DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251107008
引用格式: 李思敏, 吴限, 沈斌斌, 等. 响应面法优化鲳鱼预制菜腌制工艺研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 265–274.
Li Simin, Wu Xian, Shen Binbin, et al. Optimization of the curing process for ready-to-cook *Pampus argenteus* by response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 265–274. (in Chinese with English abstract).

响应面法优化鲳鱼预制菜腌制工艺研究

李思敏[1,2], 吴　限[3], 沈斌斌[4], 李　敏[4], 王　扬[1,2*]

(1. 浙江省水产技术推广总站, 杭州　311122; 2. 深蓝渔业资源绿色低碳高效开发重点试验室, 杭州　311122; 3. 浙江农林大学食品与健康学院, 杭州　311300; 4. 浙江浔味堂食品股份有限公司, 湖州　313009)

摘　要: 目的　利用响应面法优化鲳鱼预制菜的腌制工艺。**方法**　采用盐水腌制鲳鱼, 并优化其工艺参数。考察了腌制液浓度、腌制时间、腌制温度对鲳鱼品质的影响。在单因素试验的基础上, 以感官评分为响应值, 基于响应面法优化鲳鱼预制菜的腌制工艺。**结果**　根据氯化钠含量、蒸煮损失率等指标, 获得最佳腌制工艺参数为: 腌制液浓度为 4.2%、腌制时间为 2.75 h、腌制温度为 15 ℃±1 ℃。腌制鲳鱼预制菜的感官评分为 4.2 分, 在显著提升鱼肉水分含量(水分含量从 74.6 g/100 g 增至 80.1 g/100 g)的同时, 对产品的基本营养成分影响不大, 且含盐量处于可控范围。**结论**　该工艺用于加工腌制鲳鱼预制菜, 有效保留了鲳鱼原有营养成分, 产品品相、口感好, 研究结果为腌制鲳鱼预制菜的加工提供工艺参考。

关键词: 鲳鱼; 预制菜; 腌制; 感官评定; 响应面优化法
中图分类号: TS201.1　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)13–0265–10

Optimization of the curing process for ready-to-cook *Pampus argenteus* by response surface methodology

LI Si-Min[1,2], WU Xian[3], SHEN Bin-Bin[4], LI Min[4], WANG Yang[1,2*]

(1. *Zhejiang Fisheries Technical Extension Station*, *Hangzhou* 311122, *China*; 2. *Low-carbon and Efficient Development of Marine Fishery Resources*, *Hangzhou* 311122, *China*; 3. *College of Food and Health*, *Zhejiang A&F University*, *Hangzhou* 311300, *China*; 4. *Zhejiang Xunweitown Co*., *Ltd*., *Huzhou* 313009, *China*)

ABSTRACT: Objective　To optimize the curing process for ready-to-cook *Pampus argenteus* using response surface methodology. **Methods**　The *Pampus argenteus* was cured in a brine solution, and the process parameters were optimized. The effects of brine concentration, curing time and curing temperature on the quality of *Pampus argenteus* were investigated. Based on single-factor experiments, the curing process for ready-to-cook *Pampus argenteus* was optimized using response surface methodology with sensory score as the response value. **Result**　According to indicators such as sodium chloride content and cooking loss rate, the optimal curing parameters were determined as follows: curing concentration of 4.2%, curing time of 2.75 h, and curing temperature of 15 ℃±1 ℃. The sensory score

收稿日期: 2025-11-07
基金项目: 浙江省“三农九方”科技协作项目(2023SNJF061)
第一作者: 李思敏(1995—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水产品加工和检测。E-mail: 584538015@qq.com
***通信作者:** 王扬(1973—), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向水产品质量安全和加工。E-mail: 1752315020@qq.com

of the cured ready-to-eat *Pampus argenteus* was 4.2. While significantly increasing the moisture content of the fish (from 74.6 g/100 g to 80.1 g/100 g), the process had little effect on the basic nutritional composition of the product, and the salt content remained within a controllable range. **Conclusion** This process effectively preserves the original nutritional components of *Pampus argenteus* when used for processing cured ready-to-eat *Pampus argenteus*, yielding a product with good appearance and desirable texture. The results provide a technical reference for the processing of cured ready-to-eat *Pampus argenteus*.

KEY WORDS: *Pampus argenteus*; ready-to-cook; curing; sensory evaluation; response surface methodology

0 引 言

鲳鱼(*Pampus argenteus*)作为一种深受消费者喜爱的海水经济鱼类, 以其肉质细嫩、味道鲜美[1–2]且富含优质蛋白质[3]、二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)、二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)等不饱和脂肪酸[4]及多种微量元素[5–6]而著称。然而, 鲳鱼体内水分和蛋白质含量高, 组织蛋白酶活性强, 在捕获后极易发生腐败变质[7–8], 导致其货架期显著缩短, 这极大地限制了其销售半径与附加值提升。因此, 开发高效的鲳鱼加工保藏技术, 对于延长产业链、提升产品价值具有重要意义。

腌制作为一种历史悠久且应用广泛的食品保藏与加工方法, 通过降低水分活度、渗透压抑制微生物生长以及赋予产品独特风味, 能够有效延长水产品的货架期[9–11]。同时, 随着现代生活节奏的加快和“懒人经济”的兴起, 预制菜产业在全球范围内迅猛发展, 其方便、快捷的特点满足了当代消费者的需求。将传统腌制技术与现代预制菜概念相结合, 开发即食或即烹型腌制鲳鱼产品, 是顺应市场趋势、推动产业升级的有效途径[12–14]。

传统的腌制方式有干腌、湿腌和混合腌等, 无论何种腌制方式, 随着腌制过程中盐分渗透, 鱼肉中可溶性蛋白和氨基酸等溶出, 导致部分营养损失, 这也说明了腌制工艺对腌制鱼的营养价值、食用品质有较大的影响。更为重要的是, 腌制过程中的关键参数, 如腌制液浓度、腌制时间、腌制温度等, 会直接影响产品的保水性、质构特性以及营养保留程度[15–18]。而且, 多数腌制食物具有较浓的咸味, 长期食用可能会对身体造成较大的负担[19]。因此, 在低盐的基础上对腌制工艺进行科学优化与精准控制是实现高品质腌制鲳鱼预制菜产业化生产的关键。

目前, 已有研究关注不同腌制条件对鱼类品质的影响, 但大多集中于罗非鱼[9–10]、鲈鱼[20]、鲟鱼[21]、翘嘴红鲌[22]等其他鱼类, 缺乏对低盐腌制鲳鱼的交互作用的系统性研究。响应面法是一种高效的统计试验设计与优化工具, 它能够通过合理的试验设计, 建立因素与响应值之间的数学模型, 从而精准地确定多因素系统的最佳工艺参数组合, 并分析其交互作用, 目前已广泛应用于食品加工领域的工艺优化[23–28]。

