

南美白对虾烤制过程中水分迁移及品质变化规律

梁 瑞¹, 林松毅^{1,2,3}, 刁华玉¹, 陈 冬^{1,2,3}, 何雪晴¹, 孙 娜^{1,2,3*}

(¹ 大连工业大学食品学院 辽宁大连 116034

² 国家海洋食品工程技术研究中心 辽宁大连 116034

³ 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心 辽宁大连 116034)

摘要 以南美白对虾为研究对象,基于低场核磁共振(LF-NMR)和磁共振成像(MRI)技术研究南美白对虾在烤制过程中水分状态、含量的变化,解析其水分迁移规律。考察了南美白对虾在烤制过程中色度、质构与风味的变化情况。LF-NMR 结果显示:随着烤制时间的增加,南美白对虾的横向弛豫时间(T_2)变小,表明水分流动性变低。MRI 结果显示:在烤制过程中水分持续减少。南美白对虾含有强结合水、弱结合水、不易流动水和自由水共 4 种水分状态,在烤制过程中不易流动水向自由水和结合水转化。对不同温度烤制的南美白对虾的 a^* 值和 ΔE 值进行比较,发现相对于 180 °C 和 220 °C,200 °C 烤制相同时间的南美白对虾色泽更佳。熟化后的南美白对虾硬度与咀嚼性随烤制时间的增加而增大 ($P < 0.05$),黏聚性与弹性没有显著性变化 ($P > 0.05$)。结合感官评定,发现南美白对虾在 200 °C 烤制 15 min 时品质最佳。气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)分析发现 200 °C 烤制 15 min 后的南美白对虾富含醛类和酯类化合物,形成烤虾特有香味。本研究可为南美白对虾的精深加工提供理论参考。

关键词 南美白对虾; 烤制; 低场核磁共振; 水分迁移; 品质; 风味

文章编号 1009-7848(2022)11-0204-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.11.022

南美白对虾(*Penaeus vannamei*),又名凡纳滨对虾,是世界三大优良养殖虾类品种之一^[1]。它是一种营养均衡的优质蛋白质资源,蛋白质含量高达 18.71%,富含 8 种人体必需氨基酸和大量维生素和矿物质^[2]。为了防止南美白对虾捕捞后腐烂变质,大部分的南美白对虾捕捞后进行冷冻保存,产品形式比较单一,难以满足市场需求^[3]。有必要研发营养价值高、食用品质好的虾类产品来满足市场需求。

虾的传统热加工方式为蒸制和煮制,随着生活节奏的加快,虾的加工方式需要变得更加的简单和便捷^[4]。烤制是食品热加工过程中的重要工序,可以迅速、均匀地将食品加热,降低食品中的水分含量,形成独特的食品风味,改变食品的色泽和质构^[5]。食品中水分对于其质构、风味、口感等均有很大的影响,能够直接影响到消费者的接受程度。董志俭等^[6]研究发现烤制可使鱿鱼水分含量有效减少,损失的水分主要为不易流动水和结合水,

提升了鱿鱼的口感。南美白对虾中水分含量高达 70%,目前在水分影响南美白对虾烤制品质的研究中,主要集中在水分含量变化对烤制品质的影响^[7-8],而对烤制过程中水分迁移规律缺乏深入的研究。食品的色泽、口感、风味等品质决定了消费者的选购意愿。合适的烤制工艺可有效改善南美白对虾的色泽、质构和风味等品质。

本研究用低场核磁共振(Low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)和磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)技术,从微观角度监测南美白对虾在烤制过程中水分状态和分布,分析不同烤制条件下其水分迁移规律;结合色度、质构等特性探讨烤制条件对虾品质的影响。采用气相-离子迁移谱(Gas chromatography-ion migration spectrometry, GC-IMS)技术分析形成烤虾特有香味的挥发性有机物。以期以南美白对虾的精深加工提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验原料

冷冻南美白对虾,购于辽宁省大连市新智联农贸市场,每公斤 30~40 只。

收稿日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(32022067)

第一作者: 梁瑞,女,硕士生

通信作者: 孙娜 E-mail: sunna1215@126.com

1.2 主要试剂

牛血清蛋白,生工生物工程(上海)股份有限公司;三羟甲基氨基甲烷,北京索莱宝科技有限公司。

1.3 主要仪器与设备

MesoQMR23-060H 核磁共振成像分析仪,上海纽迈有限公司;TA.XT 质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;UltraScan PRO 测色仪,美国 Hunter Lab 公司;冷冻离心机,美国 Thermo Fisher 公司;M200 酶标定量测定仪,瑞士 Tecan Infinite 公司;FlavourSpec®风味分析仪,德国 G.A.S. 公司。

1.4 试验方法

1.4.1 南美白对虾烤制方法 将整只南美白对虾放入预热好的烤箱中,在不同温度(180,200,220℃)下分别加热 3,6,9,12,15,18 min,烤制完成后迅速用锡纸包裹放入碎冰上进行冷却,冷却到室温后即时测试相关指标。

1.4.2 低场核磁共振波谱的测定 将不同温度、不同时间烤制的南美白对虾放入 MesoQMR23-060H 核磁共振成像分析仪的 60 mm 直径的射频线圈的中心。Carr-Pur-cell-Meiboom-Gill 序列(CPMG)弛豫信号使用参数为:P1 为 23 μs,P2 为 42 μs,Tw 为 3 000 ms,RG1 为 10,DRG1 为 1,PRG 为 2,NECH 为 1 500,Ns 为 8。使用 Multi ExpInv Analysis 软件,结合迭代重建技术对 CPMG 弛豫数据进行多指数拟合,通过拟合,得到弛豫时间、峰面积。对反演后的数据进行单位质量处理,作为分析各组分变化的依据。

1.4.3 磁共振成像 将不同温度、不同时间烤制的南美白对虾放入 60 mm 直径的射频线圈的中心,由核磁共振成像分析仪的成像软件获得磁共振图像。由核磁共振成像分析仪的成像软件获得磁共振图像。使用 SE 成像序列获得质子密度加权

图像。成像参数设定:频率编码步数为 256;相位编码步数为 192,视野为 100 mm×100 mm,扫描次数为 2,回波时间为 20 ms,氢质子加权成像的重复时间为 2 100 ms。使用软件 Osirix (OsiriX Life v.7.0.4, Geneva, Switzerland)绘制伪彩色图像。

1.4.4 色度的测定 利用测色仪测定烤制后南美白对虾(带壳)第二腹节表面的颜色,包括 L^* 、 a^* 和 b^* 。色差 ΔE 的计算公式如下:

$$\Delta E = [(L^* \cdots L_0^*)^2 + (a^* \cdots a_0^*)^2 + (b^* \cdots b_0^*)^2]^{1/2}$$

式中, L_0^* 、 a_0^* 及 b_0^* 值是新鲜南美白对虾的亮度、红度和黄度, L^* 、 a^* 和 b^* 值是烤制过程中南美白对虾的亮度、红度和黄度。

1.4.5 质构的测定 将烤制后的南美白对虾进行脱壳,选择虾仁的第二腹节进行测定。探头型号为 P50,测试前、中、后速度分别为 2,1,1 mm/s,压缩程度 50%,压 2 次,隔 5 s,由计算机软件直接得到硬度、咀嚼性、弹性以及黏聚性的数据结果。

1.4.6 肌原纤维蛋白相对提取率的测定 称取 3.0 g 切碎后的虾肉样品,加入 10 倍的 0.02 mol/L Tris-HCl 缓冲液(pH 7.0,含 0.05 mol/L KCl),8 000 r/min 条件下均质 1 min,在 4℃、10 000 r/min 条件下离心 20 min,收集沉淀,操作重复一次。将 3 倍的 0.02 mol/L Tris-HCl 缓冲液(pH 7.0,含 0.6 mol/L KCl)加入沉淀,8 000 r/min 条件下均质 1 min,在 4℃下静置 1 h,在 4℃、10 000×g 条件下离心 15 min,收集的上清液即为肌原纤维蛋白缓冲液。采用双缩脲法测定上清液中蛋白质含量,即为肌原纤维蛋白含量。以新鲜南美白对虾的提取率为 100%,计算烤制后南美白对虾肌原纤维蛋白的相对提取率。

1.4.7 感官评价 根据 SC/T 3305-2003《烤虾》^[9]中的感官要求,评价烤制后南美白对虾的口感、滋味和气味,采用 5 分制评分。选取 8 名食品专业同学组成感官评价小组。

表 1 烤虾感官评分标准

Table 1 Standards of sensory evaluation of roast shrimp

评分项目	0~2	2~4	4~5
口感	虾肉肉质结实偏硬,咀嚼性较差	虾肉肉质基本柔韧,咀嚼性较好	虾肉肉质非常柔韧,咀嚼性很好
滋味	鲜味不足,味道很淡	鲜味一般,回味不足	滋味鲜美,咸鲜可口,具有回味
气味	基本无烤虾特有的香气,有一定的腥味,无其它异味	具有一定的烤虾特有香味,没有任何异味	具有浓厚的烤虾特有香气,没有任何异味

1.4.8 气相-离子迁移谱 (GC-IMS) 分析 采用 FlavourSpec®风味分析仪分析南美白对虾烤虾的挥发性成分,将烤虾肉打碎,称取 1 g 装入 20 mL 顶空瓶中,烤虾肉在 40 °C 孵育 20 min。孵育后,用注射器在 85 °C 自动将 500 μ L 顶空注入进样器。用 N_2 将样品送入 FS-SE-54-CB 毛细管柱 (15 m \times 0.53 mm)。程序流速为:0~2 min,2 mL/min; 2~10 min,2~20 mL/min;10~20 min,20~100 mL/min;20~30 min,100~150 mL/min。漂移气为 N_2 ,流量为 150 mL/min。利用 Laboratory Analytical Viewer(LAV)分析软件及 GC \times IMS Library Search 定性软件对烤虾的挥发性有机物进行采集和分析。

1.5 数据处理

使用 SPSS 软件进行显著性分析,利用 Origin 8.5 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 基于 LF-NMR 和 MRI 技术解析南美白对虾在烤制过程中的水分迁移规律

LF-NMR 是一种新型无损检测技术,广泛应用于食品中水分迁移和分布状态的研究中^[10]。图 1 是不同烤制温度下南美白对虾的 T_2 反演谱,可观察到 4 个峰,分别为 T_{2b} 、 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 。不同峰代表的水分状态不同^[11]。 T_2 弛豫时间的变化能够反映水分子的流动性^[12],与水中氢质子自由程度和结合力有关^[13]。 T_2 弛豫时间越小,表明水分与底物结合越紧密。 T_{2b} 的范围在 0~2 ms,被认为是紧密附着在南美白对虾蛋白分子表面极性基团上的强结合水; T_{21} 的范围在 2~10 ms,可能是与组织结构相关或被困在其中的弱结合水; T_{22} 的范围在 10~100 ms,是肌原纤维结构内的固定化水,即不易流动水; T_{23} 的范围在 100~1 000 ms,是肌原纤维结构中的游离水,即自由水。随着烤制时间的增加, T_2 反演谱整体向左移动, T_{22} 和 T_{23} 显著降低 ($P < 0.05$,图 2)。这可能是由于各组分的水在烤制过程中不断地被除去,组织结构对水的束缚作用增大,导致了水分的流动性下降。基于 MRI 技术获取的质子密度伪彩色图像(图 3)中,红色代表高质子密度,表明样品中的水分含量高,蓝色代表低质子密度,表明样品中水分含量低。随着烤制时间

