刘海燕, 高文喻, 李雅欣, 等. 鱼糕冻干配方优化及品质、货架期分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 292−302. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030057

LIU Haiyan, GAO Wenyu, LI Yaxin, et al. Optimization of Freeze-dried Fish Cake Formulation and Analysis of Quality and Shelf Life[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 292−302. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030057

· 工艺技术 ·

鱼糕冻干配方优化及品质、货架期分析

刘海燕[1], 高文喻[1], 李雅欣[1], 艾　娜[1], 雷生姣[1,2,*]

（1.三峡大学生物与制药学院, 湖北宜昌 443002;
2.天然产物研究与利用湖北省重点实验室（三峡大学）, 湖北宜昌 443002）

摘　要: 针对传统鱼糕货架期短、运输条件苛刻、食用方法单一等问题，本研究通过配方优化与真空冷冻干燥技术开发新型鱼糕产品，旨在延长其保质期、提升营养均衡性并拓展即食化、多场景应用潜力，同时为水产制品的工业化加工提供工艺参考。以鲢鱼为主要原料，基于层次分析-熵权法构建综合评分模型，选择猪肥肉、鸡肉、玉米淀粉和蛋清添加量进行单因素实验，并在单因素实验基础上通过遗传算法结合 Box-Behnken 响应面法对鱼糕冻干配方进行优化。通过扫描电子显微镜（scanning electron microscopy，SEM）分析微观结构，测定蛋白质、脂肪、水分、灰分等理化指标，并基于 Arrhenius 方程预测货架期。确定了鱼糕冻干最优配方为：相对碎鱼肉用量，猪肥肉添加量 10%（质量分数），鸡肉添加量 20%，玉米淀粉添加量 11%，蛋清添加量 8%，综合评分达 0.87±0.34。微观结构显示孔隙分布均匀，真空冷冻干燥处理前后关键理化指标无显著变化。基于 Arrhenius 方程的货架期模型预测 25 ℃ 贮藏期为 77 d，较鲜切鱼糕（4~7 d）延长 11 倍。本研究得到了色泽均匀、口感酥脆、货架期长以及营养均衡的鱼糕冻干制品，为鱼糕制品常温储运与即食化应用提供借鉴。

关键词: 鱼糕冻干, 配方优化, 综合评分, 层次分析法, 熵权法, 遗传算法
中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0292−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030057
本文网刊:

Optimization of Freeze-dried Fish Cake Formulation and Analysis of Quality and Shelf Life

LIU Haiyan[1], GAO Wenyu[1], LI Yaxin[1], AI Na[1], LEI Shengjiao[1,2,*]

（1.College of Biological & Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2.Hubei Key Laboratory of Natural Products Research and Development (China Three Gorges University), Yichang 443002, China）

Abstract: This study addresses the limitations of traditional fish cake, including its short shelf life, stringent transportation conditions, and limited eating methods. By optimizing the formulation and applying vacuum freeze-drying technology, a novel fish cake product was developed. This innovation aims to extend shelf life, enhance nutritional balance, and facilitate ready-to-eat and multi-scenario applications. It also provides a technological reference for the industrial processing of aquatic products. Using silver carp as the primary raw material, we constructed a comprehensive scoring model based on the analytic hierarchy process (AHP) combined with the entropy weight method (EWM). Single-factor experiments were conducted to determine optimal addition levels of pork fat, chicken, corn starch, and egg white. These results informed the subsequent optimization of the freeze-dried fish cake formulation using a genetic algorithm in conjunction with the Box-Behnken response surface methodology. Microstructural analysis was performed using scanning electron microscopy (SEM), and physicochemical properties—including protein, fat, moisture, and ash content were measured. Shelf life was estimated using the Arrhenius equation. The optimal formulation (relative to minced fish) consisted of 10% pork fat, 20%

收稿日期: 2025−03−07
基金项目: 湖北省重点研发科技项目（2023BBB167）。
作者简介: 刘海燕（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物化学, E-mail: 2459827913@qq.com。
*** 通信作者:** 雷生姣（1975−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品生物技术与生物催化剂, E-mail: leishengjiao@163.com。

chicken, 11% corn starch, and 8% egg white (by mass), achieving a comprehensive score of 0.87±0.34. SEM imaging revealed a uniform pore distribution, and there were no significant changes in the key physicochemical indices following the vacuum freeze-drying treatment. The Arrhenius equation-based shelf-life model predicted a storage life of 77 days at 25 ℃, an 11-fold increase over the 4~7 day shelf life of fresh-cut fish cake. This study successfully produced freeze-dried fish cake with uniform color, crispy texture, a long shelf life and balanced nutrition, offering a reference for the ambient storage, transportation and ready-to-eat application of fish cake products.

Key words: freeze-dried fish cake; formulation optimization; comprehensive score; analytic hierarchy process; entropy weight method; genetic algorithm

鱼糕是我国一种品质上乘的传统鱼糜制品。鱼糕产品是以鱼肉为主要原料，加入适量的猪肉、鸡蛋等辅料，通过搅拌和蒸煮等工艺制作而成[1]。鱼糕的特色不仅在于充分保留了鱼肉的营养价值，口感柔软且具有弹性，并且去除了鱼腥味，具有独特的风味[2]。鱼糕含有可溶性蛋白质较多，肌肉结缔组织、脂肪较少，易于消化吸收[3]，但富含蛋白质也导致其极易腐败变质，鲜切鱼糕比冷冻鱼糕更容易被污染，货架期短且不耐储存，极大制约了鱼糕及鱼糜制品的发展。

真空冷冻干燥技术，亦称为冻干技术，是一种高效的物料干燥手段，在食品、医药、农业等多个领域有着广泛的应用[4]。该技术先将含水的物料在低温下冻结，再在真空环境中将冻结的水分直接从固态转变为气态，实现物料的脱水干燥。经过冻干处理的物料会变得松散多孔、质量轻、体积略有减小[5]。由于整个干燥过程都在真空和低温条件下进行，物料的形态、色泽、风味、香气以及原有的活性成分都能得到很好地保持[6]。此外，真空冷冻干燥技术能够去除物料中超过 90% 的水分，极大的降低储运成本。目前，该技术已经在水产品加工中得到了广泛的应用。牛改改等[7] 基于变异系数权重法对鼓风干燥、真空干燥和真空冷冻干燥处理的牡蛎进行了各项指标变化评分。试验结果显示，真空冷冻干燥牡蛎干品质最佳，可较好保留牡蛎的色泽、风味及营养成分。阙婷婷等[8] 以常规热风干燥为空白对照，研究真空微波干燥和真空冷冻干燥技术对鱼糜干制品品质的影响，发现真空冷冻干燥鱼糜效果最好，其处理样品的水分含量低，白度高，吸水指数高，水溶解指数低，复水性能好。林丰等[9] 通过感官评定并经电子鼻及 GC-MS 测定比较了南极磷虾制品三种干燥方式，发现真空冷冻干燥更好地保存了南极磷虾原有的蛋白质和脂肪，且色泽好，有独特的风味，所含风味物质更接近原虾。

因此，本研究以鲢鱼为主要原料，基于层次分析-熵权法构建品质指标（水分、复水比、白度、脆度）的综合评分模型，探究猪肥肉、鸡肉、玉米淀粉和蛋清添加量对鱼糕冻干产品综合评分的影响，在单因素实验基础上，通过响应面法结合遗传算法优化鱼糕冻干制品配方，旨在提升鱼糕冻干制品品质特性，延长制品的保质期，丰富鱼糕制品的品类。研究中采用的评价方法可为鱼糕制品的产业化发展提供借鉴，获得的冻干制品可作为烹饪的主辅料，也可作为户外/野外活动的方便副食品。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鱼糕、鲢鱼（*Hypophthalmichthys molitrix*）、草鱼（*Ctenopharyngodon idella*）、鲫鱼（*Carassius auratus*）、鳊鱼（*Parabramis pekinensis*）、鳙鱼（*Aristichthys nobilis*）、猪肥肉、鸡胸脯肉及其他辅料　均购于本地农贸市场；原、辅料新鲜，无霉变和腐烂，无杂质；石油醚（沸程为 30~60 ℃）、乙酸镁、浓盐酸、硫酸铵、硫酸等　均为 AR 分析纯，购于天津市富于精细化工有限公司。

