 的浓度与峰面积, 与鉴定出的化合物的峰面积, 计算出每种物质的含量, 计算如公式 (1) 所示:

$$c_i = \frac{A_i \times m_s}{A_s \times m_{\#}} \quad (1)$$

式中: c_i 为化合物的浓度, ng/g, A_i 和 A_s 分别为化合物 i 的峰面积与内标物的峰面积, $m_{\#}$ 为虾干样品的质量, g, m_s 为壬酸甲酯的质量, ng。

1.3.8 气味活性值 (odor activity value, OAV)

气味活性值的定义是香气成分在香气体系中的浓度 (C) 与其气味阈值 (T) 的比值^[16], 即

$$\text{OAV} = \frac{C}{T} \quad (2)$$

$\text{OAV} \geq 1$ 的化合物被确定为对虾热风干制品的气味活性物质, $\text{OAV} \geq 10$ 的化合物进一步定义为主体气味活性物质^[17]

1.3.9 虾干品质综合评价模型的建立与综合评分计算^[18]

(1) 核心指标的筛选: 为了确定热风干制虾干的最佳工艺参数的试验目的, 结合测定的虾干指标, 筛选出与虾干品质相关的评价指标, 分别为色泽 (头胸 a^* 值、头胸 b^* 值、腹部 a^* 值、腹部 b^* 值)、挥发性成分 (吡嗪类、醛类、胺类)、质构 (硬度、咀嚼性) 和菌落总数。

(2) 评价模型结构的构建: 根据指标间的相互关系以及层次隶属关系, 构建目标层、准则层、指

标层和方案层。其虾干品质综合评价模型结构图如图 1 所示。

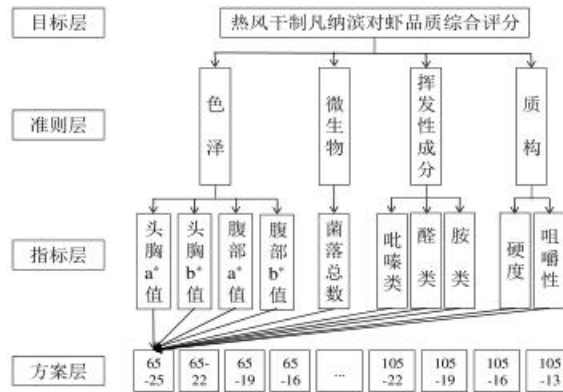


图 1 热风干燥凡纳滨对虾品质综合评价模型结构图

Fig. 1 The structure diagram of the comprehensive evaluation model for the quality of hot-air-dried shrimp (*Penaeus vannamei*) product

(3) 指标的原始数据无量纲化：由于各指标数据所代表的特性不一致，为消除不同量纲和数量级对品质评价的影响，需将各指标的原始数据进行无量纲处理。根据其特性确定理想值 (x_0)，如 a^* 值， b^* 值，吡嗪类、醛类、胺类的含量均为正指标，测定值越大越好；硬度、咀嚼性为中性指标，经专家意见和感官人员评分，确定 85-19 样品的硬度和咀嚼性最佳。菌落总数为负指标，测定值越小越好。

根据极差标准化法，将各指标的原始数据进行无量纲处理，化成 0-1 的标准化数值。如公式 (3)、公式 (4) 所示：

$$A_i = \frac{x_i - \min(x_1)}{x_0 - \min(x_1)} \quad (x_i \text{ 为正指标}) \quad (3)$$

$$A_i = \frac{\max(x_2) - x_i}{\max(x_2) - x_0} \quad (x_i \text{ 为负指标}) \quad (4)$$

式中： A_i 为归一化后的值， $\min(x_1)$ 、 $\max(x_2)$ 和 x_0 分别为指标系列中最小值、最大值和理想值。

(4) 判断矩阵的构造：为了判断不同指标对综合评价的重要性，需要确定各个指标的权重系数。根据数据分析、专家意见和感官人员的评分，对影响虾干品质指标间的重要性进行定性评价，依据 Saaty 九标度法 (表 1) 建立判断矩阵，计算矩阵的最大特征向量 λ_{\max} 和各指标所对应的标准化特征向量，其标准化特征向量为各指标的权重系数。

表 1 标度 1-9 的含义
Table 1 Scale meaning of 1-9

标度	1	3	5	7	9	2、4、6、8	倒数
含义	同等重要	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要	相邻标度重要性的中间值	若指标 i 与 j 的重要性之比为 a_{ij} ，则指标 j 与 i 的重要性之比为 $1/a_{ij}$

