

鲣鱼原料品质改良及鱼粒休闲食品开发

于靖^{1,2,3}, 蔡志宇^{1,2,3}, 于刚¹, 马振华¹, 薛勇^{2,3*}, 薛长湖^{2,3}

(1. 三亚热带水产研究院, 海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室, 海南三亚 572018) (2. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 山东青岛 266003) (3. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南三亚 572024)

摘要: 鲣鱼营养丰富, 富含多种不饱和脂肪酸及维生素、牛磺酸等。但由于肌肉纤维粗大, 且腥酸味明显, 导致消费者接受度不高, 加工利用率低。该实验使用脱酸剂和粘合剂对鲣鱼鱼肉进行脱酸及粘合处理, 压制成型后探究干燥工艺, 旨在改良鲣鱼酸味过重的基础上开发出一款适口性强的鱼粒休闲食品。实验结果表明, 复配脱酸剂最佳配比为: 碳酸氢钠 0.6 wt.%、柠檬酸钠 0.6 wt.%、三聚磷酸钠 0.6 wt.%; 复配粘合剂最适添加量为: 木薯淀粉 6 wt.%、麦芽糊精 3 wt.%、魔芋胶 1.5 wt.%; 鱼粒最佳干燥工艺为: 60 °C 干燥 5 h, 室温密封回潮 1 h。在此条件下, 鱼粒呈现焦糖色、硬度适中, 弹性和咀嚼性最高。此外, 随着干燥温度的升高, 醇类、醛类和吡嗪类物质的种类和含量逐渐增加。己醛促进了脂肪香气的形成, 2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3-甲基吡嗪等物质为最终产品提供了独特的烘烤香气。该研究为鲣鱼脱酸及鱼粒休闲食品开发提供了理论和技术支持。

关键词: 鲣鱼; 脱酸剂; 粘合剂; 鱼粒; 热风干燥; 风味

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0808

Quality Improvement of Bonito Raw Materials and Development of Fish Tidbit Leisure Foods

YU Jing^{1,2,3}, CAI Zhiyu^{1,2,3}, YU Gang¹, MA Zhenhua¹, XUE Yong^{2,3*}, XUE Changhu^{2,3}

(1.Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Key Laboratory of Efficient Utilization and Processing of Marine Fishery Resources of Hainan Province, Sanya 572018, China) (2.State Key Laboratory of Marine Food Processing & Safety Control, College of Food Science and Engineering Ocean University of China, Qingdao 266003, China)(3.Sanya Ocean Institute, Ocean University of China, Sanya 572024, China)

Abstract: Bonito is rich in nutrients and a variety of unsaturated fatty acids and vitamins, taurine and so on. However, due to the coarse muscle fiber and obvious fishy and sour taste, it leads to low consumer acceptance and low processing utilization. In this experiment, deacidifiers and binders were used to deacidify and bind bonito flesh, and the drying process was investigated after pressing and molding, with the aim of developing a palatable fish leisure food based on the improvement of the overly acidic taste of bonito. The results showed that the optimal ratio of compound deacidifier was 0.6 wt.% of sodium bicarbonate, 0.6 wt.% of sodium citrate, and 0.6 wt.% of sodium tripolyphosphate. The optimal additive amount of compound binder was 6 wt.% of tapioca starch, 3 wt.% of maltodextrin, and 1.5 wt.% of konjac gum. The optimal drying process of the fish tidbit was drying at 60 °C for 5 h, and sealing at room temperature for 1 h. Under these conditions, the tidbits were caramel-colored, moderately hard, and had the highest springiness and chewiness. In addition, with the increase of drying temperature, the types and contents of alcohols, aldehydes and pyrazines increased gradually. Hexanal promotes a fatty aroma, and substances such as 2,5-dimethylpyrazine and 2-ethyl-3-methylpyrazine provide a distinctive baking aroma to the final products. This study provides theoretical and technical support for the deacidification of bonito and the development of fish tidbit leisure food.

Key words: bonito; deacidifier; binder; fish tidbit; hot air drying; flavor

鲣鱼营养丰富, 是一种重要的经济鱼类, 产量巨大^[1]。但鲣鱼肌肉中乳酸等酸味物质较多, 腥酸味明显, 且

收稿日期: 2024-06-07; 修回日期: 2024-07-18; 接受日期: 2024-07-26

基金项目: 三亚崖州湾科技城科技专项资助 (SKJC-2023-01-001); 海南省重点研发计划项目 (ZDYF2024XDNY188)

作者简介: 于靖 (1997-), 女, 博士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏技术, E-mail: yujing962@163.com

通讯作者: 薛勇 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工与贮藏技术, E-mail: xueyong@ouc.edu.cn

肌肉纤维粗大, 口感较差, 加工利用率较低^[2]。目前, 国内外鲮鱼的加工利用和研究主要集中在即食罐头^[3]、调味品^[4]和保健产品^[5]上, 难以消化鲮鱼巨大的产量, 极大限制了鲮鱼产业的发展。因此, 在最大程度保留营养成分的基础上改善鲮鱼鱼肉酸味明显的问题, 开发符合中国人口味的鲮鱼产品, 对鲮鱼进行进一步的加工利用, 是发展鲮鱼产业的重要途径^[6]。

脱酸剂作为一种食品添加剂在食品行业应用广泛, 通过浸泡等方法处理, 能够明显减少或去除鱼肉中的酸味, 并改善其口感和品质^[7]。郑炜^[8]发现碳酸氢钠和柠檬酸钠在秘鲁鲑鱼产品的酸味脱除中具有良好效果。此外, 仅使用单一脱酸剂的脱酸效果可能不佳, 而复配脱酸剂能够改进这一缺点, 大大提升脱酸效果^[9]。

休闲鱼粒食品作为一种鱼肉精深加工的重要产品形式, 具有高蛋白、低脂肪、营养丰富且食用方便等特点^[10], 深受消费者喜爱。研究发现, 使用低值碎肉或肉质松散的鱼类进行鱼粒加工时, 可以通过添加外源粘合剂改变鱼肉原本松散的结构状态, 使其组织结构重新合理地分布与转化, 能够保证良好口感并促进产品成型^[11]。高翔^[12]研究发现, 马铃薯淀粉、麦芽糊精和卡拉胶作为粘合剂能够明显提高鳙鱼鱼粒的弹性和咀嚼性。

本研究旨在通过脱酸剂及粘合剂的单因素试验, 确定复配脱酸剂及粘合剂的因素水平, 通过正交试验优化复配脱酸剂及粘合剂的配比, 从而解决鲮鱼鱼肉味道酸涩和肌肉结构松散等弊端。此外, 探究鱼粒加工的最适干燥温度, 探究干燥温度对产品颜色、质地及挥发性风味化合物的影响。为丰富鲮鱼加工形式, 提供多样化健康的鱼类休闲食品种类提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲮鱼(重量: 5.40 ± 1.60 kg、长度: 43.40 ± 1.80 cm), 广东茂名博贺渔港; 木薯淀粉、麦芽糊精、魔芋胶、碳酸氢钠、柠檬酸钠、三聚磷酸钠(分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; 正酮 C4-C9(标准品), 上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 仪器与设备