KQ5200E 超声清洗机　昆山市超声仪器有限公司；SHB-Ⅲ循环水式真空泵　长沙明杰仪器有限公司；DK-Sl2 电热恒温水浴锅　上海森信实验仪器有限公司；ME204E 电子天平　梅特勒-托利多仪器上海有限公司；DSH-7 真空冷冻干燥机　北京博医康实验仪器有限公司；SX_2-8-13 箱式电阻炉　金坛区荣华仪器制造有限公司；YHG-500-BS-Ⅱ远红外快速恒温干燥箱　上海跃进医疗器械有限公司；K1100 全自动凯氏定氮仪、SH220F 石墨消解仪　山东海能仪器有限公司；LG10-2.4A 离心机　上海安亭科学仪器厂；JSM-7500F 扫描电子显微镜 SEM　日本电子公司（JEOL）；TA.XT Plus 质构仪　英国 Stable Micro Systems 公司；SPSIC WSC-S 型测色色差计　上海精密科学仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　鱼糕制备工艺流程和操作要点　新鲜鲢鱼→去鳞解剖→清洗→采肉→漂洗→离心脱水→擂溃（斩拌）→调味及调色→铺板成型→蒸煮→冷却→切片→预冻→真空冷冻干燥→成品。

原料前处理：新鲜鲢鱼首先去鳞、去头、去内脏，再用清水（温度 10 ℃ 以下）反复清洗，以清除腹腔内的剩余内脏、黑膜、血污，沥干水分，备用。

采肉：沿背部中线将鲢鱼一分为二，去皮、鱼刺和红肉，从两片鱼肉上手工获取白色鱼肉。

漂洗与脱水：将鱼肉放入盆中，加入 5 倍的清水（温度 10 ℃ 以下）漂洗 30 min，反复漂洗，直至水澄清。漂洗完毕将鲢鱼肉于 5000 r/min 离心脱水 10 min。

部分辅料处理：猪肥肉切成丁块状，用绞肉机绞

成糊状备用；鸡胸脯肉浸泡除去血水，沥干表面水分，用绞肉机绞成糊状备用；将生姜去皮切块、葱白切段、大蒜剥皮，用绞肉机打浆备用。

擂溃及调色、调味：将处理好的鲢鱼肉放入斩拌机内空擂 5 min，再加入处理好的猪肥肉和鸡肉一起斩拌，待鱼糜发黏时，将鸡蛋清、白砂糖、味精、葱、姜、蒜等调味料放入斩拌机中继续斩拌至浆体发亮、均匀即可，最后加入玉米淀粉，搅拌均匀（基本配方：白砂糖 2%，葱白 1%，生姜 0.5%，大蒜 0.5%，味精 0.5%，水 15%）。

成型：在模具底部铺一层纱布，将斩拌后的鲢鱼鱼糜立即装入模具中，表面抹平，等待成型。

蒸煮：将成型后的鱼肉于 100 ℃ 蒸煮 15 min，用一块干净的纱布擦干鲢鱼鱼糕表面水分，用刷子将蛋黄液均匀地涂抹在鱼糕表面，继续蒸煮 5 min。

冷却、预冻：将制作好的鱼糕放在凉架上，待其自然冷却后切成长 7 cm 宽 5 cm 厚 6 mm 的片状，放入−20 ℃ 冰箱速冻 4 h。

干燥、包装：将预冻后的鱼糕进行真空冷冻干燥 48 h，工艺参数为冷阱温度−50 ℃，真空度 70 Pa，加热板温度 48 ℃，干燥结束后用透明真空袋进行抽真空包装。

1.2.2 单因素实验 将鸡肉添加量、玉米淀粉添加量、蛋清添加量、食盐添加量分别固定在 12%、10%、6% 和 2%，考察猪肥肉添加量（4%、6%、8%、10%、12%）对综合评分的影响。

将猪肥肉添加量、玉米淀粉添加量、蛋清添加量、食盐添加量分别固定在 8%、10%、6% 和 2%，考察鸡肉添加量（6%、12%、18%、24%、30%）对综合评分的影响。

将猪肥肉添加量、鸡肉添加量、蛋清添加量、食盐添加量分别固定在 8%、12%、6% 和 2%，考察玉米淀粉添加量（6%、8%、10%、12%、14%）对综合评分的影响。

将猪肥肉添加量、鸡肉添加量、玉米淀粉添加量、食盐添加量分别固定在 8%、12%、10% 和 2%，考察蛋清添加量（2%、4%、6%、8%、10%）对综合评分的影响。

将猪肥肉添加量、鸡肉添加量、玉米淀粉添加量、蛋清添加量分别固定在 8%、12%、10% 和 6%，考察食盐添加量（1%、1.5%、2%、2.5%、3%）对综合评分的影响。

考虑产品的整体特性，以含水率、复水比、白度值和脆度的综合评分为评价指标进行优化，在评价指标优化过程中采用主客观结合的方法，利用 AHP-EWM 综合赋权法进行权重计算，既能对各指标的重要性进行主观分配，又能客观反映应指标数据信息，使得权重系数更加科学合理。

1.2.3 响应面试验 在单因素实验的基础上，选择影响显著的因素：猪肥肉添加量（A）、鸡肉添加量（B）、玉米淀粉添加量（C）、蛋清添加量（D），并以综合评分（Z）作为响应值进行响应面试验，试验因素及水平如表 1 所示。

表 1 响应面试验因素水平设计

Table 1 Factor level of response surface test

水平	因素			
	A猪肥肉添加量(%)	B鸡肉添加量(%)	C玉米淀粉添加量(%)	D蛋清添加量(%)
−1	8	12	10	6
0	10	18	12	8
1	12	24	14	10

1.2.4 遗传算法优化试验 遗传算法（Genetic Algorithm, GA）是一种搜索启发式算法[10]，它模拟了自然选择过程和生物遗传学原理，其主要特点是可以跳出局部最优解，实现全局择优，弥补了 Box-Behnken 响应面法设计局部不足的缺点[11]。在本研究中，鱼糕冻干的配方优化是一个涉及多变量和多目标的全局优化问题，为获得全局最优解，采用 Box-Behnken 响应面法结合遗传算法来进行求解，遗传算法流程如图 1 所示。本文采用 python 编程遗传算法对鱼糕冻干的配方进行优化，具体的遗传算法参数设定如下：初始种群大小为 200，交叉概率为 0.7，变异概率为 0.1，进化代数为 100。选择猪肥肉添加量 8%（上限 12%）、鸡肉添加量 12%（上限 24%）、玉米淀粉添加量 10%（上限 14%）和蛋清添加量 6%（上限 10%）作为初始值，在初始值限定范围内随机生成 200 个个体构成初始种群，以综合评分作为输出适应度值，计算种群所有个体的适应度。利用轮盘赌选择法随机挑选 50 个个体进入下一轮进化，用进化后的个体替换随机挑选的 50 个个体，对替换后的种群进行适应度计算，并不断重复上述操作，当迭代次数达到 100 次后，终止迭代，此时输出每一代的最大适应度与最优参数，选择 100 次迭代过程中出现的最优值，即为最高综合评分，其对应的参数即为最优配方。

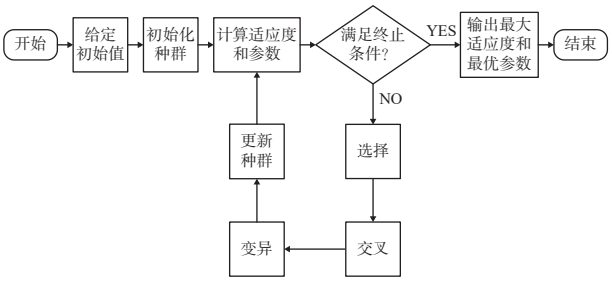


图 1 遗传算法流程图

Fig.1 Flowchart of genetic algorithm

1.2.5 品质指标的测定

1.2.5.1 水分含量 依据 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》对样品初始水分含量进行测定。

