

菊苣多糖对蓝圆鲹鱼丸质构与贮藏品质的影响

薛 山^{1,2,3} 林靖娟¹

(1. 闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建 漳州 363000; 2. 菌物产业福建省高校工程研究中心, 福建 漳州 363000; 3. 漳台休闲食品与茶饮料研究所, 福建 漳州 363000)

摘要: [目的] 优化菊苣多糖蓝圆鲹鱼丸加工工艺, 并分析其贮藏特性。[方法] 考察菊苣多糖(chicory polysaccharide, CP)添加量、玉米淀粉添加量、盐添加量、水添加量、复合磷酸盐添加量和凝胶温度对蓝圆鲹鱼丸质构及综合评分的影响, 基于质构综合评分优化菊苣多糖蓝圆鲹鱼丸加工工艺, 采用光学显微镜和扫描电镜观察鱼丸的微观结构, 并分析菊苣多糖蓝圆鲹鱼丸在 4℃ 冷藏期间的理化指标变化。[结果] 采用主成分分析法提取公共因子, 构建质构综合评分模型为 $Y=0.343X_1+0.349X_2+0.350X_3$; 当水添加量为 12.41%, 玉米淀粉添加量为 25.09%, CP 添加量为 7.90% 时, 蓝圆鲹鱼丸的质构综合评分最大, 为 1.4895 ± 0.0170 。微观结构结果显示, 添加 7.90% CP 的鱼丸较空白对照组能显著改善鱼丸的整体结构, 使其微观结构细密均匀, 内部凝胶网络相互交联程度增强。4℃ 下贮藏 10 d, 添加 CP 的样品组的滴水损失较空白对照组更小, pH 更稳定, 挥发性盐基总氮和丙二醛值变化更慢。[结论] 试验制备的 CP 蓝圆鲹鱼丸具有良好的品质特性, 添加 CP 能有效改善蓝圆鲹鱼丸的质构及耐贮藏性。

关键词: 蓝圆鲹鱼丸; 菊苣多糖; 质构综合评分; 贮藏品质

Effect of chicory polysaccharide on the texture and storage quality of round scad fish ball

XUE Shan^{1,2,3} LIN Jingjuan¹

(1. College of Biological Science and Technology, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China;
2. Engineering Research Center of Fujian Province for Fungal Industry, Zhangzhou, Fujian 363000, China;
3. Research Institute of Zhangzhou-Taiwan Leisure Food and Tea Beverage, Zhangzhou, Fujian 363000, China)

Abstract: [Objective] The processing technology of round scad (*Decapterus maruadsi*) fish balls with chicory polysaccharide was optimized and its storage characteristics were analyzed. [Methods] The effects of chicory polysaccharide (CP) supplemental level, corn starch supplemental level, salt supplemental level, water supplemental level, complex phosphate supplemental level and gel temperature on the texture and comprehensive score of scad fish balls were investigated. The processing technology of chicory polysaccharide scad fish balls was optimized based on the comprehensive score. The processing technology of chicory polysaccharide scad fish balls was optimized based on the comprehensive score. The microstructure of the fish balls was observed by optical microscope and scanning electron microscope, and the changes of physicochemical parameters of the fish balls were analyzed during refrigeration at 4℃. [Results] The texture comprehensive score, was constructed, based on the principle component analysis method to extract common factors, and it was calculated as follows: $Y=0.343X_1+0.349X_2+0.350X_3$. When the water content was 12.41%, the corn starch content was 25.09% and the CP content was 7.90%, the maximum comprehensive score of the fish was 1.4895 ± 0.0170 . The microstructure results showed that the fish balls supplemented with 7.90% CP could significantly improve the overall structure of the fish balls compared with the blank control group, making the microstructure fine and uniform, and the cross-linking degree of internal gel networks enhanced. Stored at 4℃ for 10 days, the sample group supplemented with CP had less drip loss, more stable pH, and slower changes in volatile base total nitrogen and malondialdehyde values than the blank control group. [Conclusion] The fish balls prepared in this study have good quality characteristics,

基金项目: 福建省自然科学基金项目(青年创新)(编号: 2021J05198); 福建省科技特派员(团队)项目(编号: SKTP2120, SKTP2320, 24SKTP20); 闽南师范大学校内高级别项目(编号: MSGJB2021021)

通信作者: 薛山(1988—), 女, 闽南师范大学副教授, 博士。E-mail: yixuanchenglion@sina.com

收稿日期: 2023-07-27 **改回日期:** 2024-07-08

and the texture and storage resistance of the balls can be effectively improved by adding CP.

Keywords: round scad (*Decapterus maruadsi*) fish ball; chicory polysaccharide (CP); texture comprehensive score; storage quality

蓝圆鲈(*Decapterus maruadsi*), 俗称巴浪鱼, 是一种鲈科圆鲈属洄游性海鱼, 是中国第二大海洋捕捞鱼类^[1]。其肌肉多为红色, 组氨酸含量较高, 蛋白酶活性较强, 因此, 鱼肉鲜度下降速度快, 同时, 与其相关的加工利用研究不足导致浪费严重, 因此被认为是易腐低值鱼类^[2-3]。目前, 有关蓝圆鲈的加工主要集中在咸鱼等简易制品方面^[4], 而关于蓝圆鲈鱼丸类产品的研发尚未见报道。近年来, 随着人们对低值鱼高值化利用的广泛关注^[5], 以蓝圆鲈为原料, 创新研发鱼糜类制品, 对于水产精深加工具有重要的理论与实践价值。