PHS-2F pH 计, 上海仪电科学仪器股份有限公司; FA1004B 电子天平, 上海佑科仪器仪表有限公司; ST-06 电热恒温鼓风干燥箱, 上海森信试验仪器有限公司; UltraScan Pro1166 色度计, 日本柯尼卡美能达公司; ZGY-TA 质构仪, 诚开工业品有限公司; FlavourSpec®气相色谱-离子迁移谱仪, 德国 G. A. S 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 鱼粒加工工艺流程

原料解冻→去头尾、内脏→切块→脱酸剂浸泡→蒸熟→去刺、搅碎→加辅料→粘合剂粘合处理→压制成型→干燥→回潮→切粒→包装

1.3.2 脱酸剂添加量优化

将前处理好的鲮鱼肉以料液比 1:3 的比例置于脱酸剂溶液中完全浸泡, 并以保鲜膜密封后置于 4 °C 冰箱静置 4 h, 以蒸馏水浸泡为空白对照组。本研究选择三种脱酸剂: 碳酸氢钠、柠檬酸钠、三聚磷酸钠, 并以其添加量为单因素进行正交试验, 以感官评价结果及 pH 为指标进行评价, 确定脱酸剂的最佳添加量。

1.3.2.1 单因素实验设计

在柠檬酸钠和三聚磷酸钠添加量均为 0.6 wt.% 条件下, 探讨碳酸氢钠添加量(0、0.3 wt.%、0.6 wt.%、0.9 wt.%、1.2 wt.%) 对鱼粒感官品质及 pH 影响;

在碳酸氢钠和三聚磷酸钠添加量均为 0.6 wt.% 条件下, 探讨柠檬酸钠添加量(0、0.3 wt.%、0.6 wt.%、0.9 wt.%、1.2 wt.%) 对鱼粒感官品质及 pH 影响;

在碳酸氢钠和柠檬酸钠添加量均为 0.6 wt.% 条件下, 探讨三聚磷酸钠添加量(0、0.3 wt.%、0.6 wt.%、0.9 wt.%、1.2 wt.%) 对鱼粒感官品质及 pH 影响。

1.3.2.2 感官评价

感官评价小组成员由 10 名训练有素的教师和学生组成, 在感官品评室中按表 1 对脱酸后的鲮鱼进行感官评价。

质地和风味评分各占 50%，以 10 名成员的平均评分作为最终得分。

表 1 感官评分表

Table 1 The sensory evaluation standard

序号	质地	风味	评分
1	咀嚼性极佳	无酸味	10
2	咀嚼性较佳	略有酸味	8
3	咀嚼性一般	酸味明显	6
4	咀嚼性较差	酸味较大	4
5	咀嚼性极差	酸味严重	2

1.3.2.3 pH 测定

pH 值的测定参考《GB 5009.237-2016》。每组样品称取 2.00 g，加入十倍重量蒸馏水，均质后静置 30 min，过滤后使用 pH 计测定。

1.3.2.4 复配脱酸剂优化

在单因素基础上，为得到复配脱酸剂最佳添加量，以柠檬酸钠、碳酸氢钠和三聚磷酸钠添加量为试验因素，每个因素设定三个水平，采用 $L_9(3^3)$ 正交试验，以感官评价为指标，优化复配脱酸剂最佳配比。

1.3.3 鱼粒粘合工艺优化

将脱酸后的鳕鱼鱼肉表面清洗干净，用吸水纸沥干后，置于绞肉机中绞至颗粒状，按比例加入粘合剂并搅拌均匀，100 °C 蒸制 3 min，取出后使用模具进行定型。本研究选择三种粘合剂：木薯淀粉、麦芽糊精和魔芋胶，并以其添加量为单因素进行正交试验，以感官评价结果为指标进行评价，确定粘合剂的最佳添加量。

1.3.3.1 单因素实验设计

在麦芽糊精和魔芋胶添加量分别为 3 wt.% 和 1 wt.% 条件下，探讨木薯淀粉添加量（0、3 wt.%、6 wt.%、9 wt.%、12 wt.%）对鱼粒感官品质的影响；

在木薯淀粉和魔芋胶添加量分别为 6 wt.% 和 1 wt.% 条件下，探讨麦芽糊精添加量（0、1 wt.%、3 wt.%、5 wt.%、7 wt.%）对鱼粒感官品质的影响；

在木薯淀粉和麦芽糊精添加量分别为 6 wt.% 和 3 wt.% 条件下，探讨魔芋胶添加量（0、0.5 wt.%、1 wt.%、1.5 wt.%、2 wt.%）对鱼粒感官品质的影响。

1.3.3.2 感官评价

使用模具将样品定型并干燥成鱼粒半成品，室温冷却后进行感官评定。感官评价小组成员由 10 名训练有素的教师和学生组成，在感官品评室中按表 2 对鱼粒的风味和质地进行评价。质地和风味评分各占 50%，以 10 名成员的平均评分作为最终得分。

表 2 感官评分标准

Table 2 Sensory scoring criteria

序号	质地	口感	评分
1	质地散烂	没有弹性、口感很硬	4
2	质地松散	弹性不足、口感较硬	6
3	质地细腻	略有弹性、质地较软	8
4	质地紧实	富有弹性、软硬适中	10

1.3.3.3 复配粘合剂优化

在单因素基础上，为得到复配粘合剂最佳添加量，以麦芽糊精、魔芋胶和木薯淀粉添加量为试验因素，每个因素设定三个水平，采用 $L_9(3^3)$ 正交试验，以感官评分为指标，优化复配粘合剂最适添加量。

1.3.4 鱼粒干燥工艺

将经过脱酸、粘合及定型处理后的鳕鱼鱼粒置于食品级烘干箱内进行干燥。干燥温度分别为 40、50、60 及 70 °C，以水分含量降低至 25% 为干燥终点，测定不同干燥温度下鱼粒的色泽、质构及风味特征，确定鳕鱼鱼粒加工的最佳干燥工艺。

1.3.4.1 不同干燥温度下鱼粒水分含量测定

水分含量测定参照 GB 5009.3-2010《食品安全国家标准食品中水分的测定》中的直接干燥法。每组重复测量三次，结果取平均值。

1.3.4.2 不同干燥温度下鱼粒感官评价

感官评价小组成员由10名训练有素的教师和学生组成，在感官品评室中按表3对鱼粒的风味和质地进行评价。质地和风味评分各占50%，以10名成员的平均评分作为最终得分。

表3 感官评分标准

Table 3 Sensory scoring criteria

序号	质地	风味	评分
1	质地散烂、没有弹性、口感很硬	味道寡淡、腥味较重	4
2	质地松散、弹性不足、口感较硬	烘烤香气不明显、有明显腥酸味	6
3	质地细腻、略有弹性、质地较软	略有烘烤香气、腥酸味较淡	8
4	质地紧实、富有弹性、软硬适中	烘烤香气明显、无明显腥酸味	10