1.2.5.2 复水比 参照吴满刚等[12] 的方法并略作调整，将干燥后的样品放入 95 ℃ 热水中，水浴加热保

持恒温，每隔 1 min 拿出，在筛网中沥干表面水分并测定质量，在 30 min 内，直到其质量不再变化，记录复水时间与复水后的质量，每组进行 3 次平行实验，根据式(1)计算复水比 R，结果以平均值表示。

$$R(\%) = \frac{m}{m_0} \times 100 \quad \text{式（1）}$$

式中，R 为复水比；m_0 为冷冻干燥鱼糕质量，g；m 为复水后鱼糕质量，g。

1.2.5.3　色泽　采用 SPSIC WSC-S 型测色色差计室温条件下测定鱼糕的 L^*（亮度值）、a^*（红度值）、b^*（黄度值）。所有试样重复两次，每次做 3 次平行测定。采用亨氏白度计算方法[13]。

$$W = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad \text{式（2）}$$

式中，W 为亨氏白度；a^*为红度值；b^*为黄度值；L^*为亮度值。

1.2.5.4　质构特性　脆度和硬度通过 TA.XT-plus 质构仪进行测定。将鱼糕冻干切为 40 mm×10 mm×5 mm 的薄片，参照宋振硕等[14] 的方法并略作调整，采用 HDP/3PB 探头进行三点弯曲试验。试验基本参数设置为：测试模式为压缩力测试；运行方式返回起始位置；测前、测中、测后速度为 1 mm/s；探头下压距离 10 mm；每个样品平行测定 3 次。

1.2.5.5　微观结构　微观结构通过扫描电子显微镜（scanning electron microscopy，SEM）进行观测。制备鱼糕冻干的观测样本后，用碳导电胶将观测样本固定在样品托上，对样品进行喷金后 SEM 观测[15]。

1.2.5.6　理化指标及微生物的测定　鱼糕冻干前后的蛋白质含量测定参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》；脂肪含量测定参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》；灰分测定参照 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》；水分含量测定参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》。鱼糕冻干微生物的测定参考 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》，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》。

1.2.6　产品货架期的预测　参照黄艳等[16] 的方法略作修改，考虑鱼糕冻干成品的水分含量较低，并且含有一定量的不饱和脂肪酸，而过氧化值（peroxidation value，POV）能反映脂肪发生初级氧化程度，因此将 POV 作为预测货架期的指标。

POV 测定：参照 GB 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》。

通过进行加速破坏性试验，选择在 35 ℃ 和 45 ℃ 两个试验温度下加速脂肪氧化，直至达到产品允许的最大临界值（0.25 g/100 g），再利用 Arrhenius 方程预测产品在 25 ℃ 贮藏的货架期。脂肪氧化酸败与其储藏时间符合一级动力学方程[17]，按公式（3）计算：

$$\ln[POV] = K \times t + \ln[POV_0] \quad \text{式（3）}$$

式中，POV 为过氧化值，g/100 g；K 为速率常数；t 为贮藏时间，d；POV_0 为原始过氧化值，g/100 g。

在 25 ℃ 的货架期由式(4)、式(5)计算：

$$Q_{10} = \frac{K_{T2}}{K_{T1}} \quad \text{式（4）}$$

$$\theta_s(T) = \theta_s(T') \times Q_{10}^{\Delta Ta/10} \quad \text{式（5）}$$

式中，Q_{10} 为加速破坏性试验条件下，温差为 10 ℃ 的两个温度（试验温度 T1 和 T2）下的品质变化速率常数的比率；θ_s(T)为实际贮存温度 T 下食品的保质期；θ_s(T')为在 T'温度下进行加速破坏性试验得到的保质期；ΔTa 为较高温度(T')与实际贮存温度(T)的差值(T'-T)，℃。

1.2.7　感官评价　感官评价小组由通过 GB/T 16291.1-2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则》标准筛选的 20 名食品专业人员（男女各 10 名）组成，正式实验在符合 GB/T 13868-2009《感官分析 建立感官分析实验室的一般导则》的感官实验室内进行。对冷冻干燥后的鱼糕进行感官评定，采用 9 点快感标度法对样品的色泽、气味、口感、质地以及总体可接受度进行评分，得分为 1~9，其中 9 分代表极度喜欢，7 分代表喜欢，5 分代表普通，3 分代表厌恶，1 分代表极度厌恶[18]。至少 5 分的得分是认为可被接受的。全程符合 GB/T 10220-2012《感官分析 方法学总论》的规定，感官评价表如表 2 所示。

表 2　感官评价标准

Table 2　Sensory evaluation criteria

指标	评分标准	评分范围（分）
色泽	色泽均匀，冻干呈淡黄色	7~9
	色泽较均匀，冻干呈灰黄色	4~6
	色泽不均匀，冻干呈灰暗色	1~3
气味	具有鱼肉本身的鲜味	7~9
	鱼肉味较淡	4~6
	鱼肉味不足	1~3
口感	口感细腻，咸淡适中，余味浓郁	7~9
	口感较细腻，咸淡尚可	4~6
	口感粗糙，偏咸或偏淡	1~3
质地	酥脆度高，硬度适中，易咀嚼	7~9
	酥脆度一般，偏硬，较易咀嚼	4~6
	酥脆度差，硬，不易咀嚼	1~3
总体可接受度	非常接受	7~9
	一般接受	4~6
	不接受	1~3

1.2.8　AHP-EWM 法计算权重

1.2.8.1　AHP 法　根据各指标的重要程度构建判断矩阵，综合考虑确定各项指标的重要性顺序为复水比>白度=脆度>水分，采用 1~9 标度法建立两两比较的判断矩阵并对各项指标进行评分，判断矩阵 B 如表 3 所示。

本研究采用方根法计算层次分析法权重[19]。依

表 3 判断矩阵评分

Table 3 Judgment matrix scores

指标	水分	复水比	白度	脆度
水分	1	1/7	1/5	1/5
复水比	7	1	2	2
白度	5	1/2	1	1
脆度	5	1/2	1	1

据公式(6)计算判断矩阵特征向量,再对特征向量进行归一化。

$$\overline{W}_i = \sqrt[4]{\prod_{j=1}^{4} b_{ij}} \quad i = 1,2,3,4$$

$$W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^{4} \overline{W}_i} \quad i = 1,2,3,4 \qquad 式(6)$$

式中,$\overline{W}_i$为归一化前水分、复水比、白度、脆度的权重向量,反映该指标的综合重要性;W_i 表示归一化后水分、复水比、白度、脆度的权重向量;b_{ij} 是判断矩阵内第 i 行指标对第 j 列指标的重要程度。

根据式(7)计算矩阵的最大特征值 λ_{max}。

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^{4} \frac{(BW)_i}{4W_i} \quad i = 1,2,3,4 \qquad 式(7)$$

通过公式(8)计算一致性比值 CR 对矩阵合理性进行评估,CR 值小于 0.1 表明矩阵数值设置以及权重系数可靠[20]。

$$CR = \frac{\lambda_{max} - 4}{(4-1) \times RI} \qquad 式(8)$$

式中,λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值;CR 表示一次性比值;RI 为随机一致性指标。

$$W_j = [W_i]^T \quad i = j \qquad 式(9)$$

式中,W_j 为第 j 个指标的层次分析法权重。

1.2.8.2 EWM 法 熵权法是一种基于信息量的客观赋权方法,通过衡量各评价指标数值变化程度来确定其权重。指标差异越大,所包含的信息量越多,熵权值也越大,对评估结果的影响越显著[21]。本试验有 25 个待评价方案,每个方案有 4 个评价指标构成数据原始矩阵 $A=(A_{ij})_{25\times4}$,首先通过式(10)和式(11)对原始数据矩阵中正向指标和负向指标进行归一化:

$$r^{+}_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{min}}{a_{max} - a_{min}} \qquad 式(10)$$

$$r^{-}_{ij} = \frac{a_{max} - a_{ij}}{a_{max} - a_{min}} \qquad 式(11)$$

式(10)中,r^{+}_{ij} 为正向指标,对应复水比和白度;a_{ij} 为矩阵中第 i 次实验时第 j 个评价指标的值;a_{max} 表示第 j 个评价指标的最大值;a_{min} 表示第 j 个评价指标的最小值。