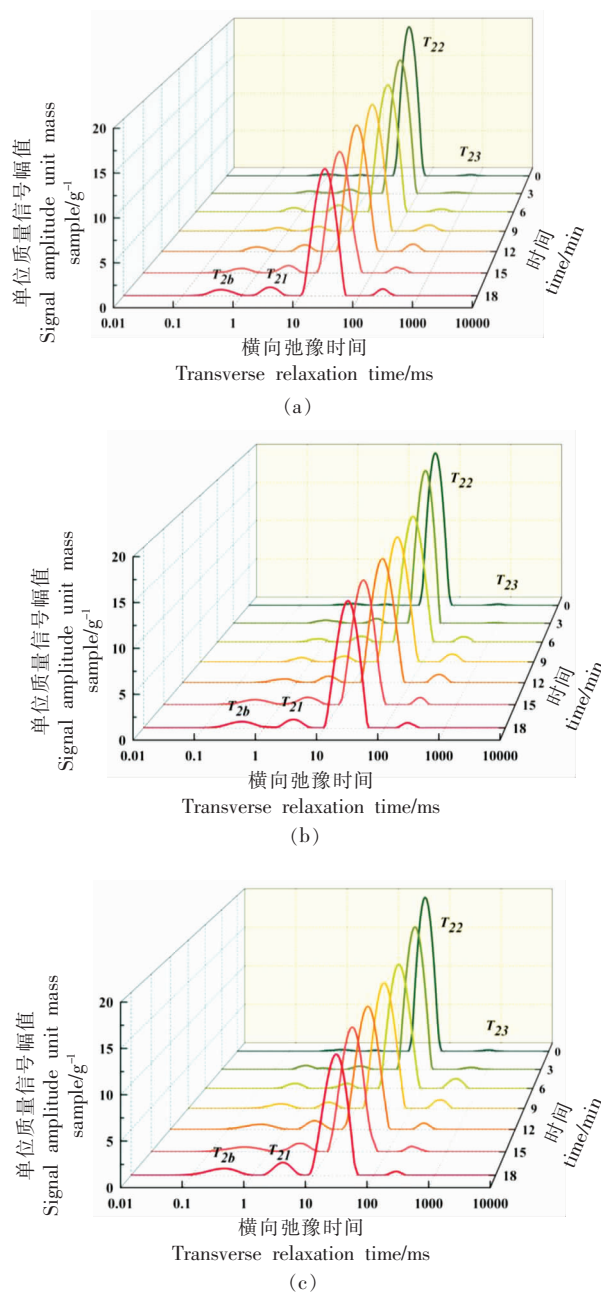
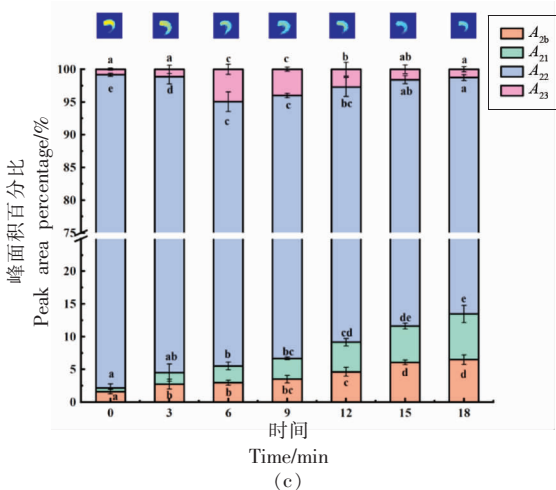
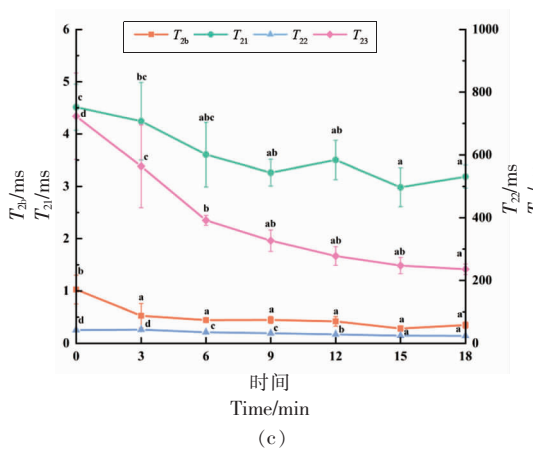
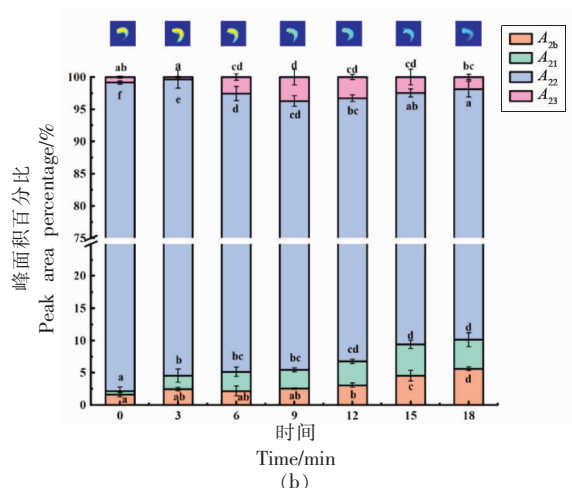
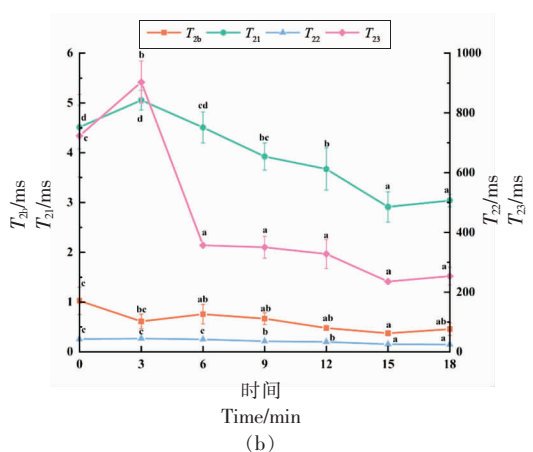
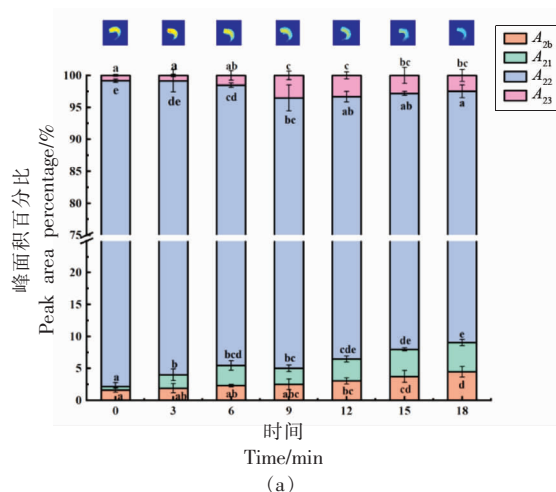
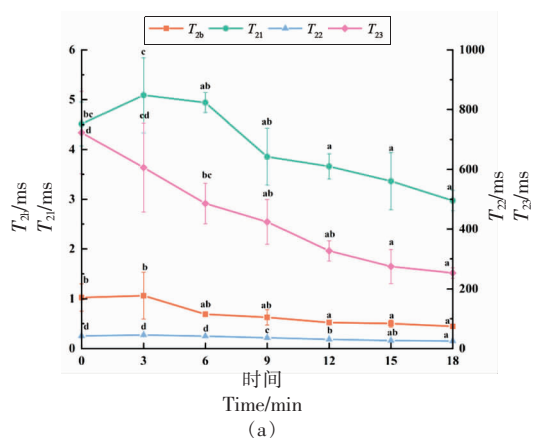


图 1 南美白对虾在 180 °C(a)、200 °C(b)、220 °C(c) 烤制时的 T_2 反演谱

Fig.1 T_2 inversion spectra of *Penaeus vannamei* baked at 180 °C (a), 200 °C (b), and 220 °C (c)

的增加,伪彩色图像由红色、黄色逐渐变为蓝色,说明了南美白对虾中在烤制过程中含水量持续下降。

低场核磁峰面积占比变化可以表征各种水组分的分布状态和水分迁移情况^[14]。从图 3 可以观察到,南美白对虾中的水主要是不易流动水,不易



注:小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

注:小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

图 2 南美白对虾在 180 °C(a)、200 °C(b)、220 °C(c) 烤制时横向弛豫时间 T_2 的变化

图 3 南美白对虾在 180 °C(a)、200 °C(b)、 220 °C(c)烤制时峰面占比和伪彩色图像

Fig.2 Changes of transverse relaxation time T_2 of *Penaeus vannamei* baked at 180 °C (a), 200 °C (b), and 220 °C (c)

Fig.3 Peak area percentage and Pseudo-color picture of *Penaeus vannamei* baked at 180 °C(a), 200 °C (b), and 220 °C (c)

流动水的自由度介于结合水与自由水之间,容易发生转化^[12]。在 180 °C 和 200 °C 烤制到 9 min 时, 220 °C 烤制到 6 min 时, 发现强结合水 A_{2h} 和弱结合水 A_{2l} 所占比例显著增加 ($P < 0.05$), 不易流动水 A_{22} 所占比例显著减小 ($P < 0.05$), 自由水 A_{23} 所占比例显著增加 ($P < 0.05$), 说明在烤制过程中不易流动水向自由水和结合水转化。自由水所占比例上升的原因可能是在烤制过程中南美白对虾肌原纤维结构发生收缩, 阻止了不易流动水散失, 使不易流动水向自由水发生转化^[15]。随着烤制时间的增加, 由于自由水活跃且容易散失, 散失的自由水多于不易流动水转化的自由水, 自由水所占比例逐渐下降。与 180 °C 与 200 °C 相比, 温度更高的 220 °C、6 min 后自由水所占比例开始下降, 而 180 °C 和 200 °C 时 9 min 后开始下降, 表明高温可以加快水分分布的改变。

2.2 不同烤制温度下南美白对虾色泽随烤制时间的变化规律

在非接触状态下, 水产品的色泽可能是消费者评判质量的唯一标准, 良好的色泽可以刺激食欲, 决定消费者的选购意愿^[16]。虾的市场价值主要

取决于其体色的视觉吸引力。虾内的主要色素物质是虾青素, 为虾组织提供了红橙色的色素^[17]。未经烤制的虾的 a^* 值为负值, 表明新鲜的南美白对虾的虾青素稳定, 虾体呈蓝绿色。随着烤制时间的增加, a^* 值变为正值, 说明南美白对虾中的虾青素受热分解而暴露, 虾体呈红色^[18]。不同温度条件下, 随着烤制时间的增加, 南美白对虾的 a^* 值呈先上升后下降的趋势。 a^* 值的下降可能是因为南美白对虾中游离态虾青素受热发生降解、氧化分解或异构化^[19]。与 180 °C 和 220 °C 相比, 200 °C 烤制的南美白对虾 a^* 值更高, 其在 200 °C 烤制 15 min 时 a^* 值达到了最大值。总色差 ΔE 值来反映烤制与新鲜的南美白对虾间的色泽总体差异程度。与 a^* 值的结果一致, 200 °C 烤制的南美白对虾 ΔE 值比 180 °C 和 200 °C 高。200 °C 烤制 15 min 和 18 min 的 ΔE 值达到了最大值, 表明其总体色泽变化程度最大。而南美白对虾在 200 °C 烤制 12 min 和 18 min 的 a^* 值没有显著性差异 ($P > 0.05$)。为了确定最合适的烤制条件, 还需要对 200 °C 烤制 12, 15 min 和 18 min 进行进一步研究。