本研究以鲳鱼为研究对象, 仅采用氯化钠溶液作为腌制液进行腌制研究, 重点考察腌制液浓度、腌制时间、腌制温度对鲳鱼品质的影响, 以感官评分为响应值, 结合氯化钠含量、蒸煮损失率、质构等指标, 在单因素试验的基础上采用响应面法优化鲳鱼腌制工艺, 为鲳鱼预制菜的工业化生产和品质控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜银鲳鱼(100±10) g、不加碘食用盐均购自杭州市三里亭海鲜市场。

盐酸、硫酸、石油醚、硼酸(沸程 30~60 ℃)、甲醇、95%乙醇、无水乙醚、正己烷(分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司); 碘化钾、硫酸钾、五水合硫酸铜、无水硫酸钠、氯化钠、氢氧化钠、焦性没食子酸、磷酸二氢钾(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 甲基蓝、酚酞、甲基红、三氯化硼甲醇(分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司); 胰蛋白胨、酵母浸膏、牛肉膏、葡萄糖、琼脂、革兰氏染色液、血琼脂平板、贝尔德-帕克琼脂平板、缓冲蛋白胨水、四硫磺酸盐煌绿增菌液(青岛高科技工业园海博生物技术有限公司)。

1.2 仪器与设备

XPE205DR 电子天平(精度 0.0001 g, 杭州康迪仪器设备有限公司); DGG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱(上海森信试验仪器有限公司); TA-TXplus 质构仪(英国 SMS 公司); AAF11/18 灰化炉(杭州金谱科学仪器有限公司); B-811 全密封索式提取仪(杭州柏瑞科学仪器有限公司); SI-45 恒温孵育摇床(杭州奥盛仪器有限公司); K-370 自动凯氏定氮仪(瑞士 BUCHI 公司); 8900N 系列气相色谱仪(美国安捷伦科技有限公司); YGC-24CF 氮吹仪、BWS-5 恒温水浴锅(杭州博友科技有限公司); SYA2-2 盐度计(天津市海华技术开发中心)。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

新鲜鲳鱼原料验收→去内脏→清洗预冷→腌制→真空包装→速冻→金检→外包装。

1.3.2 单因素试验

取规格一致、鱼体表面完好、鱼眼较清晰、鱼鳃较红、

没有明显的腐败味的鲳鱼[平均规格(100±10) g], 置于不锈钢容器中, 以氯化钠含量、蒸煮损失率、质构为评价指标, 对腌制温度(5、15、25 ℃)、腌制时间(1、2、3、4、5 h)、腌制液浓度(1%、2%、3%、4%、5%)和腌制液料液比(1:1、1:2、1:3、1:4、1:5, g:mL)进行单因素试验, 确定鲳鱼腌制工艺的适宜参数。

1.3.3　响应面优化试验

参考 Nilsang 等[29]的方法, 在单因素试验的基础上进行响应面中心组合设计, 以腌制液浓度(*A*)、腌制时间(*B*)、腌制温度(*C*) 3 因素为自变量, 以感官评分(*R*)为响应值, 进一步优化腌制鲳鱼预制菜加工工艺。各因素范围和水平的选取见表 1 所示。

1.3.4　质构测定

用纱布吸干腌制后鲳鱼表面水分, 将鲳鱼背中段剪成 2 cm×2 cm×1 cm 的方块, 平放于测量台上, 用 P/6 柱形探头进行质地剖面分析测试试验, 每组测定 3 次, 记下硬度、胶黏性、咀嚼性、弹性、内聚性。设定参数: 测试速度 60 mm/s, 触发力 0.15 N, 形变百分率 50%。

1.3.5　氯化钠含量

在齐鑫娟等[30]的基础上稍作修改, 将处理好的鲳鱼肉用均质机打碎, 每个处理组称取 5 g。肉样置于 50 mL 离心管, 加入 50 mL 蒸馏水, 搅拌均质后浸泡 2 h, 使用滤纸将上清液过滤处理, 使用盐度计进行测定, 每组样品测定 3 次, 结果取平均值。

1.3.6　蒸煮损失率

在齐鑫娟等[30]的基础上稍作修改, 将腌制好的鱼体沥干腌制液, 取鲳鱼背部肌肉, 将其切成 2 cm×2 cm×1 cm 的正方块, 置于 100 ℃沸水中隔水煮制 2 min 后, 取出沥水并冷却至室温, 准确记录蒸煮前鱼片的质量 m_1 及蒸煮后的质量 m_2, 每组样品测定 3 次, 结果取平均值。蒸煮损失率计算如公式(1):

$$X_{zz}=\frac{m_1-m_2}{m_1} \tag{1}$$

式中: X_{zz} 表示鱼肉蒸煮损失率, %; m_1 表示蒸煮前鱼肉的质量, g; m_2 表示蒸煮后鱼肉的质量, g。

1.3.7　感官评定的方法

在何晓彤等[31]的基础上稍作修改, 采用评分法对蒸熟后的腌制鲳鱼的外观色泽、滋味气味、口感、整体接受度进行综合评定, 评定标准参考表 2, 将各个指标平均分数经权重系数相乘后加和, 得出最终感官评分值。

表 1　腌制鲳鱼预制菜响应面分析因素水平表

Table 1　Factors and levels table for response surface methodology of cured ready-to-eat *Pampus argenteus*

水平	*A*: 腌制液浓度/%	*B*: 腌制时间/h	*C*: 腌制温度/℃
–1	3	2	5
0	4	3	15
1	5	4	25

表 2　腌制鲳鱼预制菜感官评分标准

Table 2　Sensory evaluation criteria for cured ready-to-eat *Pampus argenteus*

项目	评分标准	得分
外观色泽(20%)	银白色鲜亮有光泽	4~5
	稍有光泽	2~3
	颜色暗淡	0~1
滋味气味(20%)	无腥味, 香气明显, 鲜味足, 咸度适口	4~5
	无明显腥味, 香气略差, 鲜味略不足	2~3
	腥味明显, 没有明显香气	0~1
口感(30%)	肉质紧实、细嫩, 有弹性	4~5
	肉质略软或略硬	2~3
	口感太软或太柴	0~1
整体接受度(30%)	易接受	4~5
	可以接受	2~3
	不易接受	0~1