(5) 检验判断矩阵的一致性：根据公式 (5)、公式 (6) 分别计算出一致性指标 CI 和一致性比率 CR。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

式中： n 为矩阵的阶数，RI 为随机一致性指标均值，其值如表 2 所示。

当 $CR < 0.1$ 时，说明判断矩阵通过一致性检验；当 $CR \geq 0.1$ 时，说明矩阵不具有合理一致性。矩阵构建不合理，需再一次构造判断矩阵，再进行检验。

表2 RI值
Table 2 Evaluation of RI

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R.I.	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

(6) 虾干品质综合评分的计算: 将归一化的指标数据与对应的组合权重系数做内积, 即可得到各样品的综合评分 Y_i , 公式如下:

$$Y_i = \sum_{j=1}^{10} m_j a_{ij} \quad (7)$$

式中: a_{ij} 为各指标归一化的数值, m_j 为各种指标 a_{ij} 对应的组合权重系数。

1.4 数据处理

以上所有试验, 除质构和色泽外, 均作 3 次平行试验, 结果用“平均值±标准差”表示, 使用 SPSS 23.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验显著性差异 ($P < 0.05$)。Origin 2017 对实验数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 热风干燥对凡纳滨对虾干色泽的影响

色泽是判断虾干品质和影响消费者选购的主要指标之一。优质虾干的虾壳呈红白色, 有光泽, 虾肉呈橙红色。干燥初期, 随着虾体温度升高, 蛋白质逐渐变性, 与蛋白相结合的色素分子被释放出来, 虾体呈现红黄色^[14]。随着干燥的进行, 虾体的色泽发生了变化, 当干燥温度 ≥ 95 °C, 水分含量 $\leq 16\%$ 时, 虾干的头胸部和腹部的 a^* 、 b^* 值显著小于其他干燥条件。随着干燥的进行, 虾体的蛋白质、氨基酸和脂质等物质逐渐发生了美拉德反应和脂质氧化反应等化学反应, 造成类黑色素和脂质氧化聚合物的堆积, 以及类胡萝卜素分子的氧化和异构化, 引起了虾体 a^* 、 b^* 值的下降。温度的升高, 水分含量的下降, 都促进了反应的进行^[19]。在干燥过程中, 头胸部和腹部的 L^* 值变化不明显。因此选取色泽作为热风干燥凡纳滨对虾品质综合评价模型的准则层, 选取头胸部和腹部的 a^* 、 b^* 值作为色泽的指标层。

表3 不同干燥条件凡纳滨对虾头胸部与腹部的色泽变化

Table 3 The color changes of the cephalothoraxes and abdomen of *Penaeus vannamei* under different drying conditions