式(11)中,r^{-}_{ij} 为负向指标,对应水分和脆度。

第 j 个评价指标的信息熵可按公式(12)计算:

$$\begin{cases} u_{ij} = \dfrac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{25} r_{ij}} \\ H_j = -\dfrac{1}{\ln 25} \sum_{i=1}^{25} u_{ij} \ln u_{ij} \end{cases} \qquad 式(12)$$

式中,u_{ij} 表示第 i 次实验时第 j 个评价指标标准化后的值,当 $u_{ij}=0$ 时,$u_{ij}\ln u_{ij}=0$;H_j 表示第 j 个评价指标的信息熵值。

则第 j 个指标的熵权法权重 θ_j 定义为:

$$\theta_j = \frac{1 - H_j}{4 - \sum_{j=1}^{4} H_j} \qquad 式(13)$$

1.2.8.3 综合权重的确定 采用 AHP-EWM 综合赋权法,能显示客观数据并兼顾主观经验对指标重要性的排序分配,解决两种方法各自的缺点,使得权重系数更加科学合理[22]。各指标的综合权重 d_j 计算公式如下。

$$d_j = a\theta_j + bW_j \qquad 式(14)$$

式中,θ_j 为熵权法确定的各指标权重;W_j 为层次分析法确定的各指标权重;a、b 为比例系数,且 a+b=1,考虑两种方法的均衡性,取 a=b=0.5。

$$Z = \sum_{i=1}^{25} x_{ij} \times d_j \qquad 式(15)$$

式中,Z 为综合评分;x_{ij} 为第 i 次实验时第 j 个评价指标的归一化数据。

1.3 数据处理

试验数据均为 3 次重复试验的平均值,所有数据均以平均数±标准差表示。采用 Excel 2020 进行数据统计整理。实验数据利用 SPSS Statistics 20.0 进行统计分析,并利用 LSD 法进行多重比较,$P<0.05$ 表示组间差异显著。Box-Behnken 实验设计及模型显著性分析通过 Design-Expert 13 软件完成,对回归模型和各项系数进行方差分析和 t 检验。理化指标在真空冷冻干燥前后的差异通过配对样本 t 检验进行分析。使用 Origin 2024 软件进行数据绘图分析,应用 python 编程遗传算法进行优化得出最佳配方。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果与分析

以猪肥肉、鸡肉、玉米淀粉、蛋清和食盐添加量为自变量,探究其对鱼糕冻干综合评分的影响,从而选出最佳单因素水平。其中,综合评分越高,产品色泽越佳,酥脆度越好,复水比越大。

2.1.1 猪肥肉添加量对鱼糕品质的影响 如表 4 所示,在固定鸡肉、玉米淀粉、蛋清和食盐添加量的条件下,随猪肥肉添加量的增加,鱼糕冻干的综合评分呈现先上升后下降的趋势,可能是由于猪肥肉中脂肪含量较高,脂肪在冻干过程中不会升华,在复水过程

中不易吸收水分[23]，因此鱼糕冻干制品的吸水能力随猪肥肉添加量的增加而减弱。此外，猪肥肉与瘦肉的颜色相比更浅，适量添加可以提高鱼糕的白度，过量添加（超过 10%）会使产品内部脂肪含量过高，表面出现油光，降低白度，并使结构变得松散，从而降低脆度，使产品的整体口感油腻而不脆，与施建斌等[24] 在麻城肉糕制作工艺配方研究中的发现一致。因此，选择猪肥肉添加量为 8%、10%、12% 进行后续响应面试验。

表 4　单因素实验指标与权重值

Table 4　Indicators and weighting values of single factor test

因素	添加量(%)	归一化				
		水分(%)	复水比	白度	脆度(mm)	综合评分
A	4	0.71	0.97	0.46	0.04	0.51^{d}
	6	0.84	0.80	0.49	0.48	0.63^{c}
	8	0.58	0.73	0.96	0.52	0.70^{b}
	10	0.74	0.63	0.97	0.89	0.81^{a}
	12	0.90	0.49	0.87	0.78	0.73^{b}
B	6	0.81	0.61	0.66	0.33	0.56^{d}
	12	0.58	0.66	0.68	0.85	0.72^{b}
	18	0.00	1.00	0.78	0.85	0.78^{a}
	24	0.45	0.78	0.51	0.67	0.64^{c}
	30	0.81	0.97	0.00	0.22	0.48^{e}
C	6	0.90	0.44	0.30	0.74	0.56^{c}
	8	0.65	0.58	0.41	0.89	0.65^{b}
	10	0.45	0.63	0.69	0.78	0.67^{b}
	12	0.52	0.76	0.69	0.93	0.77^{a}
	14	0.74	0.93	0.53	0.44	0.66^{b}
D	2	0.87	0.53	0.53	0.70	0.63^{c}
	4	0.52	0.64	0.51	0.78	0.64^{c}
	6	0.74	0.73	0.85	0.63	0.73^{b}
	8	0.58	0.76	0.83	1.00	0.83^{a}
	10	1.00	0.64	0.74	0.41	0.63^{c}
E	1.0	0.35	0.56	1.00	0.52	0.62^{b}
	1.5	0.74	0.00	0.95	0.96	0.63^{ab}
	2.0	0.74	0.85	0.92	0.22	0.65^{a}
	2.5	0.87	0.98	1.00	0.00	0.65^{a}
	3.0	0.42	0.97	0.89	0.22	0.64^{a}
AHP法权重		0.05	0.45	0.25	0.25	
EWM法权重		0.19	0.18	0.22	0.41	
AHP-EWM综合权重		0.12	0.29	0.22	0.36	

注：A、B、C、D和E分别为猪肥肉、鸡肉、淀粉、蛋清和食盐，表5~表6同；同一列不同小写字母表示不同组别间的显著性差异（P<0.05）。

2.1.2　鸡肉添加量对鱼糕品质的影响　鸡肉富含高质量的蛋白质、维生素和矿物质，可以提高鱼糕的营养价值。在固定猪肥肉、玉米淀粉、蛋清和食盐添加量的条件下，随鸡肉添加量的升高，综合评分呈现先上升后下降的趋势，在添加量为 18% 时达到最高（表 4）。鸡肉冻干过程水分以冰晶态升华汽化，蛋白质能够形成稳定的网络结构，维持鱼糕冻干后的形态[12]，其鸡肉纤维结构保持比较完整，且冰晶升华后会在其原位置形成小孔并形成疏松结构，提高鱼糕冻干复水效果，适量的添加能够增强产品的纤维感[25]。此外，肉类的色泽主要由肌红蛋白、氧合肌红蛋白和高铁肌红蛋白三种蛋白决定[26]，鸡肉添加过量会导致鱼糕冻干整体颜色变暗，翁江来等[27] 研究了美拉德褐变是干燥后鸡肉色泽变化的主要原因。因此，选择鸡肉添加量为 12%、18%、24% 进行后续响应面试验。

2.1.3　玉米淀粉添加量对鱼糕品质的影响　在固定猪肥肉、鸡肉、蛋清和食盐添加量的条件下，玉米淀粉的加入使综合评分呈先上升后下降的趋势（表 4）。玉米淀粉是一种由直链淀粉和支链淀粉组成的碳水化合物，主要来源于玉米，其支链淀粉由 α-葡萄糖单元构成，其分支状结构赋予其优异的吸水性和膨胀性，能够吸收和保持水分[28]。在加热过程中，蛋白质和淀粉都可以发生凝胶化，形成三维网络结构[29]，使整个体系更加稳定，避免在储存过程中出现破碎或变形。罗颖莹等[30] 也在研究中发现，在鱼糜中添加适量的玉米淀粉，鱼糜中的自由水转换为不易流动水和结合水，蛋白质分子间的疏水相互作用增强，α-螺旋转变为有序 β-折叠，形成致密、稳定的网络结构。此外，玉米淀粉在冻干过程中会形成多孔结构，不仅可以提高鱼糕冻干的复水性能，也能增强冻干的脆度。但过量的玉米淀粉可能导致产品在储存时吸湿变软[31]，影响复水性并使口感变得粗糙。因此，选择玉米淀粉添加量为 10%、12%、14% 进行后续响应面试验。