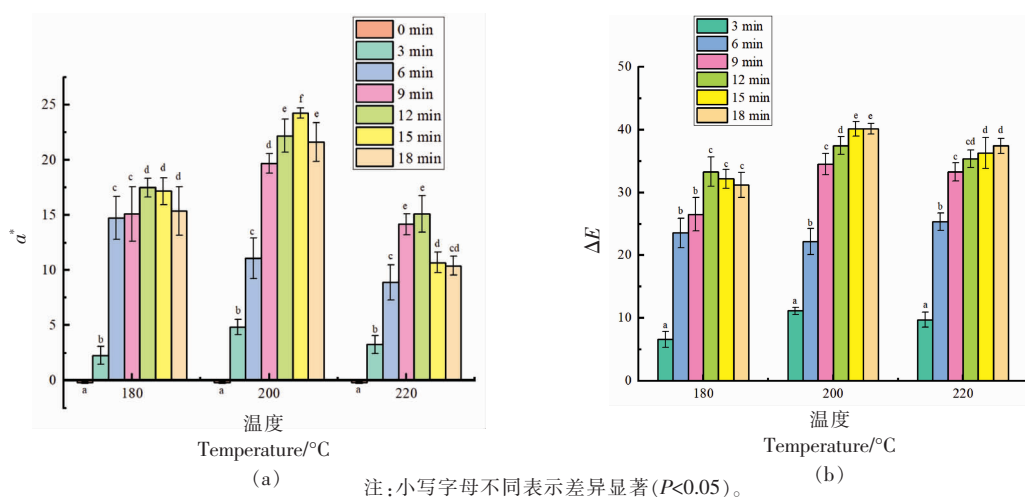


图 4 不同烤制温度下南美白对虾的 a^* (a) 与 ΔE (b) 值

Fig.4 a^* (a) and ΔE (b) values of *Penaeus vannamei* at different baking temperature

2.3 南美白对虾烤制过程中肌原纤维蛋白相对提取率的变化

肌原纤维蛋白提取率可以反映水产品的熟化程度, 当其低于 10% 时, 水产品达到熟化状态^[20]。从图 5 中可以看出, 南美白对虾肉受热后其肌原

纤维蛋白的相对提取率呈先快速降低后缓慢降低。烤制到 3 min 时, 肌原纤维蛋白发生变性使肌原纤维蛋白相对提取率迅速降低。随着烤制时间继续增加, 肌原纤维蛋白继续降解, 肌原纤维蛋白从肌纤维间逐渐流失到组织外, 使肌原纤维蛋白

相对提取率继续下降^[21]。200 ℃烤制 9 min 时肌原纤维蛋白质提取率为 8.73%,已降至 10%以下,表明此时虾肉已经完全熟化。

2.4 南美白对虾烤制过程中质构品质变化规律

经烤制后南美白对虾口感更佳,而过度加热,组织结构被严重破坏,影响口感。质构仪能够客观地反映出食品品质特性,以量化指标全面评价食

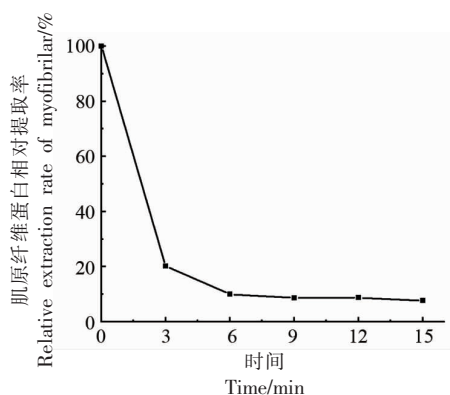


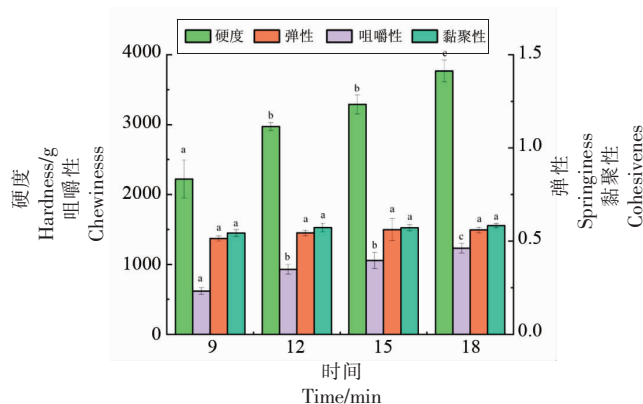
图 5 南美白对虾烤制过程中肌原纤维蛋白相对提取率

Fig.5 Changes in the relative extraction rate of myofibrillar protein of *Penaeus vannamei* during baking

2.5 不同烤制时间南美白对虾烤虾感官评价

感官评价能分析和描述食品的口感、滋味和风味的感官特性,能够直观的反映消费者对食品的接受和喜好程度。综合考虑上述 a^* 值、 ΔE 值、肌原纤维相对提取率、质构品质分析结果,选择 200 ℃烤制 12,15,18 min 的南美白对虾进行感官评价。200 ℃烤制 12 min 和 15 min 的南美白对虾的

品^[22]。随着烤制时间的增加,虾的硬度和咀嚼性显著增加 ($P<0.05$),硬度和咀嚼性增加的主要原因是烤制过程中的不断地脱水,虾的肌原纤维发生收缩、蛋白质受热变性形成稳定结构,使虾肉变硬^[23]。熟化后烤制的过程中弹性和粘聚性没有显著性变化 ($P>0.05$)。



注:小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

图 6 南美白对虾烤制过程中的质构变化

Fig.6 Changes in texture of *Penaeus vannamei* during baking

口感明显优于 200 ℃烤制 18 min。在对质构变化的研究中,18 min 的硬度和咀嚼度也显著高于 12 min 和 15 min ($P<0.05$),这可能是导致口感下降的原因。对于综合得分来说,南美白对虾烤制 15 min 时的得分最高。综合考虑 a^* 值、 ΔE 、口感、滋味、气味、质构多种因素,当烤制温度为 200 ℃,烤制时间为 15 min 时感官品质最佳。

表 2 不同烤制时间南美白对虾烤虾感官评分

Table 2 Sensory score of *Penaeus vannamei* at different baking time

条件	口感	滋味	气味	得分
200 ℃、12 min	3.63 ± 0.74	4.25 ± 0.46	3.00 ± 0.76	10.87 ± 0.83
200 ℃、15 min	3.63 ± 0.52	3.88 ± 0.99	3.87 ± 0.83	11.00 ± 1.77
200 ℃、18 min	2.88 ± 1.36	3.63 ± 1.19	3.50 ± 0.75	10.00 ± 3.12

2.6 用 GC-IMS 分析烤制的南美白对虾的挥发性成分

通过对 GC-IMS 检测出的南美白对虾烤制 15 min 挥发性成分分析,发现醛类化合物在烤虾中所占比重最高,包括戊醛、壬醛、己醛、庚醛、3-甲基丁醛和 2-甲基丁醛。醛类化合物通常源于鲜虾本身、脂肪氧化或美拉德反应,且呈现出阈值较低

的特点,具有类脂肪的香味,属于构成肉品特征性风味的成分,因此醛类化合物在烤虾的整体风味形成有着重要贡献^[24-25]。酯类化合物是由脂质代谢生成的羧酸与醇发生酯化反应生成的产物,对虾的肉味特征形成具有重要贡献^[26]。在烤虾中检测到的脂类物质有乙酸丙酯、乙酸乙酯。有研究发现乙酸乙酯可以赋予产品果香味^[27-28]。从烤虾中检测

熟化后的南美白对虾的质构品质进行分析比较,发现硬度和咀嚼度会随着烤制时间的增加而增大($P < 0.05$),而弹性与黏聚性没有显著性变化($P > 0.05$)。对烤制的南美白对虾的 a^* 值、 ΔE 值、质构、感官评价进行综合分析,发现南美白对虾在200℃烤制15 min时最佳,此时的烤虾富含醛类和酯类化合物,为烤虾提供了特殊的香气。

参 考 文 献

- [1] 陈杭君, 郜海燕, 戴志远, 等. 捕前禁食对南美白对虾品质与黑变的影响[J]. 中国食品学报, 2009, 9(1): 165-169.
CHEN H J, GAO H Y, DAI Z Y, et al. Effect of withholding food before catching on quality and browning of prawn (*Penaeus vannamei*)[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2009, 9(1): 165-169.
- [2] 张高静, 韩丽萍, 孙剑锋, 等. 南美白对虾营养成分分析与评价[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 254-260.
ZHANG G J, HAN L P, SUN J F, et al. Analysis and evaluation of nutritive composition in *Penaeus vannamei*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(8): 254-260.
- [3] 艾红, 黄巧珠, 徐泽智, 等. 我国对虾产品贸易结构与出口竞争力分析[J]. 广东农业科学, 2008(11): 127-131.
AI H, HUANG Q Z, XU Z Z, et al. Analysis on export structure and competitiveness for shrimp products in China[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2008(11): 127-131.
- [4] 袁亚明, 荀瑞珑, 于小番, 等. 两种烹调方式对明虾的营养品质及质构的影响[J]. 美食研究, 2020, 37(3): 48-52.
YUAN Y M, XUN R L, YU X F, et al. Effects of two cooking methods on nutritional quality and texture of prawns[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2020, 37(3): 48-52.
- [5] 蔡路昀, 马帅, 程焯茹, 等. 不同烤制时间对沙丁鱼片风味及品质的影响[J]. 水产学报, 2016, 40(5): 785-798.
CAI L Y, MA S, CHENG X R, et al. Effects of different roasting time periods on character and flavor in sardine slices[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(5): 785-798.
- [6] 董志俭, 李世伟, 莫尼莎, 等. 秘鲁鱿鱼烤制过程中的水分及质构变化[J]. 食品工业科技, 2014, 35(11): 61-63.
DONG Z J, LI S W, MO N S, et al. Change of moisture and texture of dosidicus squid during roasting process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(11): 61-63.
- [7] 鲁淑彦, 迟海, 李学英, 等. 含水量对软烤虾制品品质变化的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 86-90.
LU S Y, CHI H, LI X Y, et al. Effect of water content on the quality change of roast shrimp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 86-90.
- [8] 涂敏建, 迟海, 杨宪时, 等. 不同水分含量对南极磷虾烤虾质构和色泽的影响[J]. 现代食品科技, 2012, 28(9): 1102-1105.
TU M J, CHI H, YANG X S, et al. Effect of different moisture content on the texture and chroma of roast Antarctic krill[J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(9): 1102-1105.
- [9] 许永安, 许健全, 廖登远, 等. 烤虾: SC/T 3305-2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
XU Y A, XU J Q, LIAO D Y, et al. Roast shrimp: SC/T 3305-2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [10] TAN M Q, LIN Z Y, ZU Y X, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of instant sea cucumber: Emphatically on water status of by LF-NMR and MRI[J]. Food Research International, 2018, 109: 65-71.
- [11] CHENG S S, TANG Y Q, TAN Z, et al. Approach for monitoring the dynamic states of water in shrimp during drying process with LF-NMR and MRI[J]. Drying Technology, 2018, 36(7): 841-848.
- [12] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 116-123.
LI D J, DUAN Z H, LIU Y, et al. Variation in water content during vacuum microwave drying of flavored ym chips process analyzed by low-field nuclear magnetic resonance imaging[J]. Food Science, 2019, 40(5): 116-123.
- [13] XU C C, LI Y F. Correlation of viscoelastic behavior with water state and ultrastructure in hot air-