1.3.4.3 不同干燥温度下鱼粒色差测定

使用 UltraScan Pro1166 色度计评估鱼粒样品在干燥过程中的颜色变化。在自然光条件下，使用标准白板校准后确定颜色参数，即亮度 (L^*)、红绿度 (a^*) 和黄蓝度 (b^*)。每个样品重复测量三次，结果取平均值。

1.3.4.4 不同干燥温度下鱼粒质构测定

将样品切成小立方体 ($1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$)，使用配备 P/50R 探针的质地分析仪分析鱼粒的硬度、弹性、咀嚼性和粘性特性。在 1 mm/s 的试验速度下，在 30% 的变形量下进行连续两个循环。每个样品重复进行三次测量。

1.3.4.5 不同干燥温度下鱼粒挥发性风味物质测定

采用气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 分析不同干燥温度下鱼粒的挥发性风味化合物。精确称取 2.00 g 样品在 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 下孵育 10 min ，程序如下： 2 mL/min 2 min ， 15 mL/min 8 min ， 50 mL/min 5 min ， 100 mL/min 5 min ， 150 mL/min 10 min ，总运行时间为 30 min 。氮气作为漂移气，流速为 250 mL/min ^[13]。使用正酮 C4-C9 作为外参计算化合物的保留指数 (Retention index, RI)。通过将样品的 RI 与 GC-IMS 库中的数据比较，对挥发性化合物进行定性。分析重复进行三次。

1.3.5 数据处理

通过 Excel 2019 及 GraphPad prism 8.0 软件进行画图，使用 SPSS 26.0 软件对各组数据进行方差计算和显著性分析， $P < 0.05$ 被认为具备显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 脱酸剂单因素试验结果

不同添加量脱酸剂对产品感官评分和 pH 的影响如图 1 所示。添加不同脱酸剂样品的感官评分及 pH 值相比于未处理组均有明显提升，说明碳酸氢钠、柠檬酸钠和三聚磷酸钠作为脱酸剂均具有较强的脱酸效果。随着脱酸剂添加量增加，产品感官评分均呈现先上升后下降的趋势，导致这种现象的原因可能是过量的脱酸剂会对鱼肉的肌肉组织结构产生一定影响^[7]，从而降低感官评分。碳酸氢钠添加量为 $0.9 \text{ wt.}\%$ 时感官评分最高，不仅可以明显改善鲮鱼鱼肉的酸涩口感，还能保证的鱼肉的质地，大大提升了鱼肉的感官品质。在柠檬酸钠添加量低于 $0.6 \text{ wt.}\%$ 时，鱼肉的感官评分明显上升，当柠檬酸钠添加量进一步上升时，鱼肉质地明显劣化，鱼肉咀嚼性变差。此外，随着三聚磷酸钠添加量的增加，感官评分呈现先升高后下降的趋势，在添加量为 $0.9 \text{ wt.}\%$ 时评分达到最高，这与上述两种脱酸剂的变化趋势相似，说明适量脱酸剂对鲮鱼鱼肉的感官品质有良好提升作用，但是过量添加会导致鱼肉肌肉组织变差，感官评分降低。

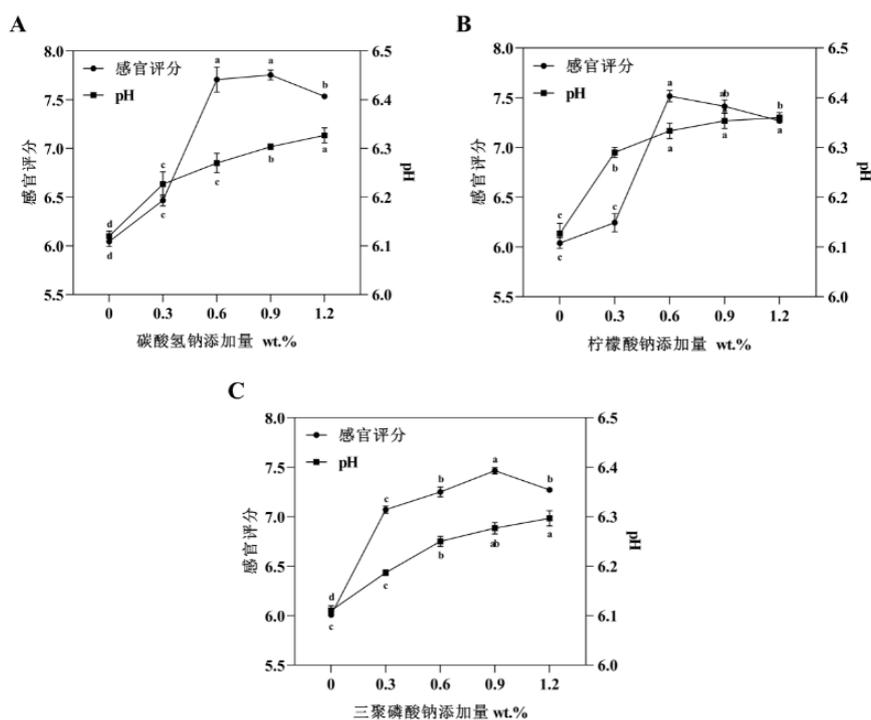


图1 不同脱酸剂对感官评分及pH值影响

Fig.1 Effect of different deacidifiers on sensory score and pH value

注：图中不同小写字母表示不同处理组间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。下图同。

2.2 脱酸剂正交试验结果

根据单因素实验中各脱酸剂的最佳添加量，确定了正交实验的因素水平表（表4），以感官评分为指标，设计三因素三水平的正交实验，优化出复配脱酸剂的最佳配比。正交试验结果如表5所示。

表4 脱酸剂正交试验因素水平表

Table 4 Factors and levels of orthogonal test design for the deacidifiers

水平	因素		
	A 碳酸氢钠/wt.%	B 柠檬酸钠/wt.%	C 三聚磷酸钠/wt.%
1	0.3	0.3	0.3
2	0.6	0.6	0.6
3	0.9	0.9	0.9

表5 脱酸剂正交试验结果表

Table 5 Results of orthogonal test design for the deacidifiers

编号	A	B	C	感官评价
1	1	1	1	6.7
2	1	2	2	7.5
3	1	3	3	7.3
4	2	1	2	7.2
5	2	2	3	7.6
6	2	3	1	7.1
7	3	1	3	7.0
8	3	2	1	7.1
9	3	3	2	7.4
K_1	21.5	20.9	20.9	

K ₂	21.9	22.2	22.1
K ₃	21.5	21.8	21.9
k ₁	7.167	6.967	6.967
k ₂	7.300	7.400	7.367
k ₃	7.167	7.267	7.300
R	0.133	0.433	0.400
主次顺序	B>C>A		
最优水平	A ₂	B ₂	C ₂
最优组合	A ₂ B ₂ C ₂		