头胸	105 °C	95 °C	85 °C	75 °C	65 °C	
L^* 值	25%	37.64±2.04 ^{Bb}	40.92±3.10 ^{Aab}	39.16±1.24 ^{Bab}	37.88±3.20 ^{Ab}	43.80±2.30 ^{ABa}
	22%	44.94±3.61 ^{Aab}	43.08±3.40 ^{Aab}	40.72±2.78 ^{Bbc}	36.72±0.51 ^{Ac}	47.06±2.82 ^{ABa}
	19%	43.66±2.15 ^{Aa}	39.80±3.76 ^{Aa}	46.12±2.95 ^{Aa}	39.50±4.33 ^{Aa}	43.30±2.74 ^{Ba}
	16%	44.14±0.74 ^{Aab}	38.86±1.35 ^{AcD}	40.54±2.39 ^{Bbc}	35.44±2.82 ^{Ad}	45.20±2.40 ^{ABa}
	13%	46.86±2.03 ^{Aa}	39.44±4.74 ^{Ab}	47.58±0.83 ^{Aa}	36.02±1.29 ^{Ab}	48.94±2.46 ^{Aa}
	25%	19.10±2.99 ^{Aa}	20.40±1.78 ^{Aa}	19.30±3.26 ^{Aa}	18.10±1.39 ^{Aa}	18.66±2.08 ^{Aa}
	22%	21.14±3.46 ^{Aa}	17.00±2.56 ^{Aa}	17.90±1.11 ^{Aa}	17.58±1.54 ^{Aa}	17.92±0.89 ^{Aa}
	19%	12.22±0.83 ^{Bb}	13.82±3.27 ^{Bb}	19.30±3.46 ^{Aa}	16.20±3.27 ^{Aab}	15.62±3.42 ^{Aab}
	16%	9.82±2.50 ^{Bc}	13.26±1.79 ^{Bb}	17.62±5.20 ^{Aa}	15.64±3.02 ^{Aab}	15.80±2.98 ^{Aa}
	13%	11.44±2.91 ^{Bb}	12.52±1.63 ^{Bb}	17.12±2.57 ^{Aa}	15.22±3.85 ^{Aa}	15.96±3.54 ^{Aa}
a^* 值	25%	20.55±2.10 ^{Aa}	18.99±3.49 ^{Aa}	16.54±2.12 ^{Aab}	13.72±1.37 ^{Ab}	16.52±2.29 ^{Aab}
	22%	20.78±3.37 ^{Aa}	15.30±1.44 ^{ABb}	15.06±1.52 ^{Ab}	13.02±1.26 ^{Ab}	16.92±1.46 ^{Aab}
	19%	14.30±2.08 ^{Bab}	12.22±3.58 ^{Bab}	18.28±4.91 ^{Aa}	10.86±3.27 ^{Ab}	13.48±2.76 ^{Aab}
	16%	5.34±3.13 ^{Cc}	11.58±2.65 ^{Bb}	16.66±4.65 ^{Aa}	13.40±2.97 ^{Aa}	14.82±1.95 ^{Aa}
	13%	7.58±2.60 ^{Cc}	12.40±3.00 ^{Bab}	16.28±3.92 ^{Aa}	13.38±3.01 ^{Aab}	17.96±3.78 ^{Aa}
	b^* 值	25%	54.26±3.13 ^{ABa}	56.26±2.06 ^{Aa}	57.00±2.39 ^{Aa}	54.32±1.56 ^{Aa}
22%		58.36±2.26 ^{Aa}	54.82±2.27 ^{Aab}	57.08±1.54 ^{Aa}	51.60±3.40 ^{ABb}	56.84±1.73 ^{Aa}
19%		57.96±2.74 ^{Aa}	49.78±2.00 ^{Bb}	55.08±3.64 ^{ABab}	53.90±2.44 ^{Aab}	58.18±1.84 ^{Aa}
16%		51.30±5.36 ^{Bab}	48.04±3.18 ^{Bb}	50.76±2.27 ^{Bab}	48.34±1.27 ^{Bb}	56.48±1.98 ^{Aa}
13%		55.52±2.02 ^{ABa}	48.58±3.09 ^{Bb}	55.24±1.87 ^{ABa}	53.00±2.11 ^{ABab}	57.44±2.13 ^{Aa}
25%		26.96±3.92 ^{Ab}	29.50±1.57 ^{Aab}	29.72±2.86 ^{Aab}	25.70±2.62 ^{Bcb}	32.74±1.94 ^{Aa}
22%		31.62±1.88 ^{ABab}	32.28±2.12 ^{Aab}	33.32±1.44 ^{Aa}	22.64±1.31 ^{Cc}	28.94±1.49 ^{Ab}
19%		19.80±1.87 ^{Bb}	20.56±2.87 ^{Bb}	28.18±0.88 ^{Aa}	30.16±2.61 ^{ABa}	28.32±3.10 ^{ABa}
16%		15.52±1.23 ^{Bc}	17.92±2.41 ^{BCc}	28.36±3.34 ^{Ab}	33.42±2.67 ^{Aa}	31.04±1.44 ^{Aab}
13%		15.52±4.21 ^{Bc}	13.30±2.16 ^{Cc}	29.12±2.43 ^{Aab}	32.94±1.70 ^{Aa}	23.82±2.31 ^{Bb}
b^* 值	25%	35.02±1.94 ^{Aa}	34.20±1.57 ^{Aa}	34.02±2.17 ^{Aa}	31.86±2.64 ^{Aa}	33.98±3.54 ^{Aa}

22%	35.96±2.62 ^{Aa}	34.10±2.12 ^{Ab}	31.72±1.49 ^{Ab}	33.80±1.82 ^{Ab}	30.22±2.46 ^{Ab}
19%	15.20±0.43 ^{Bb}	16.04±3.34 ^{Bb}	24.34±3.80 ^{Bb}	25.32±2.57 ^{Ba}	29.42±3.62 ^{Aa}
16%	7.58±2.61 ^{Cc}	16.04±3.89 ^{Bc}	22.90±2.53 ^{Bb}	23.86±1.28 ^{Bb}	30.88±2.33 ^{Aa}
13%	8.48±3.37 ^{Cb}	4.76±2.31 ^{Cb}	25.40±2.94 ^{Ba}	21.06±3.35 ^{Ba}	21.64±1.10 ^{Ba}