1.3.8 腌制鲳鱼肉相关成分含量的测定

粗灰分含量测定按照 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》的第一法; 水分含量测定按照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》的第一法(直接干燥法); 粗蛋白含量测定按照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》的第二法(全自动凯氏定氮法); 钠含量测定按照 GB 5009.91—2017《食品安全国家标准 食品中钾、钠的测定》的第一法(火焰原子吸收光谱法); 粗脂肪含量测定按照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》的第一法(索氏抽提法); 饱和脂肪酸含量测定按照 GB 5009.168—2023《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》的第三法(归一化法)。

1.4 数据处理

所得试验数据用 Excel 2023 汇总整理, 采用 IBM SPSS Statistics 20 软件对数据进行单因素方差分析, 采用 Duncan 检验进行显著性分析, 采用 Design-Expert 13.0.1.0 软件进行响应面试验设计和数据分析。每组样品测定 3 次, 最终结果以“平均值±标准偏差”形式表示, $P<0.05$ 表示显著性差异。

2 结果与分析

2.1 单因素试验确定工艺参数

2.1.1 腌制液浓度对鲳鱼品质的影响

在料液比为 1:5 (g:mL)、腌制时间为 3 h, 腌制温度为 15 ℃的条件下, 研究不同腌制液浓度(1%、2%、3%、4%、5%)对鲳鱼鱼肉蒸煮损失率、氯化钠含量及质构特性的影响, 结果如表 3 所示。

试验结果表 3 表明, 腌制液浓度通过调控盐分渗透与蛋白质转化, 对鱼肉的保水性和质构特性产生了复杂而规律的协同影响。随着腌制液浓度的升高, 鱼肉中氯化钠含量呈现上升趋势, 但在 4%~5%时增幅减缓。这表明在腌制液浓度为 4%时, 鱼肉的盐分吸收已接近动态平衡, 此结果符合菲克扩散定律。腌制液浓度为 1%~2%时, 所有质构参数均开始缓慢上升, 盐溶效应初步发挥作用, 肌原纤维蛋白部分溶出并水合, 形成了初步的凝胶网络基础, 在加热时能更好地保持水分, 有研究[32−33]指出, 低离子强度下肌球蛋白尾部的溶解是凝胶网络形成的关键。当腌制液浓度达到 3%时, 形成的蛋白质凝胶网状结构致密但不均匀, 导致硬度、胶黏性和咀嚼性继续提升的同时蒸煮损失率急剧飙升到 17.88%。这印证了崔莹莹等[34]的理论, 即盐浓度不当时, 肌原纤维蛋白的变性聚集会先于充分水合, 从而导致保水性下降。当腌制液浓度达到 4%时, 鱼肉的保水性最佳, 蒸煮损失率降至 10.7%。硬度变化不显著, 表明产品仍具有坚实的口感。咀嚼性和弹性也达到或接近最高水平, 这意味着产品在咀嚼时具有良好的弹性和耐嚼性, 口感上乘。当浓度升至 5%时, 虽然保水性依然很好(蒸煮损失率 10.2%), 但所有质构参数(硬度、咀嚼性)均出现下降。这通常意味着过高的盐分可能开始引起蛋白质的过度变性或“盐析”效应, 破坏了凝胶网络的细腻度, 导致质构略微变柴、松散。

因此, 从综合品质、健康诉求(减盐)和生产经济性多角度权衡, 选择 4%作为最优腌制浓度是最科学、合理的决策。本研究通过多指标关联分析, 明确了浓度变化对品质的影响机理, 为腌制鱼肉的工业化精准控制提供了理论依据。

2.1.2 腌制时间对鲳鱼品质的影响

在料液比为 1:5 (g:mL)、腌制液浓度为 4%, 腌制温度为 15 ℃的条件下, 研究不同腌制时间(1、2、3、4、5 h)对鲳鱼鱼肉的影响, 结果如表 4 所示。

试验结果揭示, 在腌制 1~2 h 内, 因鱼肉与腌制液之间的内外浓度梯度大, 驱动盐分快速向内渗透和水分向外渗透, 此时溶出的肌原纤维蛋白开始构建保水凝胶网络, 蒸煮损失率从 12.20%显著下降至 10.69% ($P<0.05$), 达到了最低点。当腌制时间到达 3 h 时, 氯化钠含量达到最大, 此时渗透-扩散很可能达到基本平衡, 然而蒸煮损失率急剧反弹, 这可能是蛋白质的变性作用开始强于盐分的有利渗透效应导致的。持续的盐离子作用和高离子强度环境可能导致肌原纤维蛋白发生过度变性或聚集, 破坏了在 2 h 时形成的、尚不稳定的凝胶网络结构, 使其持水能力下降。崔莹莹等[34]的研究指出, 过长的湿腌时间会导致肌原纤维蛋白二级结构发生变化, 巯基暴露、疏水性增强, 反而不利于水分的保持。随着腌制时间延长至 4 h 至 5 h, 氯化钠含量略有下降, 蒸煮损失率进一步升高, 可能是由于蛋白质网络的破坏持续加剧。长时间的静置和盐离子作用液导致了部分蛋白质发生降解或自溶, 进一步削弱了鱼肉的保水能力。

虽然 3 h 的蒸煮损失率(14.88%)高于 2 h (10.69%), 但其质构综合评分最高。胶黏性、咀嚼性与内聚性这 3 项指标均在 3 h 附近达到峰值。表明此时蛋白质形成的凝胶网络最为连贯、致密和稳定。这种强大的网络结构能够提供优异的咀嚼感和弹性。弹性在 2 h 至 4 h 期间都维持在较高水平, 说明在此腌制时间段内, 产品都能保持良好的弹性口感。对于许多肉制品而言, 有弹性、紧实的口感等良好的质构表现是消费者评价其品质的首要指标。本研究结果与陈小雷等[35]的研究结论一致。

因此, 从综合品质、工艺效率和生产经济性多角度权衡, 在 4%盐水浓度下, 3 h 的腌制时间能够在可接受的保水性范围内, 实现鱼肉制品最优的质构品质, 是综合平衡保水性与口感后的最佳选择。

表 3　不同腌制液浓度下质构参数、氯化钠含量和蒸煮损失率的变化

Table 3　Changes in texture parameters, sodium chloride content and cooking loss rate under different brine concentrations

分类	腌制液浓度/%				
	1	2	3	4	5
硬度/*g*	7.90±0.24^{b}	8.03±0.45^{b}	8.18±0.79^{b}	7.92±0.40^{b}	7.79±0.81^{a}
胶黏性/*g*.sec	3.43±0.09^{a}	4.18±0.04^{c}	4.16±0.04^{c}	4.17±0.03^{c}	3.99±0.01^{b}
咀嚼性/*g*	2.17±0.03^{a}	2.59±0.06^{b}	2.83±0.04^{c}	2.76±0.09^{c}	2.56±0.03^{b}
弹性/%	0.63±0.45	0.64±0.28	0.65±0.18	0.66±0.45	0.66±0.35
内聚性	0.43±0.01^{a}	0.42±0.03^{b}	0.51±0.02^{ab}	0.53±0.03^{ab}	0.47±0.01^{ab}
氯化钠含量/%	0.87±0.02^{a}	1.21±0.02^{b}	1.59±0.01^{c}	1.73±0.01^{c}	1.97±0.01^{cd}
蒸煮损失率/%	13.12±0.01^{ab}	13.07±0.02^{ab}	17.88±0.01^{b}	10.69±0.03^{a}	10.18±0.03^{a}