2.1.4　蛋清添加量对鱼糕品质的影响　在固定猪肥肉、鸡肉、玉米淀粉和食盐添加量的条件下，随着蛋清添加量的增加，综合评分呈先上升后下降的趋势（表 4）。蛋清中的蛋白质在加热时会凝固，有助于鱼糕中的其他成分粘结在一起，从而增强其结构稳定性，防止在冻干过程中表面出现裂痕。蛋清同时具有乳化作用[32]，能够吸附在油水交界处，降低界面张力，促进油滴在水中均匀分散形成乳液，乳化后的脂肪颗粒在冻干过程中有助于形成多孔结构[33]，进而提升鱼糕冻干产品的复水性。赖燕娜等[34] 发现，在鱼糜制品中添加咸鸭蛋蛋清能改善产品的色泽，增加其白度。蛋清添加量为 8% 时，鱼糕冻干的综合评分最高，随着蛋清添加量的逐渐增加，产品品质明显下降，可能是因为过度乳化导致鱼糕冻干制品的质地变得油腻，且过多的蛋白质会导致鱼糕冻干制品的质地变得过于紧实缺乏多孔性，影响口感和复水性。因此，选择蛋清添加量为 6%、8%、10% 进行后续响应面试验。

2.1.5　食盐添加量对鱼糕品质的影响　食盐是一种离子晶体，可以与蛋白质相互作用，促进蛋白质的溶解和凝胶化[35]，影响鱼糕的质地和结构，而食盐对鱼糕冻干的白度和复水比影响不是很大，适当地添加能够提升鱼糕的味道，使其更加鲜美，过量则可能导致口感偏咸。食盐添加量大于 2% 时，综合评分变化并不显著（P>0.05）（表 4）。因此，选择食盐添加量为 2%。

2.2 响应面试验结果与分析

据单因素实验结果，由于食盐添加量对鱼糕冻干综合评分影响不显著(P>0.05)，在添加量为 2% 时综合评分最高，因此，排除不显著因素，确定食盐添加量为 2%，研究猪肥肉添加量(A)、鸡肉添加量(B)、玉米淀粉添加量(C)、蛋清添加量(D)对综合评分(Z)的影响。根据 Box-Benhnken 原理设计四因素三水平试验方案，优化鱼糕冻干工艺配方，试验方案与结果如表 5 所示。通过 Design-Expert 13 进行二次多项回归拟合得到猪肥肉添加量、鸡肉添加量、玉米淀粉添加量、食盐添加量 4 个因素之间的二次多项回归方程：综合评分：

$$Z=0.854+0.0208A+0.0442B-0.0133C-0.0067D-0.0075AB-0.0725AC+0.0175AD-0.015BC-0.005BD+0.0175CD-0.0724A^2-0.0624B^2-0.0662C^2-0.0337D^2$$

表 5 响应面试验设计与结果

Table 5 Design and results of response surface methodology

实验号	A(%)	B(%)	C(%)	D(%)	综合评分(分)
1	12	18	10	8	0.82
2	10	18	12	8	0.84
3	10	24	12	10	0.79
4	10	24	12	6	0.81
5	8	18	12	10	0.70
6	10	18	12	8	0.85
7	12	18	12	10	0.78
8	10	18	10	10	0.74
9	10	24	14	8	0.74
10	10	12	12	6	0.72
11	10	12	12	10	0.72
12	10	18	14	6	0.73
13	12	24	12	8	0.78
14	8	18	12	6	0.75
15	8	12	12	8	0.64
16	12	18	14	8	0.65
17	10	24	10	8	0.80
18	10	18	14	10	0.75
19	10	12	10	8	0.68
20	8	24	12	8	0.75
21	10	18	10	6	0.79
22	10	18	12	8	0.87
23	8	18	14	8	0.76
24	12	12	12	8	0.70
25	8	18	10	8	0.64
26	12	18	12	6	0.76
27	10	12	14	8	0.68
28	10	18	12	8	0.87
29	10	18	12	8	0.84

方差分析如表 6 所示，模型显著性检验 P<0.0001 表示显著；失拟项 P>0.05 表示不显著，表明该模型合理、可靠性高、误差小。此外，回归方程的相关系数 R^2 为 0.9901，调整系数 R^2_{adj} 为 0.9803，说明模型拟合度高，建立的回归模型可解释 98.03% 响应值的变化。模型二次项中 AC、AD、BC、CD 呈极显著(P<0.01)。通过比较四因素 F 值的大小可知，对综合评分的影响程度顺序为：鸡肉添加量>猪肥肉添加量>玉米淀粉添加量>蛋清添加量。

表 6 模型的方差分析结果

Table 6 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.1200	14	0.0086	100.44	<0.0001	**
A	0.0052	1	0.0052	61.02	<0.0001	**
B	0.0234	1	0.0234	274.24	<0.0001	**
C	0.0021	1	0.0021	24.99	0.0002	**
D	0.0005	1	0.0005	6.25	0.0255	*
AB	0.0002	1	0.0002	2.64	0.1268	-
AC	0.0210	1	0.0210	246.32	<0.0001	**
AD	0.0012	1	0.0012	14.35	0.0020	**
BC	0.0009	1	0.0009	10.54	0.0058	**
BD	0.0001	1	0.0001	1.17	0.2974	-
CD	0.0012	1	0.0012	14.35	0.0020	**
A^2	0.0340	1	0.0340	398.52	<0.0001	**
B^2	0.0253	1	0.0253	296.05	<0.0001	**
C^2	0.0284	1	0.0284	332.70	<0.0001	**
D^2	0.0074	1	0.0074	86.13	<0.0001	**
残差	0.0012	14	0.0001			
失拟项	0.0003	10	0	0.1196	0.9969	-
纯误差	0.0009	4	0.0002			
总和	0.1212	28				
系数	R^2=0.9901 R^2_{adj}=0.9803					

注：*为差异显著(P<0.05)；**为差异极显著(P<0.01)。

2.3 遗传算法优化实验

遗传算法全局寻优结果如图 2 所示，迭代次数接近第 15 代时，适应度值逐渐增大并趋于收敛，表明种群已接近最优状态。至第 27 代时，适应度函数达到了最大值 0.8671，即最高综合评分为 0.8671。此时，适应度函数对应的最优参数为(10.61, 20.05, 11.33, 7.87)，即遗传算法优化后的最佳配方为：猪肥肉添加量为 10.61%，鸡肉添加量为 20.05%，玉米淀粉添加量为 11.33%，蛋清添加量为 7.87%。

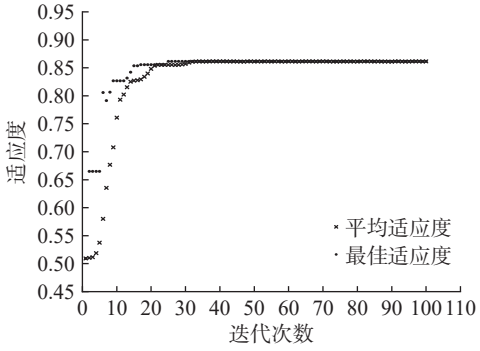


图 2 遗传算法全局寻优结果

Fig.2 Global optimization results of genetic algorithm

2.4 验证试验

通过 Box-Behnken 响应面优化法和遗传算法获得的理论最优配方综合评分预测值与验证结果如表 7 所示。为适应实际生产操作的需要，对工艺配方进行适当的调整后开展验证实验，每组工艺条件独立重复 3 次，结果取平均值，验证结果显示，实验测定值与模型预测值接近，证实 Box-Behnken 响应面法与遗传算法联合模型的可靠性。