注：同一列中的不同大写字母表示样品在不同水分含量间存在显著差异 ($P < 0.05$)；同一行中的不同小写字母表示样品在不同温度间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 热风干燥对凡纳滨对虾干初始菌落总数的影响

干制品的菌落总数是评定产品安全性，预测产品可食性的重要指标。虾干初始菌落总数随干燥温度的升高而下降；当温度从 65 °C 升至 85 °C，初始菌落总数显著下降，之后随温度上升，菌落总数虽下降但变化不显著。当干燥温度为 65 °C 和 75 °C，随着干燥时间增加，水分含量下降，虾干菌落总数显著下降；当干燥温度为 85、95、105 °C，虾干的菌落总数不会随水分含量的下降而减少。热加工过程中，样品的菌落总数会随温度的升高，加热时间的增加而减少，减少到一定程度后，数量趋于稳定。在干燥过程中，鲜虾原始微生物群中脆弱或热敏性的微生物先被杀灭，留下耐热性较强的个体或芽孢，使灭菌后期菌落总数趋于稳定^[20]。根据 GB 10136—2015 《食品安全国家标准 动物性水产制品》，即食水产制品的微生物限量为 5×10^4 CFU/g，所有样品的初始菌落总数均小于限量，产品菌落总数指标合格。

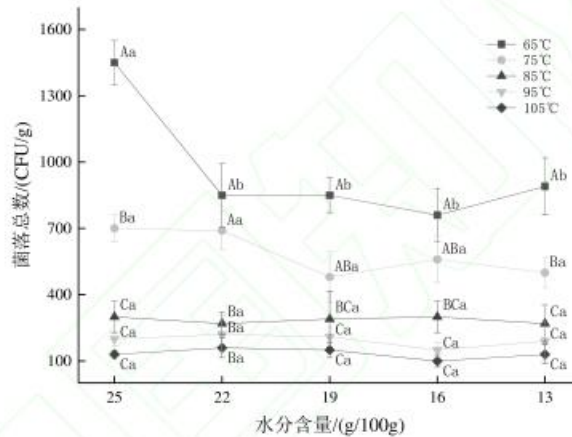


图 2 热风干燥对凡纳滨对虾初始菌落总数的影响

Fig. 2 The initial colony number of *Penaeus vannamei* under different drying conditions

注：不同大写字母表示样品在相同水分含量不同温度间存在显著差异 ($P < 0.05$)；不同小写字母表示样品在相同温度不同水分含量间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.3 热风干燥对凡纳滨对虾干质构的影响

热风干燥过程中，虾干的硬度和咀嚼性受干燥条件影响，随着干燥温度上升，烘干时间增加，水分含量减少而逐渐增大，其中 105-13 虾干硬度和咀嚼性最大。当水分含量相同时，使用较高温度干燥的虾干的硬度和咀嚼性较大。因为烘箱干燥主要是利用对流传热，其传热速度慢，较高的烘干温度，导致虾干表面温度上升较快，出现表面温度较高，而内部温度较低的现象；表面水分蒸发的速率大于水分从内部扩散到表面的速率，导致表面硬化现象发生^[21]。优质虾干应虾肉紧密、柔韧，有嚼劲；干燥温度较低，水分含量较高的虾干，其硬度和咀嚼性较小，虾肉不紧密且发黏；干燥温度较高，水分含量较低的虾干，因大量水分从肌纤维内部流出，使纤维之间黏结，虾肉变硬，难以咀嚼。根据数据分析、文献参考、专家意见和感官人员评分，确定 85-19 样品的硬度和咀嚼性最佳。因此将质构指标的原始数据进行无量纲处理时，样品的硬度与咀嚼性小于样品 85-19 时，使用公式 (3)，反之使用公式 (4)。