- dried carrots[J]. Food Control, 2015, 50: 23-30.
- [14] 甄少波, 刘奕忍, 郭慧媛, 等. 低场核磁共振分析猪肉宰后成熟过程中的水分变化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 66-70.
- ZHEN S B, LIU Y R, GUO H Y, et al. Analysis of moisture changes of pork during postmortem aging by low-field NMR [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22): 66-70.
- [15] 朱莹莹, 张丽, 汝骅, 等. 牛肉加热过程中水分迁移规律研究[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 122-127.
- ZHU Y Y, ZHANG L, RU H, et al. Study on water migration law in beef during heating[J]. Storage and Procese, 2021, 21(2): 122-127.
- [16] ALCALDE M J, NEGUERUELA A I. The influence of final conditions on meat colour in light lamb carcasses[J]. Meat Science, 2001, 57(2): 117-123.
- [17] YANAR Y, MEHMET CELIK M Y. Seasonal changes in total carotenoid contents of wild marine shrimps (*Penaeus semisulcatus* and *Metapenaeus monoceros*) inhabiting the eastern Mediterranean[J]. Food Chemistry, 2004, 88(2): 267-269.
- [18] 傅新鑫. 南美白对虾热加工特性及其预制产品保鲜的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
- FU X X. The effect of heating process on the quality of *Penaeus vannamei* and its shelf life during storage [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017.
- [19] 顾赛麒, 戴王力, 鲍嵘斌, 等. 煮制工艺对中国对虾品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 276-283.
- GU S Q, DAI W L, BAO R B, et al. Effect of cooking on the quality of *Fenneropenaeus chinensis* [J]. Food Science, 2020, 41(2): 276-283.
- [20] 朱蓓薇. 海珍品加工理论与技术的研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 235-242.
- ZHU B W. Study on processing theory and technology of Marine treasures[M]. Beijing: Science Press, 2010: 235-242.
- [21] 傅新鑫, 王焱, 李德阳, 等. 蒸制过程中大菱鲆肌肉理化特性、组织结构及蛋白特性变化[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 56-62.
- FU X X, WANG Y, LI D Y, et al. Changes in physicochemical properties, microstructure and protein properties of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) muscle during steam cooking [J]. Food Science, 2018, 39(7): 56-62.
- [22] 曹荣, 刘淇, 殷邦忠, 等. 虾仁TPA质构分析及不同熟制加工方式对其品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(6): 1-5.
- CAO R, LIU Q, YIN B Z, et al. Application of TPA in peeled prawn and effect of cooking technology on its quality[J]. Food Research and Development, 2010, 31(6): 1-5.
- [23] 肖朝耿, 谌迪, 吴江雁, 等. 不同加热方式对南美白对虾品质变化的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 538-544.
- XIAO C G, CHEN D, WU J Y, et al. Effects of different heating methods on the quality changes of *Penaeus vannamei*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(3): 538-544.
- [24] 蔡路昀, 年琳玉, 曹爱玲, 等. 不同干燥方式对中国对虾风味组分的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 291-298.
- CAI L Y, NIAN L Y, CAO A L, et al. Effect of different drying methods on flavor components of Chinese shrimp (*Fenneropnaeus Chinensis*)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 291-298.
- [25] 王芝妍, 官爱艳, 吕梁玉, 等. 超高压处理对中华管鞭虾虾肉风味的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 156-162.
- WANG Z Y, GUAN A Y, LÜ L Y, et al. Effect of ultra-high pressure (UHP) on the flavor of *Solenocera melantho* meat[J]. Food Science, 2017, 38(18): 156-162.
- [26] NUZZI M, SCALZO R L, TESTONI A, et al. Evaluation of fruit aroma quality: Comparison between gas chromatography-olfactometry (GC-O) and odour activity value (OAV) aroma patterns of strawberries [J]. Food Analytical Methods, 2008, 1(4): 270-282.
- [27] GIRI A, OSAKO K, OKAMOTO A, et al. Olfactometric characterization of aroma active compounds in fermented fish paste in comparison with fish sauce, fermented soy paste and sauce products[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 1027-1040.
- [28] UDOMSIL N, RODTONG S, CHOI Y J, et al. Use of *Tetragenococcus halophilus* as a starter culture for flavor improvement in fish sauce fermentation [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2011, 59(15): 8401-8408.
- [29] 丁媛, 何红萍, 蔡江佳, 等. 二氧化氯净化处理对

- 毛蚶挥发性风味物质的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(5): 231-236.
- DING Y, HE H P, CAI J J, et al. Effect of chlorine dioxide on the volatile flavors in *Scapharca subcrenata* meat [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(5): 231-236.
- [30] 潘强, 李汴生, 申晓曦, 等. 基围虾及其干制品的香气初探[J]. 现代食品科技, 2009, 25(3): 256-259.
- PAN Q, LI B S, SHEN X X, et al. Study of volatile compounds in fresh and dry shrimp *Metapenaeus ensis* [J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(3): 256-259.
- [31] YUI O, YUTAKA I, YUSUKE K, et al. Odor-active compounds contributing to the characteristic aroma of shrimp cooked whole, including shells and viscera [J]. European Food Research and Technology, 2018, 245: 233-241.

Moisture Migration and Quality Changes of *Penaeus vannamei* during Baking

Liang Rui¹, Lin Songyi^{1,2,3}, Diao Huayu¹, Chen Dong^{1,2,3}, He Xueqing¹, Sun Na^{1,2,3*}

¹School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning

²National Engineering Research Center of Seafood, Dalian 116034, Liaoning

³Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian 116034, Liaoning)

Abstract In this study, the low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) techniques were used to investigate the changes of water state and content of *Penaeus vannamei* during the baking process at different temperatures, and the water migration rules of *Penaeus vannamei* during baking were analyzed. The changes of color, texture and flavor of *Penaeus vannamei* during baking were also investigated using colorimeter, texture analyzer, and gas chromatography-ion mobility spectrometer (GC-IMS). LF-NMR results showed that the transverse relaxation time T_2 decreased with the increase of baking time, indicating that the moisture fluidity decreased with the increase of baking time. Pseudo-color picture of proton density obtained by MRI gradually changed from red and yellow color to blue color, indicating that the water content of *Penaeus vannamei* presented a continuous decrease during the baking process. Moreover, LF-NMR results also indicated that there were four water populations in *Penaeus vannamei*, including strongly-bound water, lightly-bound water, immobilized water and free water. The distribution of water components and water migration were analyzed by peak area percentage. After *Penaeus vannamei* were baked at 180 °C and 200 °C for 9 min, and baked at 220 °C for 6 min, the proportion of the strongly bound water and the lightly bound water significantly increased ($P < 0.05$), the proportion of immobilized water significantly decreased ($P < 0.05$), and the proportion of free water significantly increased ($P < 0.05$). It showed that the immobilized water was converted to the free water and bound water in the baking process, and high temperature could accelerate the change of moisture distribution. In addition to changes in water state and content, the color, texture, and flavor of *Penaeus vannamei* also changed greatly during baking. ΔE values reflect the overall color difference and a^* values represent the redness. In the process of baking, the ΔE and a^* values of *Penaeus vannamei* baked at 200 °C were higher than those baked at 180 °C and 220 °C. During the baking process at 200 °C, the relative extraction rate of myofibrillar protein of *Penaeus vannamei* showed a continuous decrease trend; it reduced to less than 10% after *Penaeus vannamei* was baked for 9 min, indicating that the shrimp meat has been fully matured. Moreover, after baking at 200 °C for 9 min, the hardness and chewiness of *Penaeus vannamei* increased continuously ($P < 0.05$), while the cohesiveness and springiness did not change significantly ($P > 0.05$). Combined with sensory evaluation, it was found that the premium quality of *Penaeus vannamei* was obtained when it was roasted at 200 °C for 15 min. GC-IMS analysis showed that aldehyde compound and ester compounds formed the characteristic flavor of the baked shrimp. This study can provide the theoretical basis for deep processing of *Penaeus vannamei* and the industrial application of Chinese cuisine.

Keywords *Penaeus vannamei*; bake; low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR); water migration; quality; flavor

液熏高水分挤压组织化植物蛋白加工工艺优化

李家磊¹, 管立军¹, 高扬¹, 严松¹, 王昆仑¹, 王春丽², 李晓娟³,
卢淑雯^{1*}, 李波¹, 周野¹

¹黑龙江省农业科学院食品加工研究所 哈尔滨 150086

²哈尔滨市农产品质量安全检验检测中心 哈尔滨 150070

³黑龙江省农业科学院生物技术研究所 哈尔滨 150028)

摘要 以高水分挤压组织化植物蛋白为原料,感官综合评分为指标,运用单因素结合响应面法对其液熏工艺进行优化,确定了最佳工艺参数:液熏温度 45℃,液熏时间 150 min,烟熏液体积份数 5.7%,在此条件下感官综合评分 87.4 分,制备的液熏高水分挤压组织化植物蛋白呈有光泽的烟熏色,组织紧密,富有弹性,且烟熏味浓郁。品质分析表明,液熏后的高水分挤压组织化植物蛋白主要营养成分无明显变化;理化性质发生一定程度的变化,色差的 L^* 值下降, a^* 值和 b^* 值均增加,呈有光泽的烟熏色,有效酸度略有下降,质构的硬度、胶黏性和咀嚼性有所降低,而弹性略有增加。挥发性风味物质中增加酚类化合物等 6 类物质,其中,酚类化合物相对含量为 17.668%,而其它类化合物在种类和相对含量上有一定的变化,改善了产品的品质。液熏前、后的安全指标无明显变化,菌落总数均较低,大肠菌群和苯并芘均未检出。结论:制备的液熏高水分挤压组织化植物蛋白具有较高的品质。

关键词 高水分; 挤压组织化蛋白; 植物; 液熏; 加工工艺; 品质分析

文章编号 1009-7848(2022)11-0214-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.11.023

近年来,随着人们健康意识的增强和素食主义的盛行,人们日常餐桌上摄入植物源蛋白的比例日益增高^[1]。植物源蛋白自然资源十分丰富,易于获得,成本低廉,且营养价值接近于动物源蛋白,其必需氨基酸组成比例更接近人体所需,更易被人体消化吸收^[2-3]。此外,部分植物源蛋白还具有降血压、降胆固醇、抗氧化、抗肿瘤和改善心脑血管疾病等诸多生理功能^[4-5],植物源蛋白的价值优势日益突显,市场开发前景十分广阔,因而,利用植物源蛋白进行产品加工变得尤为重要^[6]。

挤压组织化植物蛋白是被广泛关注的植物蛋白的重要加工形式,它是以植物蛋白(大豆分离蛋白、小麦面筋蛋白、花生蛋白以及豌豆蛋白等)为原料,水为塑化剂,在挤压机产生的机械能、热能和高压的多重作用下植物蛋白形成可塑化的熔融体,并沿着挤出方向重新交联排列,进而形成质地

均匀,层状或纤维状,类似于动物肌肉的组织化植物蛋白制品^[7-9]。根据挤压组织化植物蛋白含水比例不同,可分为低水分挤压组织化植物蛋白(含水比例通常为 20%~40%)和高水分挤压组织化植物蛋白(含水比例通常为 40%~80%)^[10-11]。较之于低水分挤压组织化植物蛋白,高水分挤压组织化植物蛋白具有组织化程度高,纤维状结构明显,质地均匀一致,营养活性成分损失少,食用方便,原料成本低以及经济附加值高等优点^[12-13]。因此,高水分挤压组织化植物蛋白被认为是实现植物蛋白高值化利用的一条重要途径。然而,目前高水分挤压组织化植物蛋白产品处于市场萌芽阶段,生产规模较小,产品形式单一,消费者接受程度低,如何扩大市场规模,丰富产品形式,研发出受消费者喜爱的产品成为摆在从业者面前必须面对的问题^[14]。

烟熏是一种具有悠久历史的食品加工贮藏方法,它不但可以赋予食物特有的风味和色泽,还可以有效防止食物脂肪氧化和抑制细菌病毒的滋生^[15-17]。然而,随着现代食品科学技术的快速发展,烟熏工艺的弊端越来越突显,熏制时间长,熏制不均匀,环境污染大,易产生强致癌物质苯并芘和难

收稿日期: 2021-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100902);
黑龙江省博士后科研启动金资助项目(LBH-Q18132)