注: 同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 表 4~6 同。

表 4　不同腌制时间下质构参数、氯化钠含量和蒸煮损失率的变化

Table 4　Changes of texture parameters, sodium chloride content and cooking loss rate under different curing times

分类	腌制时间/h				
	1	2	3	4	5
硬度/*g*	8.36±0.16^{b}	7.93±0.40^{a}	8.16±0.38^{b}	8.23±0.47^{b}	8.34±0.42^{b}
胶黏性/*g*.sec	4.02±0.01^{a}	4.14±0.03^{a}	4.40±0.03^{b}	4.23±0.01^{ab}	4.46±0.05^{b}
咀嚼性/*g*	2.49±0.03^{a}	2.76±0.09^{b}	2.89±0.02^{b}	2.83±0.02^{b}	2.94±0.07^{b}
弹性/%	0.62±0.13	0.66±0.45	0.65±0.24	0.67±0.17	0.66±0.38
内聚性	0.48±0.02^{a}	0.53±0.03^{b}	0.54±0.01^{b}	0.51±0.01^{ab}	0.54±0.04^{b}
氯化钠含量/%	1.12±0.01^{a}	1.73±0.01^{bc}	1.78±0.02^{c}	1.73±0.01^{bc}	1.69±0.01^{b}
蒸煮损失率/%	12.20±0.01^{ab}	10.69±0.03^{a}	14.88±0.03^{ab}	13.87±0.03^{ab}	18.10±0.02^{b}

2.1.3　腌制温度对鲳鱼品质的影响

在料液比为 1:5 (g:mL)、腌制液浓度为 4%, 腌制时间为 2 h 的条件下, 研究 5、15、25 ℃对鲳鱼品质的影响, 结果如表 5 所示。

腌制温度是影响鱼肉最终品质的决定性因素之一。源于温度对肌肉蛋白质变性的影响[36–37], 5 ℃鱼肉的蒸煮损失率(15.90%)、氯化钠含量(1.36%)显著低于 25 ℃鱼肉的蒸煮损失率 20.32%、氯化钠含量 1.56% (P<0.05)。在温度较高环境下, 肌原纤维蛋白热稳定性较差, 更容易发生部分变性, 持水能力减弱。相反, 在低温下, 盐溶蛋白(主要是肌球蛋白)被缓慢、充分地萃取, 而未发生变性。在后续加热过程中, 这些天然的、功能完整的蛋白分子能够有序展开并交联, 形成一个强度高、弹性好的连续三维凝胶网络。这个网络不仅能维持住水分, 也赋予了产品坚实的硬度、良好的粘聚性和耐嚼性。而在 25 ℃下, 部分变性的蛋白质分子无法进行有效的有序交联, 形成的凝胶网络脆弱且不连续, 从而导致产品质构软烂、缺乏嚼劲。低温腌制还能有效抑制微生物生长, 确保腌制过程的卫生与安全。Xiong 等[38]证实低温腌制能更好地维持肌原纤维蛋白的完整性, 降低烹饪损失, 并有效抑制微生物生长。

因此, 在腌制工艺中, 采用适宜的低温环境是获得高品质、安全稳定腌制鱼肉的必备条件, 这一结论为工业化生产中必须配备冷链腌制环节提供了直接且有力的科学依据。基于此次试验, 从综合品质、工业化生产等角度考虑, 推荐腌制温度为 15 ℃, 既能在一定程度上加快盐分对鱼肉的渗透作用、改善肉质口感、增加咸味, 又能减缓鱼肉腐败变质、确保卫生与安全。

2.1.4　料液比对鲳鱼品质的影响

在腌制时间为 2 h、腌制温度为 15 ℃、腌制液浓度为 4%的条件下, 研究不同料液比(1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, g:mL)对鲳鱼品质的影响, 结果见表 6。

数据显示, 料液比在 1:2 至 1:5 的范围内条件下, 鱼肉中的氯化钠含量稳定在 1.75%±0.3%的范围内。这表明即使在最低的料液比(1:1, g:mL)下, 腌制液中的盐分也足以在 3 h 内使鱼肉中的盐浓度达到近饱和状态, 料液比的变化对鱼肉的最终品质未产生显著且规律性的影响。其根本原因在于, 盐分的渗透是一个由浓度梯度驱动的扩散过程。当腌制液体积足够覆盖原料并提供一个稳定的盐分来源时, 进一步增大液体体积对浓度梯度的提升效应会急剧减弱。Barat 等[39]通过建立鳕鱼腌制的数学模型, 明确指出盐水浓度与时间是控制盐分渗透的主导变量, 其模型本身即蕴含了料液比非敏感参数的结论。Andreetta-Gorelkina 等[40]在优

表 5 不同腌制温度下质构参数、氯化钠含量和蒸煮损失率的变化情况

Table 5 Changes of textural parameters, sodium chloride content and cooking loss rate at different curing temperatures

分类	腌制温度/℃		
	5	15	25
硬度/*g*	8.54±1.06^{b}	7.93±0.23^{a}	8.16±0.52^{a}
胶黏性/*g*.sec	3.04±0.21^{a}	4.07±0.12^{b}	5.70±0.16^{c}
咀嚼性/*g*	4.18±0.08^{b}	2.76±0.09^{a}	4.32±0.08^{b}
弹性/%	0.70±0.35	0.66±0.45	0.67±0.53
内聚性	0.21±0.01	0.21±0.01	0.21±0.02
氯化钠含量/%	1.36±0.03^{a}	1.73±0.04^{c}	1.56±0.01^{b}
蒸煮损失率/%	15.90±0.50^{b}	10.69±0.55^{a}	20.32±0.25^{c}

化鲱鱼片腌制工艺时，其响应面分析结果也再次验证，料液比的效应远不及其他关键参数。在腌制液浓度为 4%，腌制为 2 h 条件下，料液比在 1:2 至 1:5 的范围内对腌制鱼肉的氯化钠含量、蒸煮损失率均未产生显著且规律性的影响。此结论与 Barat 等[39]一致。

基于以上分析，从经济效益、环保和工业化生产角度出发，推荐料液比为 1:2 (g:mL)至 1:3 (g:mL)，确保盐分均匀、充分渗透的同时，又大大减少了废水排放和原料成本。