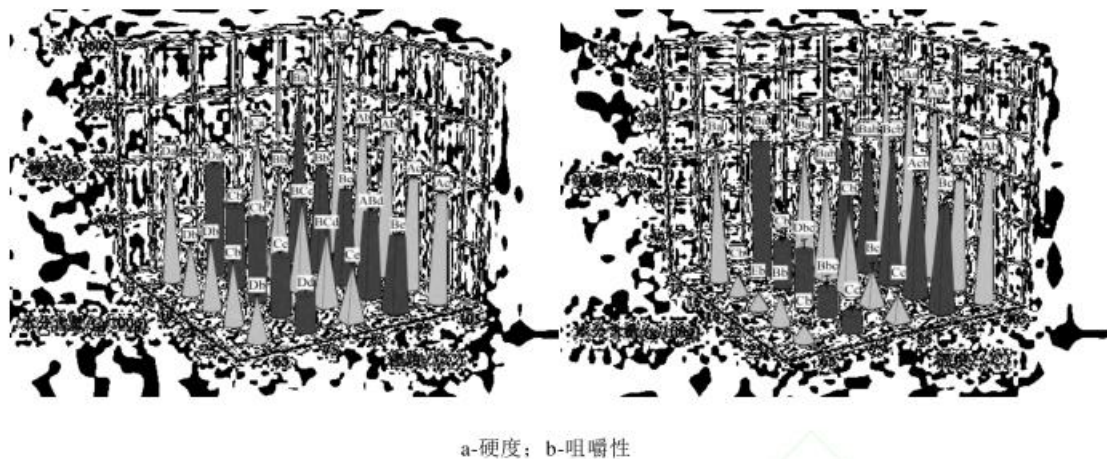


图3 不同干燥条件凡纳滨对虾的硬度和咀嚼性
Fig. 3 The hardness(a) and chewiness(b) of *Penaeus vannamei* under different drying conditions

注: 不同大写字母表示样品在不同温度间存在显著差异 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示样品在不同水分含量间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.4 热风干燥对凡纳滨对虾干挥发性成分的影响

气味是评价食品质量的重要指标,也是消费者购买的重要判断依据^[22]。采用 GC-MS 分析虾干挥发性化合物,以壬酸甲酯为内标物进行定量,计算出虾干的气味活性物质,其结果如图 4、附表 1 所示。随着干燥温度的上升,水分含量的减少,虾干挥发性成分含量和种类都上升,分别从 232.79 ng/g、39 种(65-25)增加到 1 426.22 ng/g、58 种(105-13)。升高温度能够促进美拉德反应和脂类氧化降解反应等反应的发生与进行。其中吡嗪类、醛类和胺类是 3 类含量变化最大的挥发性化合物,其含量分别从 35.04、51.44、61.00 ng/g(65-25)增加到 495.11、313.77、385.62 ng/g(105-13),增加了 13.13 倍、5.10 倍、5.32 倍,三者的总含量占挥发性成分总含量从 68.83%上升到 87.99%;同时吡嗪类和醛类化合物种类也变丰富,分别从 8、7 种增加到 19,12 种。其结果与 HU 等^[3]研究凡纳滨对虾的干燥过程中吡嗪类、醛类和三甲胺变化一致。

虾干的气味活性物质的数量和 OAV 值随着干燥温度的上升,水分含量的减少,大幅度增加,分别从 7 种、90.47 增加到 17 种、1 073.95。25 种不同温度、水分含量的虾干样品共筛选出 24 种气味活性物质,其中吡嗪类 4 种、醛类 10 种、胺类 1 种、酮类 2 种、醇类 3 种、杂环类 3 种、含硫类 1 种。主体气味活性物质(OAV ≥ 10)共 10 种,分别为 2-乙基-5-甲基吡嗪(坚果味)、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪(烤香味、烟熏味)、2,5-二甲基吡嗪(坚果香、烤香味)、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪(烤香味)、三甲胺(青草味、腥味)、2-乙酰-1-吡咯啉(爆米花味)、1-辛烯-3-醇(蘑菇味)、苯甲醛(水果味、花香味)、辛醛(煮土豆味、油脂味)、戊醛(果香)。气味活性物质的种类与 OKABE 等^[23],ZHANG 等^[15],MALL 等^[24]研究结果相似。

吡嗪类化合物是虾干制品中一种含量高、阈值低的挥发性化合物,通常呈现烘烤味、肉香味、坚果味等风味特征,对虾干制品特征香气的形成起至关重要的作用^[25]。其主要来源于美拉德反应,在干燥过程中,先生成吡嗪的前体物 α -氨基羰基化合物,再由两个 α -氨基羰基化合物发生缩合反应,形成二氢吡嗪,然后二氢吡嗪可经非氧化或氧化两个途径形成吡嗪^[26]。醛类因阈值较低且含量较高,对虾干制品的风味贡献较大。苯甲醛、3-甲基丁醛和 2-甲基丁醛是虾干制品重要的气味活性化合物,是经过苯丙氨酸、亮氨酸和异亮氨酸经 Strecker 降解反应生成,主要贡献了花果香、青草味、烤土豆味。戊醛、辛醛等烷基醛主要贡献果香和煮土豆味,是来源于不饱和脂肪酸热氧化降解反应^[27]。三甲胺被认为是水产品中刺激性气味和腥味的主要来源,作为一种评价水产品新鲜度的指标。在热加工中,其主要是由胆碱、甜菜碱、蛋氨酸或三甲胺氧化物的热分解产生。