第一作者: 李家磊,男,博士,副研究员

通信作者: 卢淑雯 E-mail: shuwenl@sina.com

以实现机械化连续生产等都成为制约产业发展的瓶颈问题^[18-19]。为了寻求解决这些问题的办法,液熏法在烟熏法基础上逐渐发展起来,它是利用去除苯并芘等致癌物的烟熏液替代烟气进行食品熏制的一种非烟熏加工技术,具有操作简便、清洁卫生、安全可靠、环境友好、适用范围广、产品质量高和工业化程度高等优点^[20-22],目前被广泛应用于牲畜、鱼贝类肉制品的熏制加工^[23-24]。鉴于此,本研究以高水分挤压组织化植物蛋白为原料,感官综合评分为指标,运用单因素结合响应面法对其液熏工艺进行优化。在此基础上,对制备的液熏高水分挤压组织化植物蛋白进行品质分析,以期实现该类植物蛋白的高值化利用,同时丰富产品形式,为面向市场推广高水分挤压组织化植物蛋白产品提供试验数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

高水分挤压组织化植物蛋白,实验室自制(大豆分离蛋白和谷朊粉按照 7:3 比例混合通过双螺杆挤压机制备,真空包装和高压蒸汽灭菌后常温贮藏);大豆分离蛋白,哈高科大豆食品有限责任公司;谷朊粉,陕西聚梁食品有限公司;食盐、蔗糖、酱油、五香粉和料酒,哈尔滨满克隆超市;山楂核烟熏香味料 II-普通,济南华鲁食品有限公司;所用化学试剂均为分析纯级。

FMHE-50 型双螺杆挤压机,湖南富马科食品工程技术有限公司;TA-XT plus 型质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;DK-98IIA 型电热恒温水浴锅,天津泰斯特仪器有限公司;XS204 型电子分析天平、HB43-S 型快速水分测定仪、Seven-Compact 型 pH 计,瑞士 METTLER TOLEDO 公司;FEI QUANTA 200 型环境扫描电镜,荷兰 FEI 公司;D-1 型全自动高压蒸汽灭菌锅,北京发恩科贸有限公司;SW-CJ-2D 型双人净化工作台,南昌苏净科技有限公司;Kjeltec8400 型全自动凯氏定氮仪,丹麦 FOSS 公司;DHP-9082 型电热恒温培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;CM-5 型分光测色仪,日本 KONICA MINOLTA 公司;DZ-600/2S 型真空包装机,诸城亿康食品包装机械有限公司;DC-B 型智能箱式高温炉,北京独创科技有限

公司;3-18K 型冷冻离心机,德国 SIGMA 公司;U3000 型高效液相色谱仪,美国 Thermo Fisher 公司;7890A-5975C 型气相色谱-质谱联用仪,美国 Agilent 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 工艺流程 液熏制备高水分挤压组织化植物蛋白的工艺流程如图 1 所示。

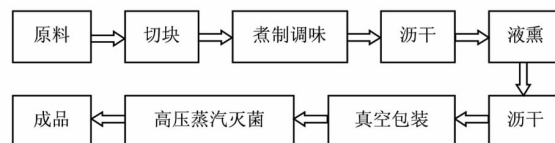


图 1 工艺流程图

Fig.1 The process flow diagram

1.2.2 操作要点

1.2.2.1 切块 将制备的高水分挤压组织化植物蛋白切成大小均一的条形方块。

1.2.2.2 煮制调味 把切好的高水分挤压组织化植物蛋白放入调味液中,小火煮制 40 min;调味液配比:食盐 4%、蔗糖 4%、酱油 6%、五香粉 1%、料酒 1%。

1.2.2.3 液熏 将煮制入味的高水分挤压组织化植物蛋白放入一定浓度烟熏液中,在一定温度下液熏一定时间。

1.2.2.4 真空包装 把熏制完的高水分挤压组织化植物蛋白放入耐高温蒸煮袋中进行真空包装。

1.2.2.5 高压蒸汽灭菌 将包装好的高水分挤压组织化植物蛋白放入高压蒸汽灭菌锅中,121 ℃灭菌 30 min。

1.2.3 感官评价 选择 10 名评定人员对不同液熏工艺参数下制备的高水分挤压组织化植物蛋白的色泽、质地以及烟熏味的感官指标进行评分,三者所占感官综合评分的比例依次为 30%,30%和 40%,以所获得 10 个分数的平均值为最终感官综合评分,表 1 为感官评分标准^[25]。

1.2.4 高水分挤压组织化植物蛋白的液熏工艺优化

1.2.4.1 单因素实验设计 通过查找文献和前期试验,确定影响液熏工艺的因素为液熏温度、液熏时间和烟熏液体积分数。因此,以感官综合评分为指标,考察单因素液熏温度(25,30,35,40,45,50

表1 感官评定标准

Table 1 The sensory evaluation standard

指标(权重)	评分标准		
	80~100分	60~80分	0~60分
色泽(30%)	有光泽,呈类似烟熏色	稍有光泽,烟熏色较浅	无光泽,无烟熏色
质地(30%)	组织紧密,富有弹性	组织较紧,弹性一般度	组织松散,弹性差
烟熏味(40%)	烟熏味浓郁	烟熏味较淡	无烟熏味或烟熏味刺鼻

℃)、液熏时间(30,60,90,120,150,180 min)和烟熏液体积分数(2%,3%,4%,5%,6%,7%)对液熏工艺的影响^[26-27]。

1.2.4.2 响应面试验设计 在单因素实验基础上,以液熏温度、液熏时间和烟熏液体积分数为考察因素,感官综合评分为指标,选用响应面 Box-Behnken 试验设计对液熏高水分挤压组织化植物蛋白的工艺参数进行优化。

1.2.5 产品品质分析

1.2.5.1 主要营养成分分析 水分的测定参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法^[28];粗蛋白的测定参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的方法^[29];粗脂肪的测定参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的方法^[30];灰分的测定参照 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中的方法^[31]。

1.2.5.2 理化性质分析

1) 有效酸度(pH值)的测定 称取10g绞碎完全的液熏的高水分挤压组织化植物蛋白,放入装有90mL蒸馏水的烧杯中,10000 r/min高速均质30s,静置30min后过滤,取滤液进行pH值的测定^[32]。

2) 色差的测定 利用色彩色差计,采用 CIELAB 表色系统测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值^[33]。

3) 质构特性测定 利用质构仪测定产品的硬度、弹性、咀嚼度、凝聚力、胶黏性、黏附性和黏弹性等。采用 TPA 模式,用 P/35 探头,探头测前下降速度 2.0 mm/s,测试速度 1.0 mm/s,测后回程速度 2.0 mm/s,下压程度 50%,间隔时间 5 s,往复运动两次。得到样品的硬度、弹性和咀嚼度等重复测定 10 次,去掉两个最大值和最小值,结果用平均值表示^[27]。

4) 挥发性风味物质测定 采用 SPME-GC-

MS 法进行测定,样品在 60℃下平衡 60 min,然后把萃取头插入顶空进样瓶中,萃取 30 min,搅拌速度设为 250 r/min,接着拔出萃取头,并置于 250℃的进样口中解吸 2 min。气相色谱条件:DB-5ms 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.50 μm);进样量 1 μL;载气为 He;流速 1 mL/min;进样口温度 250℃;柱初始温度 40℃,保持 3 min,以 5℃/min 升至 120℃,保持 3 min,再以 10℃/min 升至 200℃,保持 5 min。质谱条件:电离方式 EI,电子能量 70 eV,离子源温度为 230℃,四极杆温度为 150℃,全扫描方式,扫描范围为 30~440 m/z;根据计算机谱库(NIST08.L,demo.l)进行化合物的质谱鉴定,选择匹配度大于 80 作为鉴定结果,用峰面积归一化法确定物质的相对含量^[25]。

1.2.5.3 安全指标分析 菌落总数测定参照 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》中的方法^[34],大肠菌群的测定参照 GB 4789.3-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》中的方法^[35];苯并芘的测定参照 GB 5009.27-2016《食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定》中的方法^[36]。

1.3 数据处理

每组试验都进行 3 次平行试验,所得数据以平均值±标准差表示,采用 Origin 8.5 进行统计分析和软件作图,响应面 Box-Behnken 试验采用 Design-Expert V8.0.6.1 软件进行设计与分析。

2 结果与分析

2.1 高水分挤压组织化植物蛋白的液熏工艺确定

2.1.1 单因素对感官综合评分的影响

2.1.1.1 液熏温度对感官综合评分的影响 选取液熏时间 120 min,烟熏液体积分数 5%,考察不同液熏温度对液熏高水分挤压组织化植物蛋白的感

官综合评分的影响,结果如图 2 所示。在设定的液熏温度范围内,感官综合评分随着液熏温度的升高先增大后缓慢下降,当液熏温度为 40℃时,感官综合评分最高。这可能是由于随着温度的升高,有效地促进了烟熏液呈色、呈味物质分子向高水分挤压组织化植物蛋白的渗透,而当温度过高时,一方面使得烟熏液中风味物质易挥发,烟熏味道减弱,另一方面降低了高水分挤压组织化植物蛋白的硬度和弹性。因此,最适宜的液熏温度为 40℃。

2.1.1.2 液熏时间对感官综合评分的影响 选取液熏温度 40℃,烟熏液体积分数 5%,考察不同液熏时间对液熏高水分挤压组织化植物蛋白的感官综合评分的影响,结果如图 3 所示。在设定的液熏时间范围内,感官综合评分随着液熏时间的升高先增大后缓慢下降,当液熏时间为 120 min 时,感官综合评分最高。这可能是由于随着液熏时间的增加,有效的促进了烟熏液呈色、呈味物质分子向高水分挤压组织化植物蛋白的渗透,而当液熏时间超过 120 min 时,这种渗透趋于平衡,并且长时间的液熏会降低高水分挤压组织化植物蛋白的硬度和弹性。因此,最适宜的液熏时间为 120 min。

2.1.1.3 烟熏液体积分数对感官综合评分的影响

选取液熏温度 40℃,液熏时间 120 min,考察不同烟熏液体积分数对液熏高水分挤压组织化植物蛋白的感官综合评分的影响,结果如图 4 所示。在设定的烟熏液体积分数范围内,感官综合评分随着烟熏液体积分数的升高先增大后下降,当烟熏液体积分数为 5%时,感官综合评分最高。这可能是由于随着烟熏液体积分数的增大,有效的促进了烟熏液呈色、呈味物质分子向高水分挤压组织化植物蛋白的渗透,而当烟熏液体积分数过大时,使得产品酸涩味、烟熏味道明显。因此,最适宜的烟熏液体积分数为 5%。

2.1.2 响应面法确定最佳工艺参数

2.1.2.1 响应模型的建立与分析 在单因素实验结果的基础上,进行响应面 Box-Behnken 试验设计,用自变量 A、B、C 分别代表液熏温度、液熏时间和烟熏液体积分数 3 个因素,每个因素设计最小值(-1)、中间值(0)、最大值(1)3 个水平,以响应值 Y 代表感官综合评分,响应面试验方案与结