表 7　优化方法的预测值与验证结果

Table 7　Predicted values and validation results of the optimization method

方法	结果类型	猪肥肉添加量(%)	鸡肉添加量(%)	玉米淀粉添加量(%)	蛋清添加量(%)	综合评分
响应面法	预测值	10.52	20.28	11.39	7.72	0.8676
遗传算法		10.61	20.05	11.33	7.87	0.8671
响应面法	验证结果	10.00	20.00	11.00	8.00	0.87±0.21
遗传算法		10.00	20.00	11.00	8.00	0.87±0.34

表 8　鱼糕冻干质构参数

Table 8　Textural parameters of freeze-dried fish cake

质构参数	优化后	优化前	某生鲜超市	某农贸市场
硬度(g)	2039.89±47.21^{b}	742.05±24.08^{d}	952.47±33.48^{c}	4032.02±87.75^{a}
脆度(mm)	0.63±0.11^{b}	0.39±0.09^{d}	0.48±0.05^{c}	1.12±1.19^{a}

注：同一行不同字母表示差异显著(P<0.05)。

遗传算法能够在 Box-Behnken 响应面优化法的基础上进行全局优化，从而弥补了 Box-Behnken 响应面优化法的局限性。将这两种优化方法结合起来，可以更科学地寻找最佳工艺配方，并且能够模拟和预测不同配方的综合评分。

2.5　质构特性与微观结构分析

质构参数在衡量食品口感方面起着重要的作用，如表 8 所示，采用最优配方制作的鱼糕冻干制品硬度为 2039.89 g，脆度为 0.63 mm，远高于优化前制作的鱼糕冻干产品。微观结构如图 3 所示，优化前鱼糕冻干和某生鲜超市鱼糕冻干微观结构都呈现出不规则的片状结构，表面出现不均匀的孔洞和裂缝，导致产品易碎，复水时易破裂且复水后的鱼糕可能会出现局部软硬不一、质地不均匀的情况，影响口感和食用体验，而购自于某农贸市场的鱼糕冻干微观结构呈不规则的团块状，孔洞小，整体紧致密实，导致产品硬而不易碎，复水时难以吸收水分导致复水所需时间长。配方优化后所制作的鱼糕冻干微观结构表面呈网络状，孔隙分布较均匀，使其具有更好的结构稳定性和完整性，从而在贮藏和运输过程中不易发生变形、开裂或破碎等问题，能保持良好的外观和形态，同时，均匀的孔隙分布为水分的渗透和扩散提供了良好的通道，复水时水分能够沿着这些均匀的孔隙快速渗透到鱼糕的内部，使内部结构迅速被水分子填充，加速鱼糕的复水过程，缩短复水所需的时间，均匀的孔隙分布也有利于水分在整个鱼糕中均匀分布，避免因孔隙不均匀导致的局部吸水过多或过少现象。

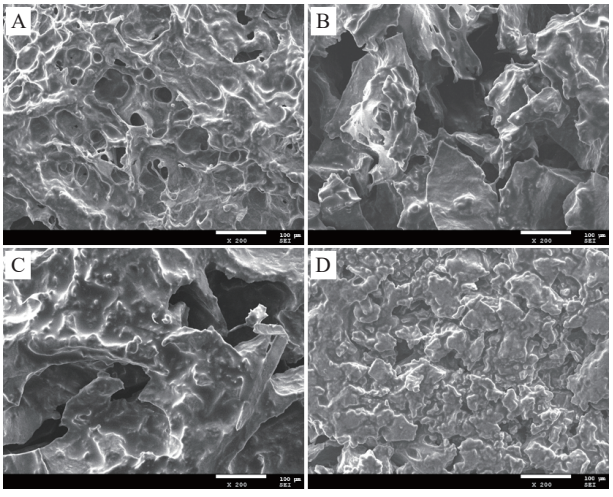


图 3　鱼糕冻干 SEM 对比图

Fig.3　Comparison of freeze-dried SEM of fish cake

注：A：优化后的鱼糕冻干(200×)；B：优化前的鱼糕冻干(200×)；C：某生鲜超市的鱼糕冻干(200×)；D：某农贸市场的鱼糕冻干(200×)。

2.6　理化指标及微生物分析

为减少误差，避免样本单一，本实验以最优配方制作五种鱼糕并测定其真空冷冻干燥前后理化指标的变化，如图 4 所示，冷冻干燥前后鱼糕水分含量有显著变化(P<0.05)，其他三种营养成分含量变化均不显著(P>0.05)，说明冷冻干燥处理对鱼糕的品质影响较低，且冷冻干燥后的鱼糕不含水分更易于运输和贮藏。冷冻干燥处理前后，鲫鱼鱼糕的粗脂肪含量显著高于鲢鱼鱼糕、鳊鱼鱼糕、草鱼鱼糕和鳙鱼鱼糕(P<0.05)，鲢鱼鱼糕的总蛋白含量显著高于其他四种鱼糕(P<0.05)，鳊鱼鱼糕的灰分含量显著高于其他四种鱼糕(P<0.05)，五种鱼糕在真空冷冻干燥处理前后的水分含量均未呈现统计学显著差异(P>0.05)。以鲢鱼冻干为主进行微生物特性分析，检测结果为菌落总数 263 CFU/g，未检测出大肠菌群和致病菌，符合鱼糜制品的国家标准 GB 10132-2005《鱼糜制品卫生标准》。

2.7　产品货架期的预测

采用透明真空袋包装，分别放在 35 ℃ 和 45 ℃ 的生化培养箱中进行食品加速破坏性试验，35 ℃ 条件下贮藏 5 d 检测一次 POV 值，45 ℃ 条件下贮藏 2 d 检测一次 POV 值，当 POV 值达到 0.25 g/100 g 时终止试验，鱼糕冻干的 POV 变化情况如图 5 所示，对鱼糕冻干贮藏期间 POV 的变化进行回归分析，根据公式(3)得 35 ℃ 下的回归方程为：ln(POV)=0.0066t+0.048，R^2=0.9781；45 ℃ 下的回归方程为：ln(POV)=0.0171t+0.0471，R^2=0.9634；由公式(4)得

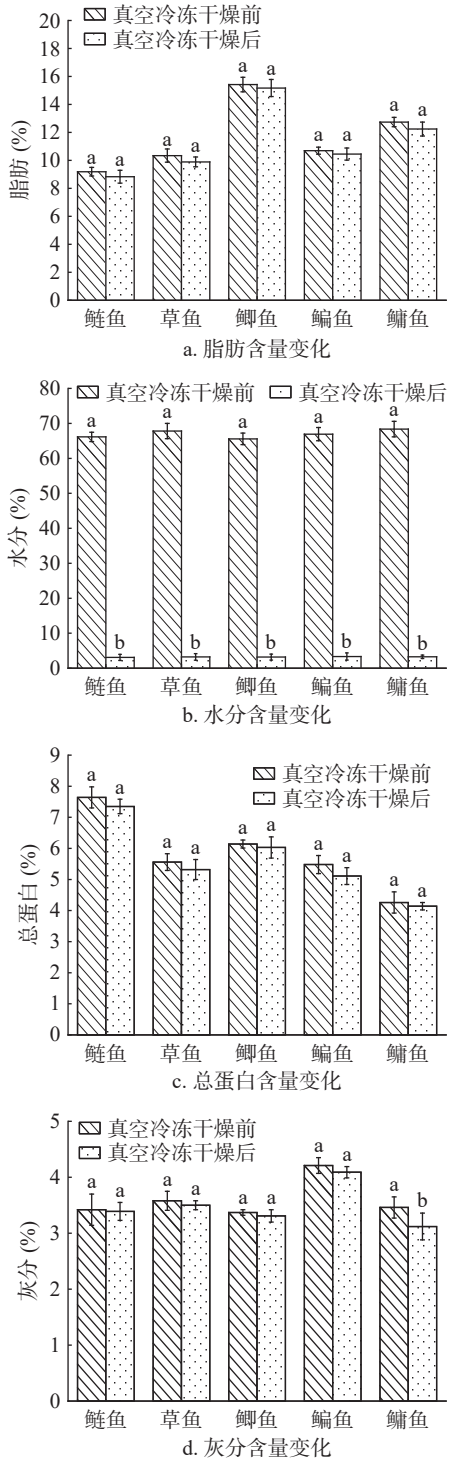


图 4　真空冷冻干燥前后鱼糕理化指标的变化

Fig.4　Changes of physicochemical indexes of fish cakes before and after vacuum freeze-drying