吡嗪类、醛类和胺类的含量、种类和 OAV 值的占比远高于其他挥发性物质,同时在加热过程中这些化合物含量变化明显,因此选取挥发性成分作为热风干燥凡纳滨对虾品质综合评价模型的准则

层, 选取吡嗪类、醛类和胺类作为挥发性成分的指标层。

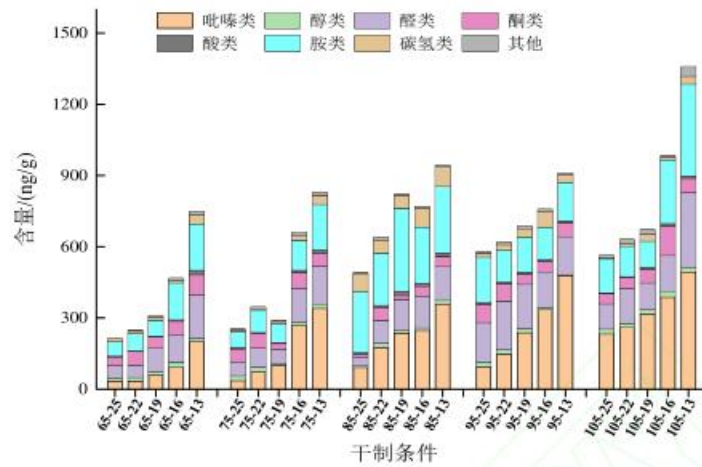


图4 不同干燥条件凡纳滨对虾挥发性成分含量
Fig. 4 The volatile component content of *Penaeus vannamei* under different drying conditions

2.5 基于层次分析法确定各指标权重系数

2.5.1 判断矩阵及其一致性检验结果

根据 Saaty 九标度法构建判断矩阵, 共构建了 1 个准则层和 4 个指标层的判断矩阵, 然后计算各指标的权重系数、 λ_{\max} 、和 CR (表 4), 检验判断矩阵的一致性。其中所有 $CR < 0.1$, 表明所有的判断矩阵都通过一致性检验。根据准则层和指标层的权重系数及关系, 算出各指标的权重系数, 结果如表 5 所示。吡嗪类权重系数最大, 醛类、硬度和咀嚼性次之。吡嗪类和醛类是虾干的特征香气, 虾干理化与卫生指标相同, 可存在香气特征可差异明显现象, 从而导致产品流通过程的质量问题投诉事件频发, 因此虾香味作为虾干的客观评价重要指标无可替代^[28]。

表4 判断矩阵与一致性检验结果
Table 4 Judgment matrix and consistency test results

判断矩阵					权重系数	λ_{\max}	CI	RI	CR
	色泽	微生物	挥发性成分	质构					
准则层	色泽	1	4	1/2	1	4.027 7	0.009 2	0.890 0	0.010 4
	微生物	1/4	1	1/5	1/4				
	挥发性成分	2	5	1	2				
	质构	1	4	1/2	1				
色泽-指标层		头胸 a^* 值	头胸 b^* 值	腹部 a^* 值	腹部 b^* 值	4.000 0	0.000 0	0.890 0	0.000 0
	头胸 a^* 值	1	1	2	2				
	头胸 b^* 值	1	1	2	2				
	腹部 a^* 值	1/2	1/2	1	1				
挥发性成分-指标层		吡嗪类	醛类	胺类		3.005 5	0.002 7	0.520 0	0.005 3
	吡嗪类	1	2	5	0.532 3				
	醛类	1/2	1	2	0.299 3				
质构-指标层		硬度	咀嚼性			-	-	0.000 0	0.000 0
	硬度	1	1	0.500 0					
	咀嚼性	1	1	0.500 0					

表5 各指标的权重系数
Table 5 Weight coefficient of each indicator

指标	头胸 a^* 值	头胸 b^* 值	腹部 a^* 值	腹部 b^* 值	菌落总数	吡嗪类	醛类	胺类	硬度	咀嚼性
权重系数	0.075 6	0.075 6	0.047 6	0.047 6	0.069 3	0.233 2	0.131 1	0.073 7	0.123 2	0.123 2