2.2 响应面试验优化腌制工艺

2.2.1 响应面试验结果

经过单因素试验确定料液比对腌制效果影响不大，从试验操作便捷和试验成本考虑，固定腌制料液比为 1:3 (g:mL)，以腌制液浓度、腌制温度、腌制时间 3 个因素为自变量，以感官评分为响应值，根据 Box-Behnken 试验设计原理进行响应面试验，确定腌制鲳鱼的最佳配方及工艺，试验结果见表 7。

2.2.2 模型建立与方差分析

利用软件 Design Expert V 13.0.1 进行多元回归拟合，得到回归模型方程：Y=4.156+0.16A–0.2025B–0.19C+0.3225AB–0.0625AC+0.2375BC–0.44675A^2–0.54175B^2–0.32175C^2，回归方程的方差分析结果见表 8。试验所选模型的决定系数 R^2=0.9519，调整决定系数 $R_{Adj}{}^2$=0.8900，模型 P=0.0008，表明该回归模型极显著；失拟项 P 为 0.1604>0.05，失拟项不显著，方程拟合度高。变异系数为 4.96%，变异系数越小，精确度越高，试验可靠性越强。可用此模型预测腌制液浓度、腌制时间、腌制温度对感官评分的影响。模型中，AB、A^2、B^2、C^2 对感官评分的影响极显著(P<0.01)，而 A、B、C、BC 对感官评分的影响显著(P<0.05)。由表 8 可知，F(A)=6.64，F(B)=10.64，F(C)=9.37，即各因素对腌制鲳鱼感官评分的影响顺序为：腌制时间>腌制温度>腌制液浓度。

2.2.3 响应面分析

根据 Design Expert 13.0.1.0 软件对腌制液浓度、腌制时间、腌制温度这 3 个因素进行响应面分析，得到两两因素交互作用对感官评分的响应曲面图。通过对响应面模型的等高线图及 3D 图的分析，可以直观呈现各因素交互作用对响应值的影响。从响应面的最高点和等值线可以看出，在所选的范围内存在极值，既是响应面的最高点，同时也是等值线最小椭圆的中心点。当等高线图为明显的椭圆，且曲面坡度越陡，各因素间交互作用就越显著。图 1A~C 的等高线图呈现明显的椭圆，表明腌制液浓度与腌制时间、腌制温度和腌制时间之间交互作用显著，对腌制鲳鱼的感官评分影响较大；而图 1B 呈现圆形，表明腌制温度与腌制液浓度交互作用不显著，对腌制鲳鱼的感官评分影响较小。这一结论与方差结果一致。

表 6 不同料液比下质构参数、氯化钠含量和蒸煮损失率的变化

Table 6 Changes of textural parameters, sodium chloride content and cooking loss rate under different solid-to-liquid ratio

分类	料液比(g:mL)				
	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
硬度/*g*	7.87±0.12^{ab}	8.41±0.40^{b}	7.93±0.01^{ab}	7.70±0.31^{a}	7.93±0.40^{ab}
胶黏性/*g*.sec	4.07±0.04	4.20±0.02	3.90±0.03	3.36±0.06	4.14±0.03
咀嚼性/*g*	2.42±0.03^{ab}	2.84±0.03^{b}	2.35±0.04^{ab}	1.92±0.04^{a}	2.76±0.09^{b}
弹性/%	0.59±0.27^{ab}	0.68±0.13^{c}	0.60±0.30^{ab}	0.57±0.30^{a}	0.66±0.45^{bc}
内聚性	0.52±0.01^{b}	0.50±0.01^{ab}	0.49±0.02^{ab}	0.44±0.02^{a}	0.53±0.03^{ab}
氯化钠含量/%	1.36±0.02^{a}	1.78±0.01^{b}	1.74±0.03^{b}	1.77±0.02^{b}	1.73±0.01^{b}
蒸煮损失率/%	20.13±0.04^{ab}	16.40±0.08^{ab}	13.26±0.01^{ab}	16.34±0.05^{ab}	10.69±0.03^{b}

表 7 响应面试验结果

Table 7　Results of response surface methodology experiment

序号	*A*: 腌制液浓度/%	*B*: 腌制时间/h	*C*: 腌制温度/℃	感官评分
1	3	2	15	3.35
2	5	2	15	3.27
3	3	4	15	2.42
4	5	4	15	3.63
5	3	3	5	3.48
6	5	3	5	3.68
7	3	3	25	3.22
8	5	3	25	3.17
9	4	2	5	3.98
10	4	4	5	2.98
11	4	2	25	3.13
12	4	4	25	3.08
13	4	3	15	4.34
14	4	3	15	4.14
15	4	3	15	4.22
16	4	3	15	4.01
17	4	3	15	4.07

表 8　响应面试验相关性分析

Table 8　Correlation analysis of surface methodology experiment

来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著性
模式	4.27	9	0.4744	15.39	0.0008	**
A	0.2048	1	0.2048	6.64	0.0366	*
B	0.3280	1	0.3280	10.64	0.0138	*
C	0.2888	1	0.2888	9.37	0.0183	*
AB	0.4160	1	0.4160	13.49	0.0079	**
AC	0.0156	1	0.0156	0.5068	0.4996	
BC	0.2256	1	0.2256	7.32	0.0304	*
A^2	0.8404	1	0.8404	27.26	0.0012	**
B^2	1.24	1	1.24	40.08	0.0004	**
C^2	0.4359	1	0.4359	14.14	0.0071	**
残差	0.2158	7	0.0308			
失拟	0.1489	3	0.0496	2.97	0.1604	
净误差	0.0669	4	0.0167			
总和	4.49	16				