通过正交实验结果可知，脱酸剂的极差 R 表示脱酸剂对产品感官评分的影响程度，其影响能力从大到小依次为柠檬酸钠、三聚磷酸钠、碳酸氢钠。因此复配脱酸剂的最佳添加量配比为：碳酸氢钠 0.6 wt.%、柠檬酸钠 0.6 wt.%、三聚磷酸钠 0.6 wt.%。

2.3 粘合剂单因素试验结果

不同粘合剂添加量对鱼粒感官品质的影响如图 2 所示。蒸煮后鱼肉蛋白发生变性，丧失凝胶能力，在加工过程中不易成型^[14]。木薯淀粉中支链淀粉比例较大，具有较好的延展性，能够形成较好的网络结构^[15]。随着木薯淀粉的加入，鱼粒的感官品质得到明显提升，在添加量低于 6 wt.%时，感官评分处于上升趋势，但当添加量超过 6 wt.%，由于淀粉含量过多而导致糊化不完全，烘干后的鳀鱼鱼粒品质明显下降，口感偏硬，咀嚼性不佳，产品粉质感加重。因此，木薯淀粉的最适添加量为 6 wt.%。

添加麦芽糊精能够明显促进鱼肉粘合以及口感提升。感官评分最高时麦芽糊精添加量为 3 wt.%，此时鱼粒具有一定的嚼劲和弹性。但随着麦芽糊精添加量继续增加，鳀鱼鱼粒的感官评分明显降低，且鱼粒边角易开裂破碎。

魔芋胶经过热溶胀后形成的凝胶粘性较强，有利于鱼粒成型，具有良好的粘合作用。图 2C 中鱼粒感官评分随着魔芋胶添加量的增加呈现先增后减的趋势。感官评分最高时魔芋胶添加量为 1 wt.%，此时鱼粒表面平整。综上所述，木薯淀粉、麦芽糊精和魔芋胶的最适添加量分别为 6 wt.%、3 wt.%和 1 wt.%。

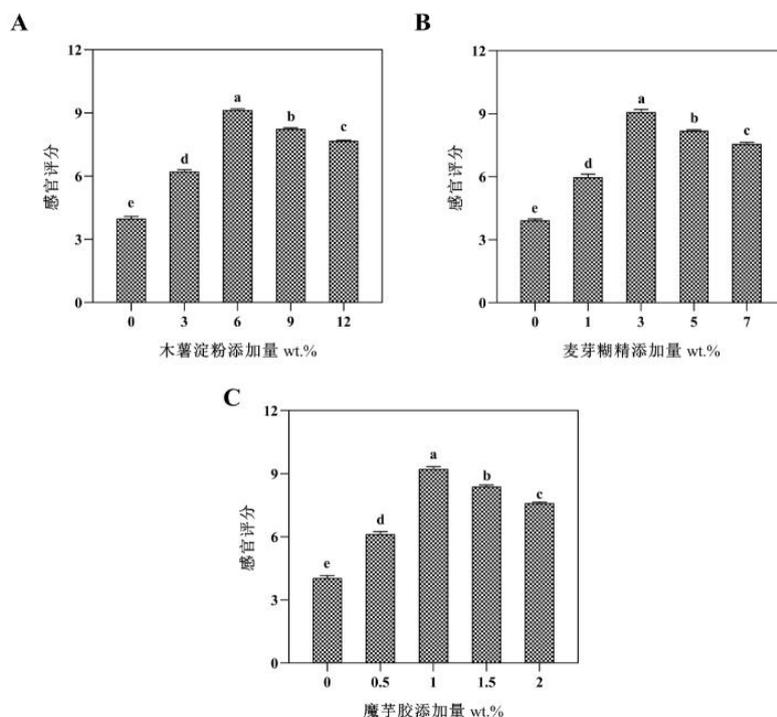


图 2 不同粘合剂对感官评分影响

Fig.2 Effect of different binders on sensory scores

2.4 粘合剂正交试验结果

根据单因素实验中各粘合剂的最适添加量,确定了正交实验的因素水平表(表6),以感官评分为指标,设计三因素三水平的正交实验,优化出复配粘合剂的最佳配比。正交试验结果如表7所示。

表6 粘合剂正交试验因素水平表

Table 6 Factors and levels of orthogonal test design for the binders

水平	因素		
	A 木薯淀粉 wt.%	B 麦芽糊精 wt.%	C 魔芋胶 wt.%
1	3	1	0.5
2	6	3	1
3	9	5	1.5

表7 粘合剂正交试验结果表

Table 7 Results of orthogonal test design for the binders

编号	A	B	C	感官评价
1	1	1	1	7.7
2	1	2	2	8.5
3	1	3	3	8.5
4	2	1	2	8.2
5	2	2	3	8.7
6	2	3	1	8.1
7	3	1	3	8.1
8	3	2	1	8.1
9	3	3	2	8.4
K ₁	24.7	24.0	23.9	
K ₂	25.0	25.3	25.1	
K ₃	24.6	25.0	25.3	
k ₁	8.233	8.000	7.967	
k ₂	8.333	8.433	8.367	
k ₃	8.200	8.333	8.433	
R	0.133	0.433	0.466	
主次顺序		C>B>A		
最优水平	A ₂	B ₂	C ₃	
最优组合		A ₂ B ₂ C ₃		

综上所述,粘合剂对产品感官评分的影响能力从大到小依次为魔芋胶、麦芽糊精、木薯淀粉。因此复配粘合剂的最佳添加量配比为:木薯淀粉6 wt.%、麦芽糊精3 wt.%、魔芋胶1.5 wt.%。此时鱼粒表面平齐,不易破碎,口感软硬适中,质地均匀。

2.5 不同干燥温度下鱼粒水分含量及感官评分变化

如图3A所示,鱼粒的干燥速率随温度升高而加快,鱼粒在40、50、60和70℃的干燥温度下水分含量达到25%所需时间分别为9、7、5和4h。干燥速率随着时间的延而下降,这可能是由于在干燥后期鱼粒表面形成了一层硬壳,阻碍了鱼粒内部水分的散失。60℃干燥温度下鱼粒的感官评分最高(图3B),这可能是由于随着温度上升,鱼粒表面水分蒸发速度加快,导致产品干结至焦状,硬度变大,入口后咀嚼性变差。而过低的干燥速率会影响加工周期,影响生产效率。因此选择最佳干燥工艺为60℃干燥5h,中途取出在室温密封环境中回潮1h以平衡水分,在此干燥工艺下鱼粒感官评分最高,适口性最强。