2.6 虾干品质综合评分

根据综合评分 Y_i (公式 7) 的计算方式, 得出热风干燥凡纳滨对虾的综合评分, 结果如表 6 所示。其中 85-19 的综合评分最高, 为 0.711 1 分, 105-22、85-13、85-16 次之。此时虾干色泽均匀, 为红黄色; 虾肉紧密, 柔韧, 有嚼劲; 虾香味浓郁; 微生物指标合格; 是一种品质优良的虾干。

表6 热风干燥凡纳滨对虾的综合评分
Table 6 The comprehensive score of hot-air-dried shrimp product

水分含量/[g·(100g) ⁻¹] 温度/℃	25	22	19	16	13
65	0.224 2	0.300 1	0.292 3	0.364 6	0.527 0
75	0.219 5	0.311 5	0.405 5	0.539 3	0.606 3
85	0.391 0	0.503 8	0.711 1	0.624 8	0.650 8
95	0.594 9	0.608 9	0.540 7	0.557 7	0.511 6
105	0.617 5	0.680 7	0.456 1	0.457 7	0.540 0

3 结论

在热风温度 65~105 °C 条件进行干燥, 使虾干最终水分含量为 13%~25%, 其硬度、咀嚼性与挥发性成分含量、种类和 OAV 值等指标随着干燥温度上升, 烘干时间增加, 水分含量减少而逐渐增大, 初始菌落总数反之。层次分析法共构建 1 个准则层和 4 个指标层的判断矩阵, 所有的判断矩阵均通过一致性检验。最终虾干综合评分最高的工艺为: 干燥温度 85 °C、虾干水分含量 19%。在该条件下, 得到一种色泽为红黄色, 虾肉紧密、柔韧、有嚼劲, 虾香味浓郁, 微生物指标合格, 品质优良的虾干。层次分析法的构建与运用, 为评价虾干品质和确定生产工艺提供一种质量评价方法。

参 考 文 献

- [1] UDAYASOORIAN L, PETER M, SABINA K, et al. Comparative evaluation on shelf life extension of MAP packed *Litopenaeus vannamei* shrimp treated with natural extracts[J]. LWT, 2017, 77: 217-224.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会, 2021 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021. 22-24.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Centre, China Society of Fisheries. 2021 China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021. 22-24
- [3] HU M Y, WANG S Y, LIU Q, et al. Flavor profile of dried shrimp at different processing stages[J]. LWT, 2021, 146: 111403.
- [4] SOUZA H A L, BRAGAGNOLO N. New method for the extraction of volatile lipid oxidation products from shrimp by headspace-solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and evaluation of the effect of salting and drying[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(3): 590-599.
- [5] 刘达. 中华管鞭虾虾仁不同干燥工艺的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2016.
LIU D. Study on different drying process and storage of *Solenocera Melanthero*[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2016.
- [6] 蔡林林, 吴冬梅, 李小禹, 等. 热风干燥温度对凡纳滨对虾虾仁质构的影响[J]. 食品工业, 2013, 34(11): 108-111.
CAI L L, WU D M, LI X Y, et al. Effect on hot air drying to texture of *Penaeus vannamei*[J]. The Food Industry, 2013, 34(11): 108-111.
- [7] 胡梦月, 王善宇, 薛勇, 等. 即食虾干加工过程风味变化[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(6): 10-16.
HU M Y, WANG S Y, XUE Y, et al. Changes in flavor characteristics of dried shrimps during processing[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2020, 10(6): 10-16.
- [8] 殷磊. 即食干制对虾加工工艺及货架期预测[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
YIN L. Ready-to-eat dried shrimp processing technology and shelf life prediction[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [9] 任爱农, 卢爱玲, 田耀洲, 等. 层次分析法用于中药复方提取工艺的多指标权重研究[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(4): 372-374.
REN A N, LU A L, TIAN Y Z, et al. AHP application to study of weighted coefficient on multicriteria optimization of extraction technology about Chinese traditional compound drugs[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2008, 33(4): 372-374.
- [10] 郭江玉, 闫彦, 孙磊, 等. 层次分析法多指标评价优选四物汤提取工艺[J]. 辽宁中医药大学学报, 2017, 19(11): 54-56.