注: 不同小写字母表示不同组别间的显著性差异(P<0.05)。

出 Q_{10}=2.59, 由公式(5)计算出在 25 ℃ 温度下的保质期为 77 d, 因此当温度为 25 ℃ 时, 采用透明真空袋包装的鱼糕冻干货架期为 77 d, 根据前期预实验可知传统鲜切鱼糕在此温度下只能贮藏 4~7 d, 鱼糕冻干的贮藏时间比鲜切鱼糕延长了 11 倍, 证实该工艺确实可以有效延长鱼糕的货架期。

2.8　感官评价

为评价消费者对产品的可接受性, 本试验从气味、色泽、口感、质地以及总体可接受度 5 个方面对样品的感官品质进行分析, 如图 6 所示, 因为配料比例的不同, 产品的气味、色泽、口感和质地均有明显的差别。从色泽来看, 优化后的鱼糕冻干得分处于优秀水平, 表明其色泽均匀, 呈现淡黄色, 冻干工艺使得鱼糕原有色泽有效保留; 气味方面, 得分显示其具有较浓郁的鱼糕气味; 口感得分反映出其在咀嚼时口感酥脆、细腻, 这与其均匀分布的孔隙结构有关; 质地维度的得分体现了其硬度适中。整体上优化后的鱼糕冻干各方面得分较高, 品质明显优于其他三组, 表明其符合现代消费者追求方便食品的趋势, 在这些方面具有一定市场竞争力。

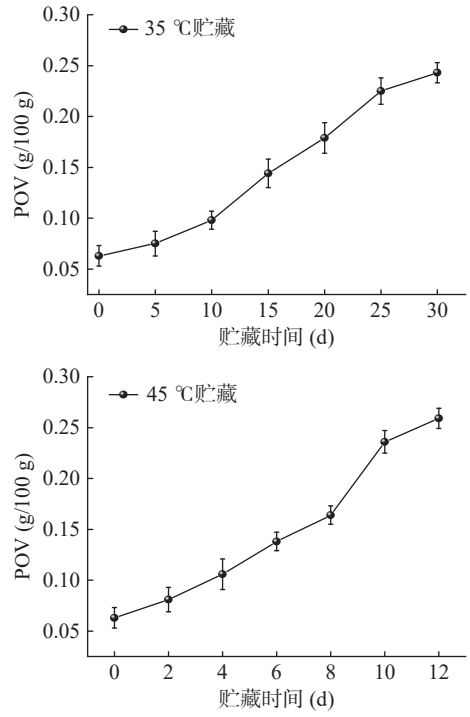


图 5　产品在 35℃ 和 45℃ 贮藏的 POV 变化情况

Fig.5　Changes in POV of products stored at 35 ℃ and 45 ℃

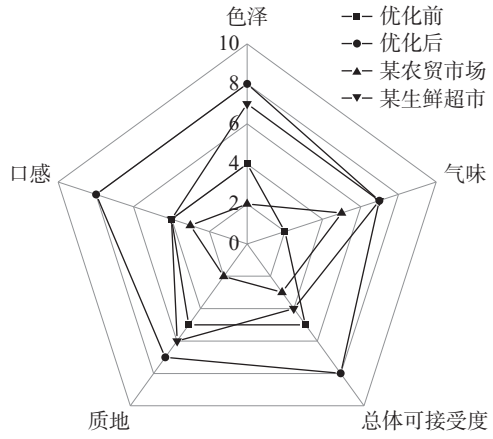


图 6　不同鱼糕冻干的感官评定结果

Fig.6　Results of sensory evaluation of different fish cakes freeze-dried

3　结论

本研究以层次分析-熵权法计算的综合评分为评

价指标，并在单因素实验基础上通过遗传算法结合 Box-Behnken 响应面法优化出鱼糕冻干最佳配方：相对碎鱼肉用量，猪肥肉添加量 10%（质量分数），鸡肉添加量 20%，玉米淀粉添加量 11%，蛋清添加量 8%。此条件下制备的鱼糕冻干综合评分为（0.87±0.34），微观结构表面孔隙分布较均匀，硬度适中不易碎，酥脆，品质较好，真空冷冻干燥前后理化指标变化不显著，25 ℃ 贮藏时预测货架期可达 77 d，较鲜切鱼糕（4~7 d）延长 11 倍。本研究得到了色泽均匀、口感酥脆、货架期长以及营养均衡的鱼糕冻干制品，为鱼糕制品常温储运与即食化应用提供借鉴。目前，对鱼糕的研究多集中在对传统工艺和配方进行优化，及鲜切鱼糕的品质的影响，本研究在传统工艺基础上应用真空冷冻干燥技术，更结合多维度指标对鱼糕冻干配方进行了优化，旨在延长其保质期、提升营养均衡性并拓展即食化、多场景应用潜力。此外，相较于传统单一的优化方法，本研究采用响应面法结合遗传算法，能更科学精准地确定各原料的最优添加量，为食品配方开发提供了更先进、有效的方法。后续将引入高通量检测技术（如高效液相色谱、气相色谱-质谱联用）进一步分析鱼糕冻干过程中的营养成分保留率和生物活性变化，从食品化学的角度分析鱼糕产品的品质，为鱼糕类产品的深度开发提供理论与实践支撑。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 米红波, 千春录, 傲特海, 等. 淡水鱼鱼糕加工适性和微冻特性的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(3): 84−95. [MI H B, QIAN C L, AO T H, et al. Study on the processing suitability and microfrozen characteristics of freshwater fish cake[J]. Chinese Journal of Food Science, 2012, 12(3): 84−95.]

[2] 路红波, 吴佳莉, 刘俊荣. 鲢鱼鱼糕最佳工艺配方的研究[J]. 水产科学, 2010, 29(12): 735−738. [LU H B, WU J L, LIU J R. Research on the optimal process formula of silver carp fish cake[J]. Aquatic Sciences, 2010, 29(12): 735−738.]

[3] 李孚杰. 传统鱼糕的工艺和配方优化及防腐保鲜研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008. [LI F J. Research on the optimization of process and formula of traditional fish cake and anticorrosion and freshness preservation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.]

[4] KING A E, LIU C F, LIU Y J. Chlorophyll stability in spinach dehydrated by freeze-drying and controlled low-temperature vacuum dehydration[J]. Food Research International, 2001, 34(2−3): 167−175.

[5] PARNIAKOV O, BALS O, LEBOVKA N, et al. Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 35: 52−57.

[6] ORAK H, AKTAS T, YAGAR H, et al. Effects of hot air and freeze drying methods on antioxidant activity, colour and some nutritional characteristics of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) fruit [J]. Food Science & Technology International, 2012, 18(4): 391−402.

[7] 牛改改, 游刚, 王培, 等. 基于变异系数权重法评价三种干燥方法对牡蛎干品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 68−73,77. [NIU G G, YOU G, WANG P, et al. Evaluation of the effects of three drying methods on the quality of dried oysters based on the coefficient of variation weighting method[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(14): 68−73,77.]

[8] 阙婷婷, 张佳琪, 张慧, 等. 真空微波干燥与真空冷冻干燥对鱼糜干制品质量的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23): 253−257,262. [QUE T T, ZHANG J Q, ZHANG H, et al. Effects of vacuum microwave drying and vacuum freeze drying on the quality of dried surimi products[J]. Food Industry Science and Technology, 2012, 33(23): 253−257,262.]

[9] 林丰, 汪之和, 施文正, 等. 干燥方式对南极磷虾干制品风味成分的影响[J]. 上海农业学报, 2016, 32(5): 133−138. [LIN F, WANG Z H, SHI W Z, et al. Effect of drying method on flavor components of dried Antarctic krill products[J]. Shanghai Journal of Agriculture, 2016, 32(5): 133−138.]