注: **表示具有极显著性差异(P<0.01), *表示具有显著性差异(P<0.05)。

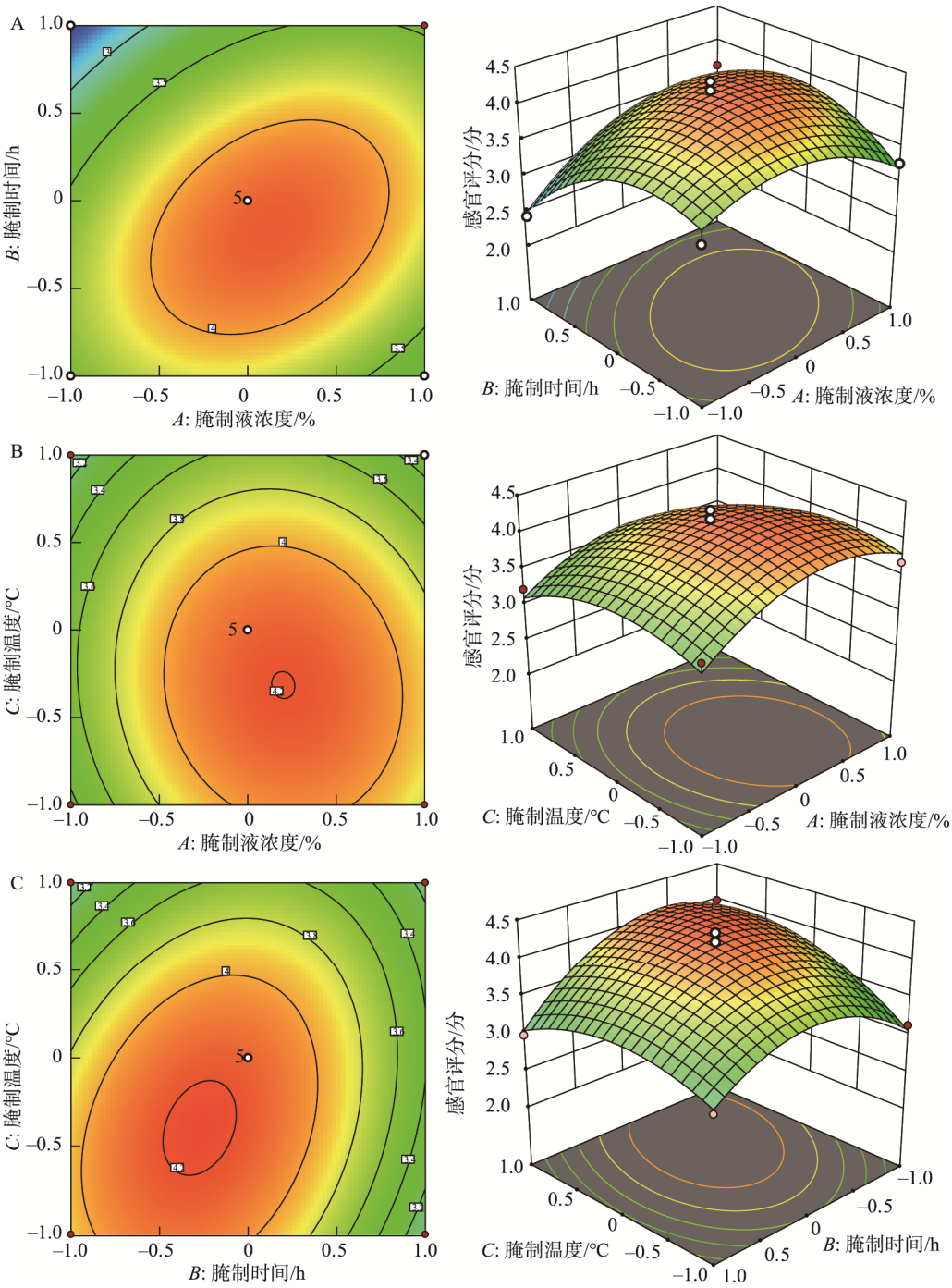


图 1 腌制液浓度、腌制时间、腌制温度对感官评分的交互作用分析

Fig.1 Analysis of interaction effects of brine concentration, curing time and curing temperature on sensory score

2.3 最佳工艺条件的确定及验证

根据优化后的回归方程代入分析可知，当腌制液浓度 4.2%、腌制时间 2.75 h、腌制温度 14 ℃时。腌制所得的鲳鱼鱼肉的感官评分最高，理论值为 4.195。由于仪器参数限制及方便操作，在软件给出的最佳参数上进行调整，选取腌制液浓度 4.2%、腌制时间 2.75 h、腌制温度 15 ℃±1 ℃。

在此工艺条件，对鲳鱼进行腌制验证试验。试验重复 3 次进行验证，得到腌制鲳鱼预制菜的感官评分为 4.2，接近理论值 4.195，证明试验值与理论值基本吻合，表明响应面试验 Design Expert 13.0.1.0 设计模型优化的结果可行，预测准确。

2.4 产品的营养成分

本研究所确定的优化腌制工艺(浓度 4.2%，时间 2.75 h，温度 15 ℃ ± 1 ℃)，在显著提升鱼肉水分含量(水分含量从 74.6 g/100 g 增至 80.1 g/100 g)的同时，对产品的基本营养

成分影响不大。灰分从 2.2 g/100 g 增加至 2.5 g/100 g, 增幅较小。灰分代表食品中的无机矿物质总量, 此变化主要来源于腌制液中食盐(氯化钠)的渗入。钠含量从 0.0625 g/100 g 大幅提升至 0.648 g/100 g。这明确证实了盐分的成功渗透, 是腌制工艺的必然结果。尽管绝对值增长明显, 但通过计算可知, 每 100 g 腌制鱼肉约含 0.648 g 钠, 换算成盐含量约为 1.65 g, 仍处于可控范围, 为开发“减钠”或“适中钠”产品提供了基础。粗蛋白含量从 17.0 g/100 g 略微下降至 16.4 g/100 g。这主要是由于水分含量的显著增加产生的“稀释效应”。优化的温和工艺条件有效避免了对蛋白质的剧烈破坏或过度溶出流失, 最大程度地保留了鱼肉的营养价值。粗脂肪与饱和脂肪均呈现轻微下降趋势, 这可能源于腌制过程中有极少量的脂质发生水解或随水分轻微迁移。这种变化不仅不显著, 反而可能被视为一种积极的微调整, 使得产品在保留风味的同时, 脂肪含量略有降低。

因此, 该优化工艺成功实现了品质提升与营养保留的平衡, 验证了其工业化应用的价值, 为生产高品质的腌制鱼肉制品提供了可靠的数据支持和理论依据。

3　结　论

本研究通过系统的单因素试验与响应面法, 成功优化了鲳鱼的腌制工艺, 证实了低温腌制的安全性优势, 并对其品质与营养进行了综合评估。通过模型优化与验证, 确定了最佳工艺参数为: 腌制液浓度 4.2%、腌制时间 2.75 h、腌制温度 15 ℃±1 ℃。在此条件下, 产品核心营养成分粗蛋白与粗脂肪得到了良好保留, 表明该工艺稳定、可靠, 不仅能生产出品相佳、口感好的产品, 而且对产品的基本营养组成无负面影响, 具有良好的工业化应用潜力。未来可开展系统的贮藏试验, 监测在不同贮藏条件下产品的微生物指标(菌落总数、致病菌)、化学指标变化, 明确优化工艺产品的货架期, 为其商业化包装与储运提供数据支持。

参考文献

[1] 赵峰, 庄平, 施兆鸿, 等. 中国鲳成鱼和幼鱼肌肉生化成分的比较分析[J]. 海洋渔业, 2010, 32(1): 102–108.
Zhao Feng, Zhuang Ping, Shi Zhaohong, et al. Comparative analysis on biological components of muscles in young and adult *Pampus chinensis* [J]. Marine Fisheries, 2010, 32(1): 102–108.