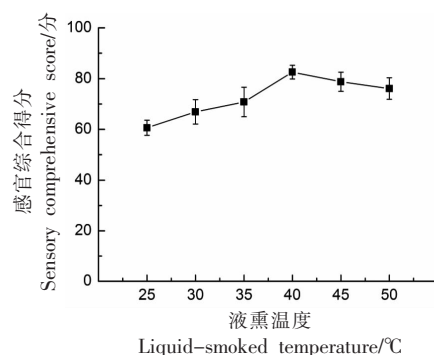


图 2 液熏温度对感官综合评分的影响

Fig.2 Effect of liquid-smoked temperature on sensory comprehensive score

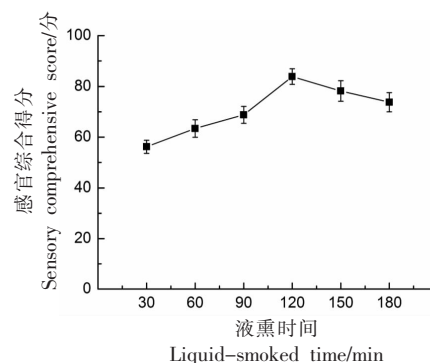


图 3 液熏时间对感官综合评分的影响

Fig.3 Effect of liquid-smoked time on sensory comprehensive score

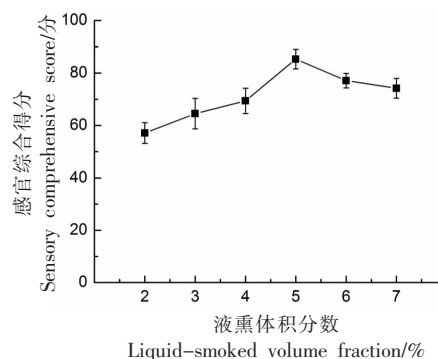


图 4 烟熏液体积分数对感官综合评分的影响

Fig.4 Effect of volume fraction of liquid-smoked on sensory comprehensive score

果如表 2 所示。

利用 Design-Expert V 8.0.6.1 软件对所得试验结果进行回归模型方程拟合,获得回归模型方程为 $Y = 82.36 + 3.84A + 4.61B + 2.55C + 1.15AB + 1.27AC + 2.87BC - 1.81A^2 - 3.35B^2 - 4.88C^2$ 。然后

表2 响应面试验方案与结果

Table 2 The design and result of response surface methodology

试验号	液熏温度 (A)/°C	液熏时间 (B)/min	烟熏液体 积分数 (C)/%	感官综合 评分(Y)/ 分	试验号	液熏温度 (A)/°C	液熏时间 (B)/min	烟熏液体 积分数 (C)/%	感官综合 评分(Y)/ 分
1	40(0)	120(0)	5(0)	80.6	10	40(0)	150(1)	4(-1)	72.2
2	35(-1)	90(-1)	5(0)	70.1	11	40(0)	120(0)	5(0)	81.7
3	45(1)	90(-1)	5(0)	74.4	12	35(-1)	150(1)	5(0)	77.7
4	40(0)	120(0)	5(0)	81.4	13	40(0)	120(0)	5(0)	85.5
5	40(0)	120(0)	5(0)	82.6	14	40(0)	90(-1)	4(-1)	69.4
6	35(-1)	120(0)	6(1)	71.8	15	40(0)	150(1)	6(1)	84.6
7	40(0)	90(-1)	6(1)	70.3	16	45(1)	150(1)	5(0)	86.6
8	45(1)	120(0)	4(-1)	77.0	17	45(1)	120(0)	6(1)	83.1
9	35(-1)	120(0)	4(-1)	70.8					

对回归模型方程进行方差分析,结果如表3所示。从表3可以看出,模型的 P 值为0.0004,差异显著,而失拟项 P 值为0.5790,差异不显著,模型确定系数 $R^2=0.9721$,模型调整确定系数 $R^2_{adj}=0.9124$,说明该模型拟合度较高、试验误差较小,表明该模型能够准确地反映响应值的变化。 P 值的

大小可判定因素的显著性,而 F 值的大小可以判定因素的影响程度,由表3回归模型方差分析可知, A 、 B 、 C 、 B^2 、 C^2 为极显著因素, BC 为显著因素, AB 、 AC 、 A^2 为不显著因素,影响程度主次顺序为 $B>A>C^2>C>B^2>BC$ 。

表3 回归模型方差分析

Table 3 The variance analysis of regression model

来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	561.92	9	62.44	19.51	0.0004**
A	117.81	1	117.81	36.82	0.0005**
B	170.20	1	170.20	53.19	0.0002**
C	52.02	1	52.02	16.26	0.0050**
AB	5.29	1	5.29	1.65	0.2394
AC	6.50	1	6.50	2.03	0.1970
BC	33.06	1	33.06	10.33	0.0148*
A^2	13.72	1	13.72	4.29	0.0772
B^2	47.39	1	47.39	14.81	0.0063**
C^2	100.27	1	100.27	31.34	0.0008**
残差	22.40	7	3.20		
失拟项	8.03	3	2.68	0.74	0.5790
误差	14.37	4	3.59		
总和	584.32	16			
$R^2=0.9721$	$R^2_{adj}=0.9124$				

注:*. $P<0.05$,显著差异;**. $P<0.01$,极显著差异。

利用 Design-Expert V 8.0.6.1 软件对试验结果作等高线和响应面图,固定一个因素为中间值,考察其它两个因素对感官综合评分的交互影响。

图5为其中任意两个因素交互作用对感官综合评分影响的等高线和响应面图,由图5可以看出,因素 B 和 C 对感官综合评分的交互作用显著,而因

素 A 和 B、因素 A 和 C 对感官综合评分的交互作用不显著,这与回归模型方差分析的结果相一致,

并且感官综合评分最优值落在在试验考察的区域范围之内。

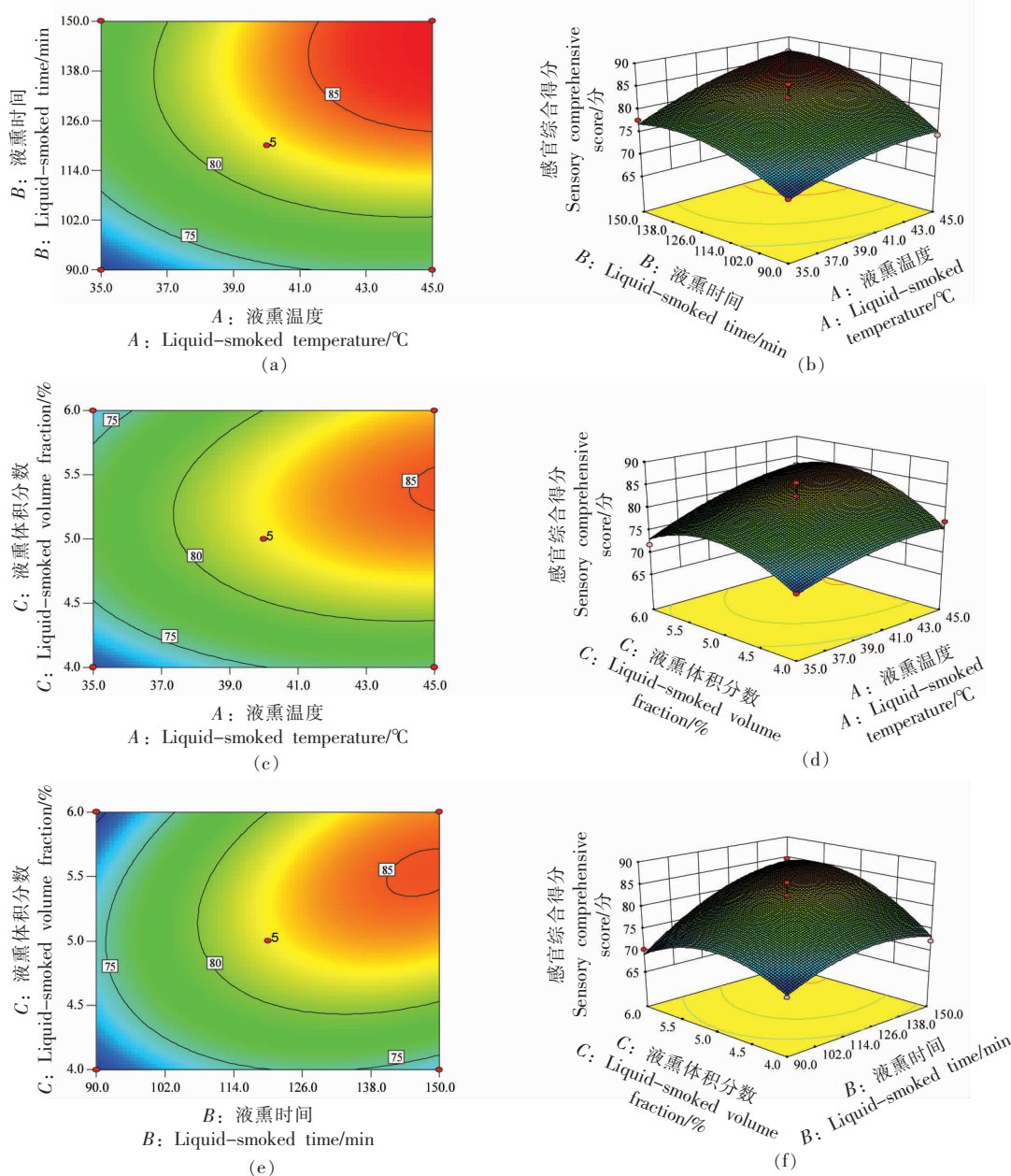


图 5 任意 2 个因素交互作用对感官综合评分影响的等高线和响应面图

Fig.5 The contour plots and response surface chart of the interactive effects of any two factors on sensory comprehensive score

2.1.2.2 最佳工艺参数的确定及验证 通过 Design-Expert V 8.0.6.1 软件对液熏最佳工艺参数提出求解方程,并考虑实际可操作性,确定最佳工艺参数条件为:液熏温度 45 °C,液熏时间 150 min,烟熏液体积分数 5.7%。在最佳工艺参数下进

行验证试验,感官综合评分的预测值和实测值分别为 89.1 分和 87.4 分,预测误差为 1.91%,预测值和实际值基本吻合,表明该预测模型具有一定的准确性和实用性。在此最佳工艺参数条件下,制备的液熏高水分挤压组织化植物蛋白有光泽的烟

熏色、组织紧密、富有弹性、且烟熏味浓郁。

2.2 产品品质分析

2.2.1 主要营养成分 为了考察液熏前、后高水分挤压组织化植物蛋白主要营养成分的变化情况,分别测定了水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分等营养指标,结果如表4所示,由表4可知,较之于液熏前,液熏后的高水分挤压组织化植物蛋白的主要营养成分相差细微,水分稍有减少,这可能是由于烟熏液部分改变了蛋白质分子间的作用力,使

得其锁水能力变弱,进而导致产品水分含量降低;粗蛋白和粗脂肪含量有些许上升,这可能是由于液熏后的高水分挤压组织化植物蛋白中含水率降低而变相导致粗蛋白和粗脂肪的浓缩;灰分含量稍有升高,这可能是由于液熏过程中调味液中的无机盐和矿物质渗透到高水分挤压组织化植物蛋白中所致。综上,液熏工艺对高水分挤压组织化植物蛋白主要营养成分的影响不明显。

表4 主要营养成分测定结果

Table 4 The determination results of main nutritional components

类别	水分含量/%	粗蛋白含量/%	粗脂肪含量/%	灰分含量/%
液熏前	63.80 ± 2.08	32.57 ± 0.88	0.82 ± 0.02	1.98 ± 0.08
液熏后	61.26 ± 1.74	33.83 ± 1.05	0.88 ± 0.03	2.24 ± 0.07

2.2.2 理化性质 为了考察液熏前、后高水分挤压组织化植物蛋白理化性质的变化情况,分别测定了色差、有效酸度、质构和挥发性风味物质等理化指标,结果如表5、表6和表7所示。

由表5 色差和有效酸度的测定结果可知,较之于液熏前,液熏后的高水分挤压组织化植物蛋白色差的 L^* 值下降, a^* 值和 b^* 值均增加,这表示

白度下降、红度和黄度增加,这可能是由于烟熏液中的酚类和醛类物质与部分蛋白质反生反应在产品表面形成光泽的茶褐色薄膜,并且煮制调味过程中还可能伴有少量的美拉德反应的发生,最终使得产品呈现出具有光泽的烟熏色;有效酸度却略有下降,这可能是由于烟熏液中的酚类物质和酸类物质降低了产品的 pH 值。

表5 色差值和有效酸度测定结果

Table 5 The determination results of color difference and valid acidity

类别	色差值			有效酸度
	L^*	a^*	b^*	
液熏前	63.88 ± 2.08	4.96 ± 0.12	19.98 ± 0.79	7.96 ± 0.03
液熏后	47.03 ± 0.87	8.61 ± 0.21	21.66 ± 0.74	6.85 ± 0.02