- GUO J Y, YAN Y, SUN L, et al. Multi-index evaluation of reflux extraction techniques optimization of siwu decoction by analytic hierarchy process[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 19(11): 54-56.
- [11] HU Z Y, ZHOU H L, LI Y P, et al. Optimized purification process of polysaccharides from *Carex meyeriana* Kunth by macroporous resin, its characterization and immunomodulatory activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 76-86.
- [12] 裴丽娜, 陈明, 葛艳. 基于层析分析法的凡纳滨对虾品质评价因素分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 334-337.
- [13] BEVILACQUA M, D'AMORE A, POLONARA F. A multi-criteria decision approach to choosing the optimal blanching-freezing system[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(3): 253-263.
- [14] 段少奇, 吉宏武, 张迪, 等. 基于模糊数学评价法优化凡纳滨对虾真空微波干燥工艺[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(2): 131-138.
- DUAN S Q, JI H W, ZHANG D, et al. Optimization of vacuum microwave drying technology for *Litopenaeus vannamei* based on fuzzy mathematics sensory evaluation[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(2): 131-138.
- [15] ZHANG D, JI H W, LIU S C, et al. Similarity of aroma attributes in hot-air-dried shrimp (*Penaeus vannamei*) and its different parts using sensory analysis and GC-MS[J]. Food Research International, 2020, 137: 109517.
- [16] 陈光静, 郑炯, 丁涌波, 等. 顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用结合嗅闻法分析异味薏米的异味成分[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(1): 230-237.
- CHEN G J, ZHENG J, DING Y B, et al. Determining off-flavor compounds in adlay seeds using HS-SPME-GC/MS and GC-olfactometry[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(1): 230-237.
- [17] YAO L Y, MO Y F, CHEN D, et al. Characterization of key aroma compounds in Xinjiang dried figs (*Ficus carica* L.) by GC-MS, GC-olfactometry, odor activity values, and sensory analyses[J]. LWT, 2021, 150: 111982.
- [18] JIANG X L, JIN M Y, PIAO X C, et al. Fed-batch culture of *Optopanax elatus* adventitious roots: Feeding medium selection through comprehensive evaluation using an analytic hierarchy process[J]. Biochemical Engineering Journal, 2021, 167: 107927.
- [19] 谢笔钧. 食品化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- XIE B J. Food Chemistry[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [20] 张泽伟, 段伟文, 陈铭, 等. 过热蒸汽对熟制小龙虾优势腐败菌的杀菌动力学及其机理[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(1): 87-96.
- ZHANG Z W, DUAN W W, CHEN M, et al. Inactivation kinetics and mechanisms of dominant spoilage bacteria in cooked crayfish (*Procambarus clarkii*) by superheated steam[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(1): 87-96.
- [21] JING L, MIN L, YING Z, et al. The low-field NMR studies the change in cellular water in tilapia fillet tissue during different drying conditions[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(5): 2 644-2 657.
- [22] 罗静, 李敏, 张莹, 等. 电子鼻结合 GC-MS 分析不同干燥方式对罗非鱼片挥发性风味成分的影响[J]. 南方水产科学, 2022, 18(1): 135-143.
- LUO J, LI M, ZHANG Y, et al. Effect of different drying methods on volatile components of tilapia fillets analyzed by electronic nose combined with GC-MS[J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(1): 135-143.
- [23] OKABE Y, INOUE Y, KANDA Y, et al. Odor-active compounds contributing to the characteristic aroma of shrimp cooked whole, including shells and viscera[J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(1): 233-241.
- [24] MALL V, SCHIEBERLE P. Evaluation of key aroma compounds in processed prawns (whiteleg shrimp) by quantitation and aroma recombination experiments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(13): 2 776-2 783.
- [25] ROCHAT S, EGGER J, CHAINTREAU A. Strategy for the identification of key odorants: Application to shrimp aroma[J]. Journal of Chromatography A, 2009, 1216(36): 6 424-6 432.
- [26] 余祥英, 胡军, 曾世通, 等. Maillard 反应中杂环香味化合物形成机理的研究进展[J]. 香料香精化妆品, 2012(4): 46-53.
- YU X Y, HU J, ZENG S T, et al. Research progress on the formation mechanism of heterocyclic flavor compounds in Maillard reaction[J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2012(4): 46-53.
- [27] 刘登勇, 王道, 吴金城, 等. 肉制品烟熏风味物质研究进展[J]. 肉类研究, 2018, 32(10): 53-60.
- LIU D Y, WANG X, WU J C, et al. Recent progress in research on volatile flavor compounds of smoked meat products[J]. Meat Research, 2018, 32(10): 53-60.
- [28] 张迪, 吉宏武, 陈浩, 等. 脂质对凡纳滨对虾热风干制品香气特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7): 189-196.
- ZHANG D, JI H W, CHEN H, et al. Effect of lipids on the aroma attributes of hot-air-dried shrimp (*Penaeus vannamei*)[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(7): 189-196.