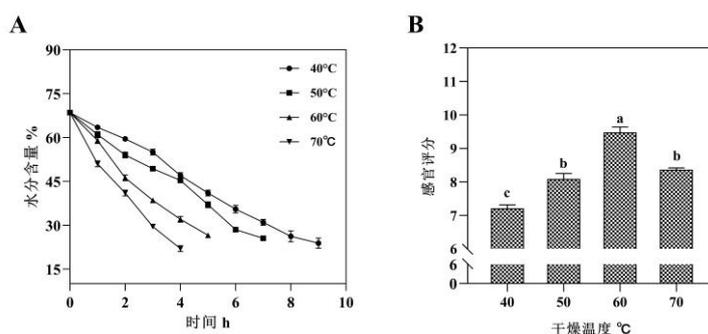


图3 不同干燥温度下鱼粒 (A) 干燥曲线及 (B) 感官评分

Fig.3 (A) Drying curves and (B) Sensory scores of fish grains at different drying temperatures

2.6 不同干燥温度下鱼粒色泽分析

不同干燥温度下鱼粒的色泽变化如图4所示。 L^* 值与样品氧化程度相关^[16], 呈缓慢增加趋势。说明随着干燥温度升高, 蛋白质变性程度增强, 表面光折射增加^[17], 鱼肉表面逐渐光滑。 a^* 值与肌红蛋白或血红蛋白及其衍生物状态相关^[18], 随着干燥温度升高, 样品的 a^* 值明显降低 ($P < 0.05$), 可能是在较高的温度下, 鱼肉内部的肌红蛋白或血红蛋白发生变性^[19]。 b^* 值的主要影响因素是脂质氧化和褐变反应引起的颜色变化^[20]。由图4C可见, b^* 值随着干燥温度升高明显增加 ($P < 0.05$), 说明随着干燥温度的升高, 样品逐渐变黄, 提高了消费者的可接受性。由于70°C的干燥温度下样品的 a^* 值显著降低 ($P < 0.05$), 因此, 选择60°C为最适干燥温度, 在此干燥条件下, 产品表面光滑, 色泽状态最佳。

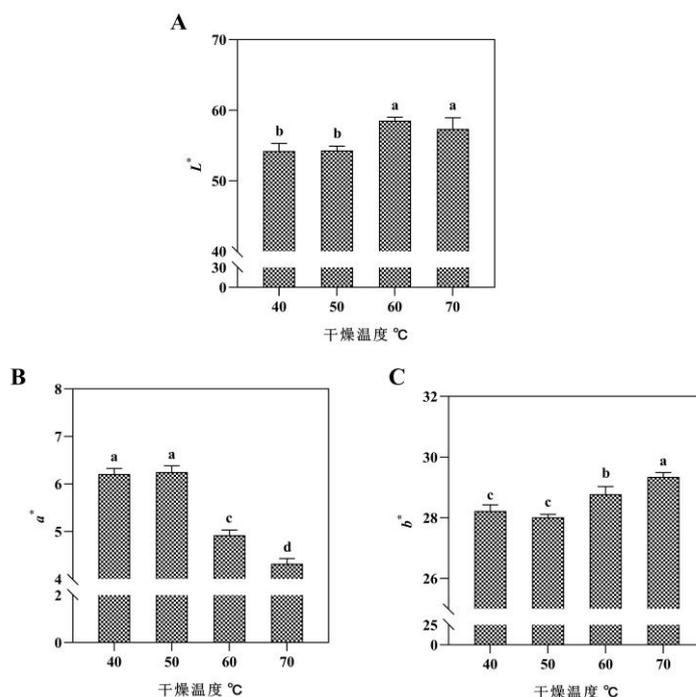


图4 不同干燥温度下鱼粒色差结果

Fig.4 Color difference of fish grains at different drying temperatures

2.7 不同干燥温度下鱼粒质构分析

不同干燥温度下鱼粒的硬度、弹性和咀嚼性结果如图5所示。随着温度升高, 鱼肉肌肉纤维收缩, 水分流失, 导致产品硬度和咀嚼性呈现增加趋势。产品弹性呈现先上升后降低的趋势, 60°C干燥温度下获得的产品弹性最高, 达到0.81 mm。鱼粒的弹性越高, 适口性更强, 市场认可度则越高。综上所述, 在60°C干燥条件下, 产品的质构

状态最佳 (图 6)。

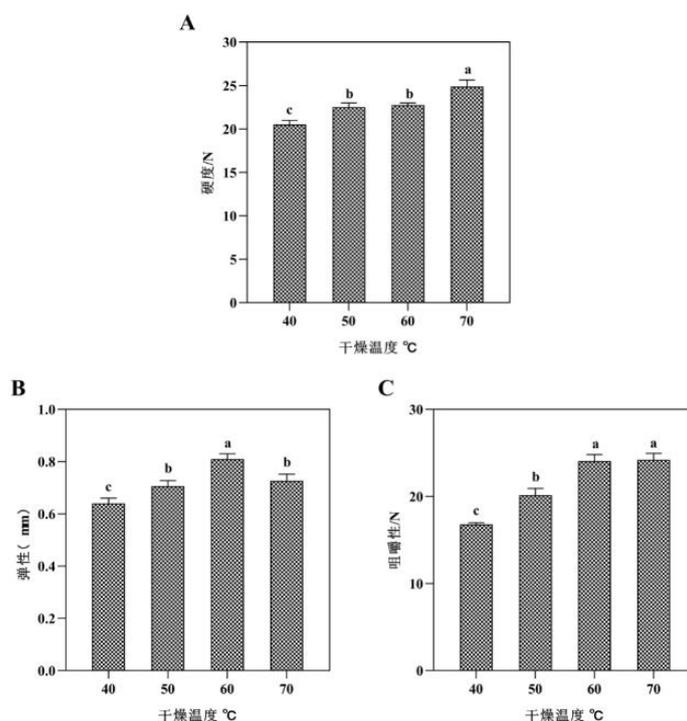


图 5 不同干燥温度下鱼粒质构结果

Fig.5 Texture structure of fish grains at different drying temperatures



图 6 60 °C干燥温度下鲣鱼鱼粒实物图

Fig.6 Physical picture of bonito tidbit at 60 °C drying temperature

2.8 不同干燥温度下鱼粒风味物质变化

采用 GC-IMS 鉴定了不同干燥温度下鱼粒产品的挥发性指纹 (图 7), 点的颜色程度代表挥发性物质的含量水平, 颜色越红越亮则相对含量越高。共鉴定出 56 个挥发性化合物, 其中包括 13 种醛类、2 种酸类、12 种醇类、1 种含硫化合物、9 种酯类、7 种杂环化合物、10 种酮类和 2 种烯萜化合物 (表 8)。由于化合物的单一浓度不同, 各组样品质子的亲和力和含量不同, 二聚体的漂移时间也随之增加而增加^[21]。其中, 1-丁醇、1-戊醇、5-甲基糠醛、己醛、戊醛、2-丁酮、2-己酮、 β -蒎烯同时具有单体和二聚体形式。