[10] 吴绍锋, 强华, 张欣, 等. 基于遗传算法的南瓜联合干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 183−191,240. [WU S F, QIANG H, ZHANG X, et al. Optimization of pumpkin combined drying process based on genetic algorithm[J]. Food and Machinery, 2024, 40(7): 183−191,240.]

[11] 张聪, 疏炳南, 张江涛, 等. 基于响应面法-遗传算法的船舶推进轴系多目标优化设计[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(4): 466−475. [ZHANG C, SHU B N, ZHANG J T, et al. Multi-objective optimization design of ship propulsion shaft system based on response surface method and genetic algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2025, 59(4): 466−475.]

[12] 吴满刚, 王俊山, 段立昆, 等. 不同干燥处理方法对鸡肉丁的干燥效果[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(7): 235−241. [WU M G, WANG J S, DUAN L K, et al. Drying effect of different drying treatments on diced chicken[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(7): 235−241.]

[13] 张晓慧, 郭全友, 包海蓉, 等. 鱿鱼与白鲢鱼混合比例对鱼糜制品凝胶特性的影响研究[J]. 核农学报, 2023, 37(4): 803−810. [ZHANG X H, GUO Q Y, BAO H R, et al. Effects of the mixture ratio of squid and silver carp on the gelatinization characteristics of surimi products[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2023, 37(4): 803−810.]

[14] 宋振硕, 王丽丽, 林清霞, 等. 响应面法优化超微绿茶粉制作曲奇饼干关键配方[J]. 福建农业学报, 2022, 37(12): 1619−1625. [SONG Z S, WANG L L, LIN Q X, et al. Response surface methodology for optimizing the key formulation of cookies made from ultra-micro green tea powder[J]. Fujian Journal of Agriculture, 2022, 37(12): 1619−1625.]

[15] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预干燥方式和水分转换点对真空冷冻联合干燥苹果脆片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 110−120. [MA Y C, BI J F, YI J Y, et al. Effects of pre-drying mode and moisture transition point on the quality of vacuum freeze-dried apple crisps[J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(9): 110−120.]

[16] 黄艳, 黄晓菲, 兰昌花, 等. 胡萝卜鱼糜脆片的工艺优化及其货架期预测[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 128−135. [HUANG Y, HUANG X F, LAN C H, et al. Process optimization of carrot minced fish crisps and its shelf-life prediction[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(3): 128−135.]

[17] 常道柯, 田潇凌, 林顺顺, 等. 不同制粉方式对黑小麦全麦粉

及饼干品质影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(21): 266−272. [CHANG X K, TIAN X L, LIN S S, et al. Effects of different milling methods on the quality of whole wheat flour and cookies from black wheat[J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 50(21): 266−272.]
[18] 周燕, 李鑫, 董浩, 等. 桑葚-紫薯复合冻干果块的制备工艺优化及品质评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 276−285. [ZHOU Y, LI X, DONG H, et al. Preparation process optimization and quality evaluation of mulberry-purple potato composite freeze-dried fruit pieces[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2024, 40(12): 276−285.]
[19] 卢新颖, 毕嘉谣, 李明慧, 等. Box-Behnken 响应面法结合基准关联度和 AHP-EWM 优化经典名方易黄汤的提取工艺[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(21): 5798−5808. [LU X Y, BI J Y, LI M H, et al. Box-Behnken response surface methodology combined with baseline correlation and AHP-EWM to optimize the extraction process of the classical prescription Yi Huang Tang[J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2023, 48(21): 5798−5808.]
[20] CUI H, LU T H, WANG M X, et al. Flavonoids from *Morus alba* L. Leaves: Optimization of extraction by response surface methodology and comprehensive evaluation of their antioxidant, antimicrobial, and Inhibition of *α*-Amylase activities through analytical hierarchy process[J]. Molecules, 2019, 24(13): 2398.
[21] YANG F, LI R Z, WANG X, et al. Optimization of working parameters of high-pressure roller mill based on entropy weight method and response surface method[J]. Scientific Reports, 14(1): 2024, 14(1): 28238.
[22] XI H, LI Z H, HAN J Y, et al. Evaluating the capability of municipal solid waste separation in China based on AHP-EWM and BP neural network[J]. Waste Management (New York, N. Y.), 2021, 139: 208−216.
[23] 王恒鹏, 王引兰, 姜松松, 等. 不同干燥方式下调理猪肉干品质变化及其机制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 317−326. [WANG H P, WANG Y L, JIANG S S, et al. Changes in dry quality of seasoned pork and its mechanism under different drying methods[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2021, 37(24): 317−326.]
[24] 施建斌, 隋勇, 蔡沙, 等. 麻城肉糕制作工艺配方研究[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(22): 163−167. [SHI J B, SUI Y, CAI S, et al. Research on the formulation of the production process of meat cake in Macheng[J]. Hubei Agricultural Science, 2019, 58(22): 163−167.]
[25] LIU Y, ZHANG Z Y, HU L D. High efficient freeze-drying technology in food industry[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021(11): 1−19.
[26] CHENG J H, OCKERMAN H W. Effect of phosphate with tumbling on lipid oxidation of precooked roast beef-ScienceDirect[J]. Meat Science, 2003, 65(4): 1353−1359.
[27] 翁江来, 郁生军, 张楠, 等. 干燥鸡胸肉褐变原因分析及褐变程度的测定[J]. 肉类研究, 2011, 25(3): 21−24. [WENG J L, YU S J, ZHANG N, et al. Analysis of the causes of browning and determination of the degree of browning in dried chicken breast[J]. Meat Research, 2011, 25(3): 21−24.]
[28] 沙米西努尔·牙森, 李晓荣, 蔡大润, 等. 玉米淀粉含量测定影响因素分析[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(2): 301−308. [YASEN S M X N E, LI X R, CAI D R, et al. Analysis of factors affecting the determination of corn starch content[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2023, 60(2): 301−308.]
[29] 韩蕊, 许秀颖, 侯景瑶, 等. 冻融循环次数对超声改性玉米淀粉凝胶特性和结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 9−17. [HAN R, XU X Y, HOU J Y, et al. Effect of the number of freeze-thaw cycles on the properties and structure of ultrasound-modified corn starch gels[J]. Food Science, 2023, 44(2): 9−17.]
[30] 罗颖莹, 黄卉, 李来好, 等. 免漂洗罗非鱼鱼糜凝胶品质改良及机理分析[J]. 南方水产科学, 2025, 21(2): 164−173. [LUO Y Y, HUANG H, LI L H, et al. Improvement of gelatin quality and mechanism analysis of tilapia surimi without rinsing[J]. Southern Aquatic Sciences, 2025, 21(2): 164−173.]
[31] 张宇凡, 贾冬英, 张茜, 等. 香菇营养薯片的加工配方及主要工艺研究[J]. 食品工业科技, 2006(4): 125−127. [ZHANG Y F, JIA D Y, ZHANG X, et al. Research on the processing formula and main process of mushroom nutritional potato chips[J]. Food Industry Science and Technology, 2006(4): 125−127.]
[32] ZHANG P, LIU L, HUANG Q, et al. Mechanism study on the improvement of egg white emulsifying characteristic by ultrasound synergized citral: Physicochemical properties, molecular flexibility, protein structure[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107104.
[33] TIAN Y J, LÜ X H, OH H D, et al. Emulsifying properties of egg proteins: Influencing factors, modification techniques, and applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(5): e70004.
[34] 赖燕娜, 傅亮, 赖雄伟, 等. 咸鸭蛋蛋清对罗非鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(1): 82−84,87. [LAI Y N, FU L, LAI X W, et al. Effect of salted duck egg white on the gel quality of tilapia surimi[J]. Food Industry Science and Technology, 2012, 33(1): 82−84,87.]
[35] WANG Z J, ZENG L, FU L W, et al. Effect of ionic strength on heat-induced gelation behavior of soy protein isolates with ultrasound treatment[J]. Molecules, 2022, 27(23): 8221−8221.