由表6 质构测定结果可知,较之于液熏前,液熏后的高水分挤压组织化植物蛋白质构的硬度、胶黏性和咀嚼性有所降低,而弹性略有增加,这可能是由于液熏工艺中的煮制调味过程使得水分损失和蛋白质热变性,进而改变了产品的质构。未液

熏的高水分挤压组织化植物蛋白的硬度、胶黏性和咀嚼性相对较大,从适口性角度考虑,硬度、胶黏性和咀嚼性适度降低,弹性适度增加更易被消费者接受。

表6 质构指标测定结果

Table 6 The determination results of texture index

类别	质构特征值			
	硬度/N	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
液熏前	18 459.71 ± 599.92	0.86 ± 0.03	14 402.10 ± 528.78	12 443.88 ± 323.11
液熏后	16 267.38 ± 356.24	0.94 ± 0.04	12 411.47 ± 343.80	11 618.22 ± 289.36

由表7 挥发性风味物质检测结果可知,较之于液熏前,液熏后的高水分挤压组织化植物蛋白

的挥发性风味物质的种类和相对含量都有一定程度的变化。液熏前,检出醛类物质1种(相对含量

1.707%),醇类物质1种(相对含量3.266%),醚类物质1种(相对含量2.642%),酸类物质1种(相对含量32.447%),呋喃类物质1种(相对含量2.971%)和烷烃类物质3种(相对含量8.481%);液熏后,检出酚类物质5种(相对含量17.668%),醛类物质4种(相对含量8.582%),醇类物质2种(相对含量0.821%),醚类物质1种(相对含量

8.262%),酮类物质2种(相对含量1.034%),酸类物质2种(相对含量14.795%),酯类物质1种(相对含量0.448%),呋喃类物质2种(相对含量1.137%),烷烃类物质2种(相对含量0.344%),萜烯类物质3种(相对含量0.991%),吡嗪类物质6种(相对含量2.224%)和其它物质1种(相对含量0.542%)。

表7 挥发性风味物质分析结果

Table 7 The analysis results of volatile flavor compounds

类别	化学物	相对含量/%		风味
		液熏前	液熏后	
酚类	2-甲氧基-4-甲基苯酚	-	6.350	辛香
	3-甲酚	-	1.475	-
	2-甲氧基-3-烯丙基苯酚	-	3.548	丁香
	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	-	2.376	丁香、辛香、烟熏味
	2,6-二甲氧基苯酚	-	3.919	木香、烟熏味
醛类	己醛	1.707	0.139	青草香、果香
	糠醛	-	5.576	烘烤香、蒜香
	苯甲醛	-	0.600	杏仁味
	5-甲基呋喃醛	-	2.267	焦香
醇类	3,6,9,12-四氧十四烷-1-醇	3.266	-	-
	乙醇	-	0.269	醇香
	糠醇	-	0.552	焦糖香
醚类	18-冠醚-6	2.642	-	-
	茴香脑	-	8.262	茴香味
酮类	甲基环戊烯醇酮	-	0.248	焦糖香、烟熏味
	3-甲基-6-(1-甲基乙基)-2-环己烯-1-酮	-	0.786	-
酸类	乙酸	-	0.543	醋酸味
	棕榈酸	32.447	14.252	酸奶香
酯类	苯甲酸甲酯	-	0.448	蜂蜜香、花香
呋喃类	2-正戊基呋喃	2.971	0.513	豆香、青草香
	2-乙酰基呋喃	-	0.624	焦糖香
烷烃类	六甲基环三硅氧烷	5.306	-	杏仁味
	八甲基环四硅氧烷	2.111	0.104	-
	十甲基环五硅氧烷	1.064	-	-
	十八烷	-	0.240	-
萜烯类	α -柏木烯	-	0.159	-
	δ -杜松烯	-	0.227	-
	α -姜黄烯	-	0.605	-
吡嗪类	2,5-二甲基-3-(3-甲基丁基)吡嗪	-	0.249	-
	2-甲基吡嗪	-	0.204	坚果香、玉米香
	2,5-二甲基吡嗪	-	0.811	烘烤坚果香
	2-乙基-5-甲基吡嗪	-	0.467	坚果香
	2,3,5-三甲基吡嗪	-	0.316	焦香
	2-乙基-3,6-二甲基吡嗪	-	0.177	-
其它	甲氧基苯基胂	-	0.542	-

在所鉴定的化合物中,酚类化合物、酮类化合物、酯类化合物、萜烯类化合物、吡嗪类化合物以及其它物质(甲氧基苯基胍)都为液熏后新检出物质,酚类化合物是重要的特色性烟熏风味物质来源,同时还具有抗菌活性以及抗氧化性^[37],检出酚类化合物相对含量为17.668%,在所检出的酚类化合物中,4-乙炔基-2-甲氧基苯酚和2,6-二甲氧基苯酚为明确的呈烟熏味物质;酮类化合物多数被认为对产品的色泽起到关键作用,而对风味主要起辅助作用^[16],在所检出的酮类化合物中,甲基环戊烯醇酮具有焦糖香^[38];酯类化合物一般都具有水果香气,在所检出的酯类化合物中,苯甲酸甲酯具有蜂蜜香和花香^[39];萜烯类化合物为植物挥发性物质的主要成分^[40],所检出的萜烯类化合物可能来自于煮制调味过程中添加的植物香辛料;吡嗪类化合物是许多香味的中间体,具有典型的坚果烤香和焦香,在所检出的吡嗪类化合物中,2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪和2,3,5-三甲基吡嗪具有明确的吡嗪类化合物香味特征^[19]。醛类化合物、醇类化合物、醚类化合物、酸类化合物、呋喃类化合物和烷烃类化合物在种类和相对含量上存在一定的变化,较之于液熏前,液熏后的醛类化合物增加3种,且相对含量有所增加,主要物质为糠醛,其可有效中和烟熏味中的刺激味^[25];醇类化合物种类发生变化,相对含量有所减少,新产生的乙醇和糠醇分别具有醇香和焦糖香味^[41];醚类化合物种类发生变化,相对含量有所增加,产生了具有茴香味的茴香脑,它可能

来自于煮制调味过程中添加的植物香辛料;酸类化合物增加了具有醋酸味的乙酸^[42],而棕榈酸含量明显减少,棕榈酸已被证明可以引起机体血脂和胆固醇的升高^[43];呋喃类化合物增加了具有焦糖香的2-乙酰基呋喃^[44],而具有豆香、青草香的2-正戊基呋喃相对含量有所减少^[45],这可能是由于组成高水分挤压组织化植物蛋白的原料主要为大豆分离蛋白,而液熏工艺减少了大豆分离蛋白自有的特殊味道;烷烃类化合物种类发生变化,相对含量有所减少,烷烃类化合物香味阈值较高,对直接风味的贡献度不高,但可有助提升产品的整体风味^[46]。根据以上结果可以看出,液熏工艺使得高水分挤压组织化植物蛋白产生特有的烟熏风味,并一定程度上改善了产品的品质。

2.2.3 安全指标 为了考察液熏前、后高水分挤压组织化植物蛋白安全指标的变化情况,分别测定了菌落总数、大肠菌群和苯并芘等安全指标,结果如表8所示。液熏前、后产品的菌落总数均较低,符合 $\leq 30\ 000$ CFU/g的国家标准,大肠菌群的方法检出限为 <3.0 ,液熏前、后产品的大肠菌群均未检出^[47],这可能是由于一方面烟熏液中的酚类、酸类和醛类等物质具有一定的杀菌作用,另一方面液熏工艺中的真空包装和高压蒸汽灭菌过程可有效的抑制细菌滋生和杀死细菌;苯并芘的方法检出限为 <0.2 ^[48],液熏前、后产品的苯并芘均未检出,这可能是由于烟熏液不存在苯并芘,液熏工艺也不会产生苯并芘。因而,液熏前后的高水分挤压组织化植物蛋白都具有较高的安全品质。

表8 微生物和苯并芘测定结果

Table 8 The determination results of microbiology and benzopyrene

类别	微生物		苯并芘/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
	菌落总数/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$	大肠菌群/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$	
国家标准	$\leq 30\ 000$	≤ 10	≤ 5.0
液熏前	2	未检出	未检出
液熏后	1	未检出	未检出

3 结论

本研究以感官综合评分为考察指标,采用单因素结合响应面法对高水分挤压组织化植物蛋白的液熏工艺进行优化,确定最佳工艺参数:液熏温度 $45\ ^\circ\text{C}$,液熏时间 $150\ \text{min}$,烟熏液体积分数

5.7%,在此条件下感官综合评分87.4分,与预测值89.1分相比,预测误差为1.91%,表明优化结果可靠,在此工艺条件下制备的液熏高水分挤压组织化植物蛋白有光泽的烟熏色、组织紧密、富有弹性、且烟熏味浓郁。通过考察液熏前、后高水分挤

压组织化植物蛋白主要营养成分、理化性质和安全指标的变化情况,对产品品质进行分析,结果表明,较之于液熏前,液熏后的高水分挤压组织化植物蛋白主要营养成分无明显变化;理化性质发生了一定程度的变化,色差的 L^* 值下降, a^* 值和 b^* 值均增加,使其呈现出具有光泽的烟熏色,有效酸度略有下降,使其更有利于贮藏,质构的硬度、胶黏性和咀嚼性有所降低,而弹性略有增加,使其适口性增强,挥发性风味物质增加酚类化合物、酮类化合物、酯类化合物、萜烯类化合物和吡嗪类化合物等,其中,酚类化合物相对含量为 17.668%,而醛类化合物、醇类化合物、醚类化合物、酸类化合物、呋喃类化合物和烷烃类化合物在种类和相对含量上存在一定的变化,使其产生特有的烟熏的特有风味,并一定程度上改善了产品品质;液熏前、后的安全指标无明显变化,菌落总数均较低,大肠菌群和苯并芘均为检出,产品具有较高的安全品质。目前,高水分挤压组织化植物蛋白是国内外研究热点,本研究可为高水分挤压组织化植物蛋白的开发利用以及市场推广提供一定的数据支撑。

参 考 文 献

- [1] ANDERSON C A M, RYAN B. The potential of novel plant protein foods to improve dietary patterns and markers of cardiovascular health[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2020, 112(5): 1151-1152.
- [2] ISMAIL B P, SENARATNE-LENAGALA L, STUBE A, et al. Protein demand: Review of plant and animal proteins used in alternative protein product development and production[J]. *Animal Frontiers*, 2020, 10(4): 53-63.
- [3] GORISSEN S H M, CROMBAG J J R, SENDEN J M G, et al. Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates[J]. *Amino Acids*, 2018, 50(12): 1685-1695.
- [4] HERTZLER S R, LIEBLEIN-BOFF J C, WEILER M, et al. Plant proteins: Assessing their nutritional quality and effects on health and physical function[J]. *Nutrients*, 2020, 12(12): 3704.
- [5] AHNEN R T, JONNALAGADDA S S, SLAVIN J L. Role of plant protein in nutrition, wellness, and health[J]. *Nutrition Reviews*, 2019, 77(11): 735-747.
- [6] 郭顺堂, 徐婧婷, 刘欣然, 等. 我国植物蛋白资源高效利用途径与技术创新[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(6): 8-15.
GUO S T, XU T T, LIU X R, et al. Efficient utilization and technological innovation of plant-based protein resources in China[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(6): 8-15.
- [7] 欧雨嘉, 郑明静, 曾红亮, 等. 植物蛋白肉研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 299-305.
OU Y J, ZHENG M J, ZENG H L, et al. Advance in plant-based meat research[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(12): 299-305.
- [8] 吴元浩, 徐婧婷, 刘欣然, 等. 植物基仿肉原料的应用与加工现状[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(17): 5955-5963.
WU Y H, XU J T, LIU X R, et al. Application and processing status of plant-based meat analogue ingredients[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(17): 5955-5963.
- [9] 曾艳, 郝学财, 董婷, 等. 植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 338-345, 350.
ZENG Y, HAO X C, DONG T, et al. Research progress on raw material development processing technology and nutritional properties of plant based meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(3): 338-345, 350.
- [10] 朱嵩, 刘丽, 张金闯, 等. 高水分挤压组织化植物蛋白品质调控及评价研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(19): 280-286.
ZHU S, LIU L, ZHANG J C, et al. Advances in quality control and evaluation of high moisture textured vegetable protein[J]. *Food Science*, 2018, 39(19): 280-286.
- [11] 张波, 张金闯, 张玮, 等. 原料理化特性对挤压组织化植物蛋白质量的影响[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(12): 155-163.
ZHANG B, ZHANG J C, ZHANG W, et al. The effect of raw physicochemical properties on the quality of extruded texturized vegetable protein[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(12): 155-163.