醇类、醛类和吡嗪类物质在干燥后含量显著升高。醇类是种类最多的化合物, 主要由脂质氧化或支链氨基酸的分解代谢反应形成, 具有独特的花香和果香味^[22]。1-辛烯-3-醇又称为蘑菇醇, 是亚油酸的过氧化氢降解产物, 具有较低的阈值, 具有蘑菇香气^[23], 在干燥后的样品中的相对含量很高, 表明其对鱼粒产品的独特香味起重要作用。

醛类物质挥发性较强, 主要来自于不饱和脂肪酸氧化后形成的过氧化物的裂解^[24], 是鲣鱼鱼粒中重要的风味物质。随着干燥温度的升高, 鱼粒中挥发性醛类如 2-甲基丁醛、己醛、壬醛和 5-甲基糠醛等物质含量逐渐增加, 醛类物质的增加有助于最终产品脂肪香气的形成^[25]。Aheto 等^[26]已发现己醛的存在有助于培根等腌肉制品中腌熏

风味的形成。

酮类作为在脂质氧化和烷烃降解过程中形成的次级产物，是发酵水产品中奶酪香气的主要贡献者^[27]。由于独特的果香属性，酮类物质的存在对鱼粒的整体风味有积极贡献。由于脂质在较高的发酵温度下易发生氧化降解，2-丁酮、2-己酮和 3-羟基-2-丁酮等酮类物质的含量随着干燥温度的升高而大大增加，为鳕鱼鱼粒提供了更浓郁的果香味。

β -蒎烯仅在烘烤后的鳕鱼鱼粒中检测到，且含量随着干燥温度升高逐渐增加。 β -蒎烯含量的增加与鱼粒烘烤过程中碳水化合物和脂类的结构断裂有关，这些化合物的降解能够促进萜类化合物的释放^[28]。此外，还检测到2-乙基-3-甲基吡嗪等大量吡嗪类物质，吡嗪类化合物主要由美拉德反应产生，具有较低的气味阈值，主要呈现烘烤和坚果香气^[29]，能够为鳕鱼鱼粒提供独特的烘烤香气。

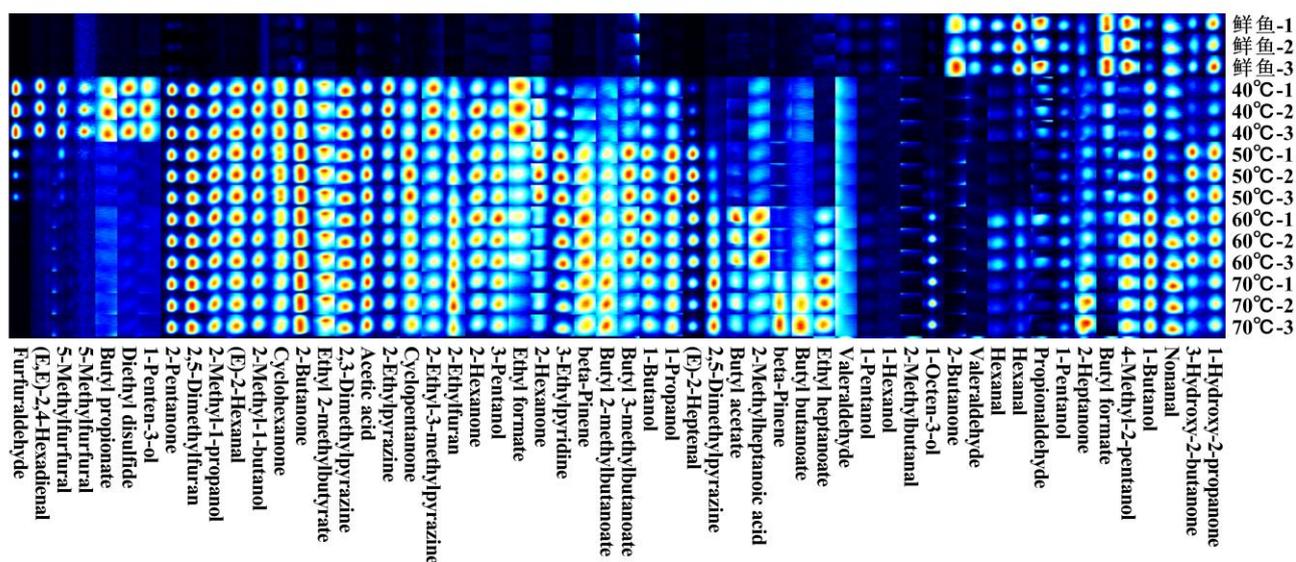


图 7 不同干燥温度下鱼粒挥发性风味物质图谱

Fig.7 Spectrum of volatile flavor compounds in fish grains at different drying temperatures

表 8 通过 GC-IMS 鉴定鱼粒中的挥发性化合物

Table 8 Volatile compounds in fish tidbit identified by GC-IMS

分类	中文名称	英文名称	CAS#	分子式	保留时间/s	迁移时间/ms	气味特征	
	1-丙醇	1-Propanol	C71238	C ₃ H ₈ O	1 025.6	233.458	1.109 73	酒味
	1-丁醇 (单体)	1-Butanol (M)	C71363	C ₄ H ₁₀ O	1 153.7	341.167	1.182 64	果香味、类葡萄酒味
	1-丁醇 (二聚体)	1-Butanol (D)	C71363	C ₄ H ₁₀ O	1 153.5	340.952	1.382 17	果香味、类葡萄酒味
	1-戊醇 (单体)	1-Pentanol (M)	C71410	C ₅ H ₁₂ O	1 260.6	478.675	1.254 1	香脂味
	1-戊醇 (二聚体)	1-Pentanol (D)	C71410	C ₅ H ₁₂ O	1 260.8	478.983	1.514 32	香脂味
醇 类	3-戊醇	3-Pentanol	C584021	C ₅ H ₁₂ O	1 099.3	286.474	1.422 63	果香味、草本味、坚果味
	1-己醇	1-Hexanol	C111273	C ₆ H ₁₄ O	1 340.6	607.915	1.627 8	花香味
	2-甲基-1-丙醇	2-Methyl-1-propanol	C78831	C ₄ H ₁₀ O	1 066.6	261.496	1.175 66	酒味、苦味
	2-甲基-1-丁醇	2-Methyl-1-butanol	C137326	C ₅ H ₁₂ O	1 218.9	419.772	1.454 02	酒味、洋葱味
	4-甲基-2-戊醇	4-Methyl-2-pentanol	C108112	C ₆ H ₁₄ O	1 168.5	357.747	1.273 34	-
	1-戊烯-3-醇	1-Penten-3-ol	C616251	C ₅ H ₁₀ O	1 110.5	297.01	1.347 02	黄油味
	1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	C3391864	C ₈ H ₁₆ O	1 465.1	869.691	1.159 21	蘑菇味
	丙醛	Propionaldehyde	C123386	C ₃ H ₆ O	804.9	138.756	1.143 6	刺激性气味
	2-甲基丁醛	2-Methylbutanal	C96173	C ₅ H ₁₀ O	928.9	184.536	1.401 53	可可味、杏仁味
	戊醛 (单体)	Valeraldehyde (M)	C110623	C ₅ H ₁₀ O	1 001.5	218.395	1.193 87	杏仁味、麦芽味、油脂味
	戊醛 (二聚体)	Valeraldehyde (D)	C110623	C ₅ H ₁₀ O	1 000.8	217.985	1.417 44	杏仁味、麦芽味、油脂味
	己醛 (单体)	Hexanal (M)	C66251	C ₆ H ₁₂ O	1 097.4	284.752	1.267 75	脂肪味
	己醛 (二聚体)	Hexanal (D)	C66251	C ₆ H ₁₂ O	1 098.8	286.044	1.557 97	脂肪味
醛 类	(E)-2-己醛	(E)-2-Hexanal	C6728263	C ₆ H ₁₀ O	1 201.8	397.831	1.155 25	草本味
	(E)-2-庚烯醛	(E)-2-Heptenal	C18829555	C ₇ H ₁₂ O	1 312.4	560.593	1.229 41	脂肪味、杏仁味
	壬醛	Nonanal	C124196	C ₉ H ₁₈ O	1 402.1	725.596	1.477 36	脂肪味、青草味
	5-甲基糠醛 (单体)	5-Methylfurfural (M)	C620020	C ₆ H ₆ O ₂	1 547	1 100.875	1.133 68	杏仁味、焦糖味
	5-甲基糠醛 (二聚体)	5-Methylfurfural (D)	C620020	C ₆ H ₆ O ₂	1 547.1	1 101.183	1.474 98	杏仁味、焦糖味
	2-呋喃甲醛	Furfuraldehyde	C98011	C ₅ H ₄ O ₂	1 464.8	868.836	1.335 24	杏仁味、甜味
	(E,E)-2,4-己二烯醛	(E,E)-2,4-Hexadienal	C142836	C ₆ H ₈ O	1 438.8	806.284	1.101 68	清甜味、花香味
酮 类	2-丁酮 (单体)	2-Butanone (M)	C78933	C ₄ H ₈ O	913.7	178.201	1.060 45	-
	2-丁酮 (二聚体)	2-Butanone (D)	C78933	C ₄ H ₈ O	918.2	180.063	1.244 68	-