[2] 刁全平, 郭华, 吕琳琳, 等. 银鲳鱼脂肪酸的气相色谱-质谱分析[J]. 鞍山师范学院学报, 2015, 17(6): 51–53.
Diao Quanping, Guo Hua, Lv Linlin, et al. Study on fatty acid in *Pampus argenteus* [J]. Journal of Anshan Normal University, 2015, 17(6): 51–53.

[3] 彭士明, 孙鹏, 尹飞, 等. 银鲳与翎鲳肌肉必需氨基酸组成模式的比较分析[J]. 海洋渔业, 2010, 32(4): 435–439.
Peng Shiming, Sun Peng, Yin Fei, et al. Comparative analysis on the composition pattern of essential amino acids in muscle of *Pampus argenteus* and *Pampus punctatissimus* [J]. Marine Fisheries, 2010, 32(4): 435–439.

[4] 庄海旗, 刘江琴, 钟宇, 等. 9 种野生鲳鱼肌肉脂肪酸组成与分析[J]. 福建农业学报, 2019, 34(10): 1129–1136.
Zhuang Haiqi, Liu Jiangqin, Zhong Yu, et al. Comparison of fatty acids in muscles of 9 species of wild white Pomfret [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(10): 1129–1136.

[5] 赵峰, 宋超, 施兆鸿, 等. 野生银鲳幼鱼主要营养成分的测定与评价[J]. 营养学报, 2008, 30(4): 425–426.
Zhao Feng, Song Chao, Shi Zhihong, et al. Analysis and evaluation of the nutritional components of wild young silver pomfret *Pampus argenteus* [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2008, 30(4): 425–426.

[6] 徐善良, 王丹丽, 徐继林, 等. 东海银鲳(*Pampus argenteus*)、灰鲳(*P. cinereus*)和中国鲳(*P. sinensis*)肌肉主要营养成分分析与评价[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(4): 775–782.
Xu Shanliang, Wang Danli, Xu Jilin, et al. Analysis and evaluation of nutritional components in muscle of *Pampus Argenteus*, *P. Cinereus* and *P. sinensis* from the east china sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(4): 775–782.

[7] 梁释介, 孙晓悦, 李晴, 等. 预冻后冻藏温度对金鲳鱼品质的影响[J]. 肉类研究, 2023, 37(11): 28–34.
Liang Shijie, Sun Xiaoyue, Li Qing, et al. Effect of frozen storage temperature on the quality of pre-frozen golden pomfret [J]. Meat Research, 2023, 37 (11): 28–34.

[8] 司徒慧媛, 李玉梅, 高加龙, 等. 模拟冷链流通中温度波动对养殖金鲳鱼鱼肉品质及微生物多样性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(5): 148–159.
Situ Huiyuan, Li Yumei, Gao Jialong, et al. Effect of temperature fluctuation during simulated cold chain circulation on meat quality and microbial diversity of cultured *Trachinotus ovatus* [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(5): 148–159.

[9] 杜宇凡. 低盐腌制对冷冻罗非鱼肉品质的影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 2–7.
Du Yufan. Effects of light salting on the quality of frozen Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) fillts [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 2–7.

[10] 陈娇娇, 蒋爱民. 腌制工艺对风味罗非鱼制品品质的影响[J]. 现代食品科技, 2012, 28(7): 1128–1132.
Chen Jiaojiao, Jiang Aimin. Analysis of aroma components of Korla pear [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(7): 1128–1132.

[11] 吴凯鑫, 吴俊杰, 郭全友, 等. 腌制浓度和干燥时间对轻腌金鲳鱼的品质与细菌多样性的影响[J/OL]. 食品工业科技, 2025-09-26. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025050105.
Wu Kaixin, Wu Junjie, Guo Quanyou, et al. Effects of different salt concentrations and drying times on the quality and bacterial diversity of lightly-salted golden pomfret [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025-09-26. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025050105.

[12] 章建设, 田迎新, 谢燕, 等. 水产品预制菜全产业链标准体系构建研究——以湛江国联水产开发股份有限公司烤鱼产品为例[J]. 中国标准化, 2024(22): 107–112.
Zhang Jianshe, Tian Yingxin, Xie Yan, et al. Research on construction standards system of the whole aquaticprepared dishes industry chain taking the Grilled Fish products of Zhanjiang Guolian Aquatic Product Development Co., Ltd. as an example [J]. China Standardization, 2024(22): 107–112.

[13] 韩刚. 发展新质生产力做好新时期水产技术推广工作推进渔业高质量发展[J]. 中国水产, 2025(7): 17–23.
Han Gang. Advancing high-quality fisheries development through new quality productive forces in aquaculture extension [J]. China Fisheries, 2025(7): 17–23.

[14] 孙敬明, 段金荣, 袁媛. 大食物观背景下水产品预制菜产业发展战略分析[J]. 渔业信息与战略, 2023, 38(1): 8–15.
Sun Jingming, Duan Jinrong, Yuan Yuan. Development strategy of pre-made aquatic food industry under the background of “Big Food

Concept" [J]. Fishery Information & Strategy, 2023, 38(1): 8–15.

[15] 邹小欠, 杜传来, 王忻宇, 等. 不同腌制工艺对臭鳜鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 28–35.
Zhou Xiaoqian, Du Chuanlai, Wang Qiyu, et al. Effects of different curing methods on the quality of stinky mandarin fish [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 28–35.

[16] 张园园, 亢庄庄, 刘畅, 等. 不同腌制方式对预制白条鱼肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2024, 38(11): 23–27.
Zahng Yuanyuan, Kang Zhuangzhuang, Liu Chang, et al. Effects of different curing methods on the quality of prepared Sharpbelly [J]. Meat Research, 2024, 38(11): 23–27.

[17] Fu Z, Zhang Y, Yao Y, et al. Effects of freezing and radio frequency tempering on quality characteristics of marinated yellow-fin tuna (*Thunnus albacares*) [J]. Food & Bioprocess Technology, 2025, 18(1). https://doi.org/10.1007/s11947-024-03493-y.

[18] Rahman Z, Zhang Y, Tabasum A, et al. Changes in physicochemical properties of snakehead fish slices incorporated with nano fish bones during freeze-thaw cycles: effects of marinating methods [J]. Food Chemistry, 2025, 474. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2025.143215.