- [12] ESTELL M, HUGHES J, GRAFENAUER S. Plant protein and plant-based meat alternatives: Consumer and nutrition professional attitudes and perceptions[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1478.
- [13] MICHEL F, HARTMANN C, SIEGRIST M. Consumers' associations, perceptions and acceptance of meat and plant-based meat alternatives[J]. Food Quality and Preference, 2021, 87: 104063.
- [14] 江连洲, 张鑫, 窦薇, 等. 植物基肉制品研究进展与未来挑战[J]. 中国食品学报, 2020, 20(8): 1-10. JIANG L Z, ZHANG X, DOU W, et al. Advance and challenges in plant-based meat[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(8): 1-10.
- [15] 顾赛麒, 彭玲玲, 丁玉庭, 等. 烟熏鲑鱼粉复合酶解过程中的品质变化[J]. 食品科学, 2017, 38(5): 180-185. GU S Q, PENG L L, DING Y T, et al. Quality changes of smoked skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) processing byproduct during enzymatic hydrolysis[J]. Food Science, 2017, 38(5): 180-185.
- [16] 赵冰, 王静, 戚彪, 等. 烟熏工艺对清真牛肉香肠品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 23-29. ZHAO B, WANG J, QI B, et al. Effects of smoking methods on the quality of muslim beef sausages[J]. Food Science, 2014, 35(2): 23-29.
- [17] 赵冰, 任琳, 陈文华, 等. 烟熏工艺对熏肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(6): 180-187. ZHAO B, REN L, CHEN W H, et al. Effects of different smoking methods on volatile flavor compounds in bacon[J]. Food Science, 2013, 34(6): 180-187.
- [18] NITHIN C T, JOSHY C G, CHATTERJEE N S, et al. Liquid smoking as a method for addressing polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in traditional masmin[J]. India J Fish, 2018, 65(3): 84-94.
- [19] 宋丽, 陈星星, 谷凤林, 等. GC-MS与电子感官结合对烟熏液风味物质的分析[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 193-201. SONG L, CHEN X X, GU F L, et al. Flavor components of liquid smoke analyzed by GC-MS combined with electronic sensory systems[J]. Food Science, 2020, 41(16): 193-201.
- [20] 郭园园, 娄爱华, 沈清武. 烟熏液在食品加工中的应用现状与研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 339-344, 351. GUO Y Y, LOU A H, SHEN Q W, et al. Application status and research progress of smoke liquid in food processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 339-344, 351.
- [21] 赵冰, 李素, 王守伟, 等. 苹果木烟熏液的品质特性[J]. 食品科学, 2016, 37(8): 108-114. ZHAO B, LI S, WANG S W, et al. Quality characteristics of liquid smoke flavoring obtained from apple wood[J]. Food Science, 2016, 37(8): 108-114.
- [22] ARAUJO I B, RAUL L J, MACIEL M I S, et al. Effect of traditional and liquid smoke on the quality of sea catfish sausages (*Sciades herzbergii*, Bloch, 1794)[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2020, 29(6): 553-566.
- [23] NITHIN C T, JOSHY C G, CHATTERJEE N S, et al. Liquid smoking - A safe and convenient alternative for traditional fish smoked products[J]. Food Control, 2020, 113: 107186.
- [24] 姚嘉莉, 石文娟, 杨万根. 液熏技术对腊肉理化和感官品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17): 220-225. YAO J L, SHI W J, YANG W G. Effects of liquid smoke technology on physicochemical and sensory quality of bacon[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 220-225.
- [25] 桂萌, 林佳, 马长伟, 等. 液熏鲟鱼片生产工艺优化与品质影响分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 235-241. GUI M, LIN J, MA C W, et al. Optimization of liquid smoking processing and its effect on quality of sturgeon fillets[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 235-241.
- [26] RUIZ-ALONSO S A, GIRÓN-HERNÁNDEZ L J, LÓPEZ-VARGAS J H, et al. Optimizing salting and smoking conditions for the production and preservation of smoked-flavoured tilapia fillets[J]. LWT, 2021, 138: 110733.
- [27] 包宇婷, 王维民, 谌素华, 等. 响应面法优化液熏罗非鱼的加工工艺[J]. 食品工业科技, 2015, 36(14): 275-281. BAO Y T, WANG W M, SHEN S H, et al. Optimization of smoked processing of tilapia through response surface method[J]. Science and Technology of

- Food Industry, 2015, 36(14): 275-281.
- [28] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission. National food safety standard, determination of moisture in food: GB 5009.3-2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [29] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission. National Food Safety Standard, determination of protein in food: GB 5009.5-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [30] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission. National food safety standard, determination of fat in food: GB 5009.6-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [31] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中灰分的测定: GB 5009.4-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission. National food safety standard, determination of ash in food: GB 5009.4-2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [32] 林佳, 桂萌, 王顺, 等. 鲟鱼片烟熏工艺优化及风味物质分析[J]. 肉类研究, 2016, 30(10): 1-6.
- LIN J, GUI M, WANG S, et al. Optimization of processing conditions for production of smoked sturgeon fillets and its flavor compounds[J]. Meat Research, 2016, 30(10): 1-6.
- [33] 杜洪振, 张品, 田兴垒, 等. 烟熏时间对培根杂环胺含量及产品品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 16-23.
- DU H Z, ZHANG P, TIAN X L, et al. Effect of smoking time on heterocyclic aromatic amine content and quality of bacon[J]. Food Science, 2020, 41(1): 16-23.
- [34] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定标准: GB 4789.2-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard, food microbiological inspection, standard for determination of total bacterial count: GB 4789.2-2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [35] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数: GB 4789.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard, food microbiological inspection, coliform count: GB 4789.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [36] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定: GB 5009.27-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard, determination of benzopyrene in food: GB 5009.27-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [37] WANG H, CHAMBERS E, KAN J. Sensory characteristics of combinations of phenolic compounds potentially associated with smoked aroma in foods[J]. Molecules, 2018, 23(8): 1867.
- [38] 钟映茹, 陈新欣, 周辉, 等. 烟熏材料对湘西腊肉品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(5): 241-252.
- ZHONG Y R, CHEN X X, ZHOU H, et al. Effect of smoking materials on quality of Xiangxi bacon[J]. Modern Food Science & Technology, 2016, 32(5): 241-252.
- [39] 敖常伟, 吕姗, 吴香菊, 等. 枣花及枣花蜜香气成分分析[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 182-189.
- AO C W, LÜ S, WU X J, et al. Analysis of aroma components from jujube flowers and honey [J]. Food Science, 2018, 39(20): 182-189.
- [40] 刘登勇, 吴金城, 王继业, 等. 沟帮子熏鸡主体风味成分分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 237-242.
- LIU D Y, WU J C, WANG J Y, et al. Analysis of key odor compounds of Goubangzi smoked chicken[J]. Science and Technology of Food Industry,

- 2018, 39(7): 237-242.
- [41] 姚文生, 蔡莹暄, 刘登勇, 等. 不同材料熏制鸡腿肉挥发性物质 GC-IMS 指纹图谱分析[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(6): 37-45.
- YAO W S, CAI Y X, LIU D Y, et al. Volatile compounds analysis in chicken thigh smoked with different materials by GC-IMS fingerprint[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(6): 37-45.
- [42] 寻崇荣, 薛洪飞, 刘宝华, 等. 高湿挤压技术制备持香型仿肉制品工艺[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 292-298.
- XUN C R, XUE H F, LIU B H, et al. Processing of flavored meat analogues by high-moisture extrusion[J]. Food Science, 2019, 40(4): 292-298.
- [43] 叶展. 典型膳食油脂胃肠道消化吸收特性及其对肠道健康的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- YE Z. Studies on characteristics of typical dietary oil gastrointestinal digestion and absorption, and their influences on gut health[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [44] 王道. 糖熏鸡腿关键风味物质及其形成机理初探[D]. 锦州: 渤海大学, 2019.
- WANG X. Preliminary study on key aroma compounds in sugar-smoked chicken thighs and its formation mechanism [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.
- [45] 蒋晨毓. Maillard 反应对上海熏鱼风味的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- JIANG C Y. Effect of Maillard reaction on the flavor of Shanghai style bloated[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [46] 刘登勇, 赵志南, 吴金城, 等. 基于 SPME-GC-MS 分析熏制材料对熏鸡腿挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 220-227.
- LIU D Y, ZHAO Z N, WU J C, et al. Effects of different smoking materials on volatile flavor compounds in smoked chicken thighs[J]. Food Science, 2019, 40(24): 220-227.
- [47] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品加工用植物蛋白: GB 20371-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard, plant protein for food processing: GB 20371-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [48] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard, limit of pollutants in food: GB 2762-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

Processing Technology Optimization of Liquid-smoked High Moisture Extrusion Textured Plant Protein

Li Jialei¹, Guan Lijun¹, Gao Yang¹, Yan Song¹, Wang Kunlun¹, Wang Chunli²,
Li Xiaojuan³, Lu Shuwen^{1*}, Li Bo¹, Zhou Ye¹

¹Food Processing Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086

²Harbin Examine and Inspection Center for Agricultural Products Safety and Quality, Harbin 150070

³Biotechnology Research Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150028)

Abstract It was to develop liquid-smoked products with high moisture extrusion textured plant protein as the raw material. On the basis of a single factor, the response surface method was utilized to optimize the liquid-smoked process as using sensory comprehensive score as the indicator. The optimal conditions were concluded as follows: liquid-smoked temperature 45 °C, liquid-smoked time 150 min, and volume fraction of liquid-smoked 5.7%. The actual sensory comprehensive score was 87.4 under the optimal conditions. The prepared liquid-smoked high moisture extrusion textured plant protein had the characteristics of smoky color with luster, tightly organized, rich in elasticity and strong smoky flavor. The product quality was analyzed by investigating the changes of the main nutrients, physical and chemical properties

and safety indexes of high moisture extrusion textured plant protein before and after liquid-smoked. The result showed that there was no significant change in the main nutritional components. But the physical and chemical properties changed to a certain extent. The L^* value of color difference decreased, a^* and b^* value increased, which was showing smoky color with luster. There was a slight decrease in effective acidity. The hardness, stickiness and chewiness of texture were decreased, but the elasticity increased slightly. The volatile flavor compounds increased the six compounds including phenolic compounds which were 17.668%, and other compounds had certain changes in the type and relative content. All these could improve the quality of products. There was no significant change in safety indicators. The total number of colonies was both low, and the coliforms and benzopyrene were not detected. Therefore, the prepared liquid-smoked high moisture extrusion textured plant protein has superior quality. This study can provide reliable data support for the development, utilization and market promotion of high moisture extrusion textured plant protein.

Keywords high moisture; extrusion textured protein; plant; liquid-smoked; processing technology; quality analysis