	28	2-戊酮	2-Pentanone	C107879	C ₅ H ₁₀ O	1 000.2	217.63	1.366 54	果香味
	29	2-己酮 (单体)	2-Hexanone (M)	C591786	C ₆ H ₁₂ O	1 096.1	283.76	1.190 59	果香味、黄油味
	30	2-己酮 (二聚体)	2-Hexanone (D)	C591786	C ₆ H ₁₂ O	1 094.6	282.598	1.496 58	果香味、黄油味
	31	2-庚酮	2-Heptanone	C110430	C ₇ H ₁₄ O	1 193	386.902	1.265 4	草本味、木本味、果香味
	32	环戊酮	Cyclopentanone	C120923	C ₅ H ₈ O	1 178.7	369.59	1.124 04	薄荷味
	33	环己酮	Cyclohexanone	C108941	C ₆ H ₁₀ O	1 293.8	531.317	1.153 74	薄荷味
	34	1-羟基-2-丙酮	1-Hydroxy-2-propanone	C116096	C ₃ H ₆ O ₂	1 294.2	531.869	1.064 18	坚果味
	35	3-羟基-2-丁酮	3-Hydroxy-2-butanone	C513860	C ₄ H ₈ O ₂	1 294.5	532.422	1.326 69	黄油味、奶油味
酯类	36	甲酸乙酯	Ethyl formate	C109944	C ₃ H ₆ O ₂	801.9	137.825	1.069 77	-
	37	甲酸丁酯	Butyl formate	C592847	C ₅ H ₁₀ O ₂	1 033.2	238.413	1.499 64	果香味
	38	2-甲基丁酸乙酯	Ethyl 2-methylbutyrate	C7452791	C ₇ H ₁₄ O ₂	1 052.3	251.376	1.230 08	青苹果味、果香味
	39	乙酸丁酯	Butyl acetate	C123864	C ₆ H ₁₂ O ₂	1 084.3	274.68	1.239 12	梨味、果香味
	40	丙酸丁酯	Butyl propionate	C590012	C ₇ H ₁₄ O ₂	1 150	337.076	1.281 71	莓果味、苹果味、果香味
	41	丁酸丁酯	Butyl butanoate	C109217	C ₉ H ₁₆ O ₂	1 219.9	421.087	1.325 98	热带果香味
	42	2-甲基丁酸丁酯	Butyl 2-methylbutanoate	C15706737	C ₉ H ₁₈ O ₂	1 220.9	422.401	1.383 8	果香味、可可味
	43	3-甲基丁酸丁酯	Butyl 3-methylbutanoate	C109193	C ₉ H ₁₈ O ₂	1 292.4	529.107	1.386 91	果香味
	44	庚酸乙酯	Ethyl heptanoate	C106309	C ₉ H ₁₈ O ₂	1 337.7	602.759	1.406 99	果香味
杂环化合物	45	2,5-二甲基呋喃	2,5-Dimethylfuran	C625865	C ₆ H ₈ O	951.3	194.284	1.371 56	薄荷味
	46	2-乙基呋喃	2-Ethylfuran	C3208160	C ₆ H ₈ O	966.8	201.31	1.307 05	黄油味、焦糖味
	47	2,3-二甲基吡嗪	2,3-Dimethylpyrazine	C5910894	C ₆ H ₈ N ₂	1 375.4	671.807	1.117 75	坚果味、花生酱味、可可味
	48	2,5-二甲基吡嗪	2,5-Dimethylpyrazine	C123320	C ₆ H ₈ N ₂	1 336.7	601.102	1.102 79	可可味、炒坚果味、烘烤味
	49	2-乙基吡嗪	2-Ethylpyrazine	C13925003	C ₆ H ₈ N ₂	1 347.3	619.699	1.159 92	花生酱味
	50	2-乙基-3-甲基吡嗪	2-Ethyl-3-methylpyrazine	C15707230	C ₇ H ₁₀ N ₂	1 363.7	649.641	1.173 5	坚果味、花生味
酸类	51	3-乙基吡啶	3-Ethylpyridine	C536787	C ₇ H ₉ N	1 386.3	693.355	1.096 84	坚果味、可可味
	52	乙酸	Acetic acid	C64197	C ₂ H ₄ O ₂	1 493.4	943.362	1.121 72	酸味、刺激性气味
	53	2-甲基庚酸	2-Methylheptanoic acid	C1188029	C ₈ H ₁₆ O ₂	1 140.9	327.396	1.390 49	-
萜类	54	β -蒎烯 (单体)	β -Pinene (M)	C127913	C ₁₀ H ₁₆	1 117.7	303.916	1.217 52	松木味、树脂味
	55	β -蒎烯 (二聚体)	β -Pinene (D)	C127913	C ₁₀ H ₁₆	1 117.2	303.485	1.295 66	松木味、树脂味
硫化物	56	二乙基二硫醚	Diethyl disulfide	C110816	C ₄ H ₁₀ S ₂	1 208.4	406.131	1.129 09	刺激性大蒜味、洋葱味