[19] 徐馨甜, 黄辉, 戴助, 等. 腌制鱼摄入与鼻咽癌发病风险的剂量反应 Meta 分析[J]. 现代预防医学, 2021, 48(16): 3000–3004.
Xu Xintian, Huang Hui, Dai Zhu, et al. Salted fish intake and dose-response risk of nasopharyngeal carcinoma: a meta-analysis [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(16): 3000–3004.

[20] 白恒丽, 李来好, 吴燕燕, 等. 基于超声联合滚揉腌制改善低盐预制调理海鲈鱼品质特性[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 161–171.
Bai Hengli, Li Laihao, Wu Yanyan, et al. Use of ultrasonic treatment combined with tumbling curing to improve quality characteristics of low-salt pre-prepared sea bass [J]. Food Science, 2024, 45(14): 161–171.

[21] 许志平, 何晓彤, 邓旗, 等. 腌制时间对低钠盐腌制红鳍笛鲷鱼干感官及质构品质的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(6): 129–137.
Xu Zhiping, He Xiaotong, Deng Qi, et al. Effect of salting time on sensory and texture quality of dried low-sodium-salted *Lutianus erythropterus* [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(6): 129–137.

[22] 何雄, 周静峰, 孙金才, 等. 翘嘴红鲌肉腌制工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(8): 1847–1852.
He Xiong, Zhou Jingfeng, Sun Jincai, et al. Optimization of curing process of *Erythroculter ilishaeformis* meat [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(8): 1847–1852.

[23] 薛娟萍, 彭定蓉, 黄华天, 等. 响应面法优化红小糯高粱曲奇饼干工艺研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 295–300.
Xue Juanping, Peng Dingrong, Huang Huatian, et al. Study on the optimization of the process of red glutinous sorghum cookies by response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 295–300.

[24] 齐思源, 何纪元, 艾永亮, 等. 响应面法优化扇贝海鲜汁冷冻浓缩工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(20): 86–93.
Qi Siyuan, He Jiyuan, Ai Yongliang, et al. Optimization of the freeze concentration process for scallop-derived seafood juice by response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(20): 86–93.

[25] Corzo O, Bracho N. Shrinkage of osmotically dehydrated sardine sheets at changing moisture contents [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(3): 333–339

[26] Xiangli Fenjuan, Wei Wang, Chen Yiwei, et al. Optimization of preparation conditions for polydimethylsiloxane (PDMS)/ceramic composite pervaporation membranes using response surface methodology [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 311(1-2): 23–33.

[27] Hazbawi I, Jahanbakhshi A, Sepehr B, et al. Optimization of melatonin treatments using response surface methodology (RSM) to waste control, increase quality and shelf-life of mulberry fruit in the postharvest stage [J]. LWT, 2025, 228: 118044.

[28] Gozali M, Julinar, Fanani Z, et al. Response surface methodology to optimize laccase produced from *Pleurotus ostreatus* Using corn cob and rice bran as substrate [J]. Molekul: Jurnal Ilmiah Kimia Molekul, 2025, 20(1). https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118044.

[29] Nilsang S, Lertsiri S, Suphantharika M, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of fish soluble concentrate by commercial proteases [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 70(4): 571–578.

[30] 齐鑫娟, 尹明雨, 张龙, 等. 不同浓度 NaCl 及 TGase 腌制液对乌鳢鱼片的影响[J]. 现代食品, 2024, 30(11): 155–158.
Qi Xinjuan, Yin Mingyu, Zhang Long, et al. Effects of different concentrations of NaCl and TGase pickles on fish fillets of *Channa argus* [J]. Modern Food, 2024, 30(11): 155–158.

[31] 何晓彤, 许志平, 邓旗, 等. 基于模糊数学评价法优化低钠盐腌制即食红鱼片工艺[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(4): 118–126.
He Xiaotong, Xu Zhiping, Deng Qi, et al. Optimization of low sodium salt curing for instant *Lutjanus sanguineus* fillets based on fuzzy mathematics evaluation [J]. Food Research and Development, 2024, 45(4): 118–126.

[32] 齐晓辉. 肉蛋白在碎肉制品中的机能特性——盐溶性蛋白的机能决定肉制品的最终特性[J]. 肉类研究, 1989(2): 1–4.
Qi Xiaohui. Functional properties of meat proteins in comminuted products: the role of salt-soluble proteins in determining final product characteristics [J]. Meat Research, 1989(2): 1–4.

[33] 程婉莉. 低盐条件下碳酸氢钠对猪肌球蛋白聚集及其凝胶特性的影响[D]. 新乡: 河南科技学院, 2025: 43–59.
Cheng Wanli. Effect of sodium bicarbonate on pork myosin aggregation and its gel properties under low-salt conditions [D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2025: 43–59.

[34] 崔莹莹, 杨铭铎, 李想, 等. 食盐浓度和腌制时间对猪肉渗透动力学及品质的影响[J]. 扬州大学烹饪学报, 2020, 37(2): 41–47.
Cui Yingying, Yang Mingze, Li Xiang, et al. Effects of salt concentration and time on curing osmotic kinetics and quality of pork [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2020, 37(2): 41–47.

[35] 陈小雷, 胡王, 李海洋, 等. 响应面法优化封鳊鱼腌制工艺条件[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2015, 30(6): 859–867.
Chen Xiaolei, Hu Wang, Li Haiyang, et al. Optimization of Salting technology for Bream by response surface method [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2015, 30(6): 859–867.

[36] 曹湛慧, 黄和, 陈良, 等. 加工工艺对金鲳鱼鱼糜制品凝胶强度的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(7): 37–40.
Huang Zhanhui, Huang He, Chen Liang, et al. Effect of processing technology on surimi products gel strength of frozen ovate pompano *Trachinotus ovatus* [J]. The Food Industry, 2015, 36(7): 37–40.

[37] 余璐涵. 鱼糜低温条件下加工品质的变化规律及抗冻抗氧化调控研究[D]. 福州: 福州大学, 2022: 18–30, 37–48.
Yu Luhan. Study on changes of processing quality and regulation of antifreeze and antioxidation of surimi at low temperature [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2022: 18–30, 37–48.

[38] Xiong Nana, Wang Meina, Zhang Hanping, et al. Sintering behavior and effect of silver nanoparticles on the resistivity of electrically conductive adhesives composed of silver flakes [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2014, 28(24): 2402–2415.

[39] Barat J M, Gallart J L, Andres A, et al. Influence of cod freshness on the salting, drying and desalting stages [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(1): 9–19.

[40] Andreetta-Gorelkina I V, Gorelkin I V, Rustad T, et al. Determination of apparent diffusion coefficient in balls made from haddock mince during brining [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 175: 8–14

(责任编辑: 曹岱琳 蔡世佳)