3 结论

本文为提高鲣鱼的加工利用率和经济附加值,将鲣鱼鱼肉进行脱酸及粘合处理,经定型干燥后开发了一款休闲鱼粒产品。通过单因素和正交试验确定了复配脱酸剂的最佳添加量为碳酸氢钠 0.6 wt.%、柠檬酸钠 0.6 wt.%、三聚磷酸钠 0.6 wt.%。复配粘合剂的最佳添加量为木薯淀粉 6 wt.%、麦芽糊精 3 wt.%、魔芋胶 1.5 wt.%。最佳干燥工艺为 60 °C 热风干燥 5 h,室温密封回潮 1 h。在此工艺条件下,鲣鱼鱼粒酸味减弱,感官品质最佳,且兼具良好的色泽、弹性和咀嚼性。干燥后鱼粒中醇类、醛类和吡嗪类风味化合物的种类及含量明显升高,为最终产品提供了独特的脂肪和烘烤香气。

参考文献

- [1] SELÇUK B, & AYVAZ Z. Monitoring color and quality parameters of salted and smoke-flavored Atlantic bonito cutlets [J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2022, 31(10): 1038-1048.
- [2] 徐靖彤.蒸煮热处理技术对鲣鱼肉质影响研究[D].杭州:浙江工业大学,2016.
- [3] 童晓倩,郑晗笑,王婷,等.鲣鱼加热过程中的理化特性及组胺含量变化研究[J].*浙江海洋学院学报(自然科学版)*,2015,34(4):330-334.
- [4] 高飞,徐剑宏,王晋,等.金枪鱼营养价值及加工现状研究进展[J].*食品研究与开发*,2023,44(15):212-218.
- [5] 张建友,费深锋,孙蕾,等.鲣鱼佃煮工艺优化及佃煮液组分分析[J].*肉类研究*,2023,37(4):13-20.
- [6] NORIHIRO S, KENYA K, YOKO S, et al. Effective prevention of sorafenib-related vascular damage induced adverse events and maintenance of hepatic function by dried bonito broth and histidine [J]. *Cancer management and research*, 2019, 11: 4437-4448.
- [7] 夏松养.秘鲁鲣鱼肌肉酸性物质去除的初步研究[J].*食品科技*,2007,32(9):121-123.
- [8] 郑炜.秘鲁鲣鱼高水分风味鱼粒生产技术研究[D].杭州:浙江海洋大学,2018.
- [9] 谢正林,许俊齐,陈岑,等.重组鲣鱼粒关键加工工艺研究[J].*食品研究与开发*,2019,40(24):110-115.
- [10] 刘振彬,王玉川,张愨.重组鱼粒配方及其红外-负压微波联动联合干燥[J].*食品与生物技术学报*,2015,34(6):621-626.
- [11] XIAO H, FENG T Y, YU J, et al. Development of room-temperature fermented stinky sea bass and novel insights into its physicochemical and flavor formation and microbial diversity [J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103089.
- [12] 高翔.鳙鱼鱼肉粒赋形剂及调味配方的研究[J].*中国调味品*,2013,38(10):117-121.
- [13] XIAO N Y, XU H Y, JIANG X, et al. Evaluation of aroma characteristics in grass carp mince as affected by different washing processes using an E-nose, HS-SPME-GC-MS, HS-GC-IMS, and sensory analysis [J]. *Food Research International*, 2022, 158: 11584.
- [14] XIAO H, YU J, SONG L L, et al. Characterization of flesh firmness and ease of separation in the fermentation of sea bass in terms of protein structure, texture, and muscle tissue structural changes [J]. *Food Chemistry*, 2022, 162: 111965.
- [15] 田宸,廖卢艳,吴卫国.冻融处理不同来源淀粉魔芋复合凝胶特性及其影响[J].*食品研究与开发*,2024,45(7):94-102.
- [16] 赵洪雷,孟德飞,徐永霞,等.鲈鱼热风干燥动力学及品质变化研究[J].*包装与食品机械*,2022,40(6):8-14.
- [17] WANG Q, LIU B, CAO J, et al. The impacts of vacuum microwave drying on osmosis dehydration of tilapia fillets [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(1): 12956.
- [18] WANG P, ZOU M, LI D, et al. Conformational rearrangement and polymerization behavior of frozen-stored gluten during thermal treatment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 101: 105502.
- [19] 邓祎,陈方雪,杜柳,等.不同风干工艺处理的武昌鱼鱼肉品质和风味的变化[J].*现代食品科技*,2023,39(4):263-270.
- [20] YU D W, FENG T Y, JIANG Q X, et al. The change characteristics in moisture distribution, physical properties and protein denaturation of slightly salted silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets during cold/hot air drying processing [J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020, 137: 110466.
- [21] GERHARDT N, SCHWOLOW S, ROHN S, et al. Quality assessment of olive oils based on temperature-ramped HS-GC-IMS and sensory evaluation: Comparison of different processing approaches by LDA, KNN, and SVM [J]. *Food Chemistry*, 2019, 278: 720-728.
- [22] CHEN Y, LI P, LIAO L, et al. Characteristic fingerprints and volatile flavor compound variations in Liuyang Douchi during fermentation via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Chemistry*, 2021, 361: 130055.
- [23] BU Y, ZHAO Y, ZHOU Y, et al. Quality and flavor characteristics evaluation of red sea bream surimi powder by different drying techniques [J]. *Food Chemistry*, 2023, 428: 136714.

- [24] YAO W S, CAI Y X, LIU D Y, et al. Analysis of flavor formation during production of Dezhou braised chicken using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) [J]. *Food Chemistry*, 2022, 370: 130989.
- [25] LI Z, DONG L, HUANG Q, et al. Bacterial communities and volatile compounds in Doubanjiang, a Chinese traditional red pepper paste [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2016, 120(6): 1585-1594.
- [26] AHETO J H, HUANG X, TIAN X, et al. Evaluation of lipid oxidation and volatile compounds of traditional dry-cured pork belly: The hyperspectral imaging and multi-gas-sensory approaches [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(1): 13092.
- [27] OUJIFARD A, BENJAKUL S, NIRMAL N P, et al. Chemical, nutritional, microbial, and sensory characteristic of fish sauce suragh from Hormozgan, Iran [J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2020, 30(2): 140-150.
- [28] YANG L, LI H J, WU H, et al. Quality relationship between smoked and air-dried bacon of Sichuan-Chongqing in China: Free amino acids, volatile compounds, and microbial diversity [J]. *Food Research International*, 2023, 164: 112274.
- [29] ZHANG Q, DING Y C, GU S Q, et al. Identification of changes in volatile compounds in dry-cured fish during storage using HS-GC-IMS [J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109339.