研究发现, 添加植物源的抗氧化活性成分至糜类制品中, 可改善其产品品质, 比如, 植物多糖可以改善鸡肉肠的弹性与咀嚼性^[6]; 添加多糖能够改变猪肉香肠的硬度、弹性、咀嚼性等质构特性, 并能有效改善肉制品的水分流失情况^[7]; 添加多糖还能显著改善鲤鱼鱼糜制品中肌原纤维蛋白的凝胶特性^[8]。

菊苣多糖(chicory polysaccharide, CP)是一种来自菊科菊苣植物的多糖成分, 具有抗氧化、降血糖、降血脂、抗肿瘤以及提高机体免疫力等生物学活性^[9]。CP常被作为益生菌、脂肪替代物、糖替代物、质构调节剂用于功能性食品的开发, 以便改善健康, 健脾益胃^[10-11]。有研究^[12]发现, CP与水完全混合后能使食品具有光滑的口感, 是一种优良的脂肪替代物。目前, 有关天然植物多糖CP在蓝圆鲈鱼糜制品中的应用尚未见报道, 且以往有关于蓝圆鲈加工的相关研究多集中于干制或漂洗某个工艺点的改进, 或是基于产品单纯某个质构特性的优化改进, 对于蓝圆鲈制品的加工贮藏特性未见系统性的研究。

试验拟选用蓝圆鲈作为原材料, 采用Box-Behnken结合Matlab, 基于质构(弹性、咀嚼性、硬度)综合评分, 优化CP蓝圆鲈鱼丸的加工工艺, 同时考察CP添加量对蓝圆鲈鱼丸贮藏期间滴水损失率、pH值、TVB-N值和TBARS值的影响, 以期对蓝圆鲈等低值鱼的高值化利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

冰鲜野生蓝圆鲈(每条体长20~25 cm, 体重60~80 g)、海天牌玉米淀粉、粤盐牌食盐、一诺牌复合磷酸盐: 市售;

菊苣多糖(CP): 平均聚合度 ≥ 23 , 多聚果糖 $\geq 94.5\%$, 水分 $\leq 4.5\%$, 灰分 $\leq 0.2\%$, 羟自由基清除率 IC_{50} 值为1.36 mg/mL, 大闽食品(漳州)有限公司;

无水乙醇、磷酸缓冲液、亚甲基蓝、戊二醛等: 分析纯, 西陇科技股份有限公司。

1.2 试验设备

数显匀浆机手持分散机: T50型, 德国IKA公司;

紫外可见分光光度计: T6型, 北京谱析通用仪器有限公司;

质构仪: CT3-10K型, 美国博勒飞公司;

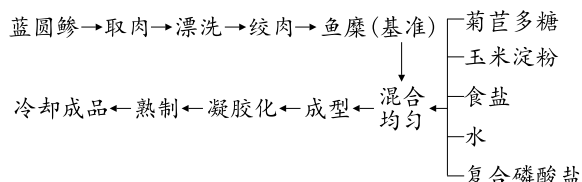
智能人工气候箱: PRX-250B型, 宁波赛福实验仪器有限公司;

生物数码显微镜: DM500-ICC50W型, 徕卡显微系统有限公司;

扫描电子显微镜: JSM-6010LA型, 日本JEOL公司。

1.3 试验方法

1.3.1 蓝圆鲈鱼丸制作工艺流程及操作要点



操作要点:

(1) 取肉: 将冰鲜蓝圆鲈去头、去皮、去内脏, 脱骨取肉。

(2) 漂洗: 将取出来的鱼肉置于10%的冰盐水(2~4℃)中漂洗10 min, 以除去血水、杂质。

(3) 绞肉: 将漂洗好的鱼肉沥干后, 13 000 r/min匀浆2 min, 绞成鱼糜状。

(4) 混合搅拌: 以鱼糜为基准, 向鱼糜中添加6% CP、20%玉米淀粉、3%盐、20%水、0.3%复合磷酸盐, 充分混合, 搅拌均匀。

(5) 成型: 将搅拌均匀的原料揉成直径约为2 cm的鱼丸。

(6) 凝胶化: 将成型的鱼丸于55℃水浴锅中凝胶化18 min。

(7) 沸水煮: 100℃沸水中煮10 min。

(8) 冷却成品: 室温下冷却。

1.3.2 单因素试验 分别考察CP添加量(2%~10%)、玉米淀粉添加量(10%~30%)、盐添加量(1%~5%)、水添加量(10%~30%)、复合磷酸盐添加量(0.1%~0.5%)和鱼丸凝胶化温度(35~75℃)对CP鱼丸质构综合评分的影响。

1.3.3 CP蓝圆鲈鱼丸质构测定及综合评分计算 将CP鱼丸样品切成2 cm×2 cm×2 cm的正方体, 使用质构仪(TA39小直径圆柱形探头)进行TPA质构测试, 采用统计学中的“因子分析法”^[13]提取质构指标(硬度、内聚性、弹性、咀嚼性)的主成分公因子, 以每个公因子的方差贡献率为权重, 建立鱼丸质构综合评分模型, 评定鱼丸综合指标得分。质构参数: TPA质构分析, 目标2.0 mm, 等待时间0 s, 触发点负载0.05 N; 测试测度1.00 mm/s, 返回速度1 mm/s, 循环次数2.0, 同一触发点(真); 预测试速度2 mm/s,

夹具 TA-RT-KIT,负载单元 10 000 g。

1.3.4 响应面试验 根据单因素试验结果,选取水添加量、玉米淀粉添加量和 CP 添加量为考察变量,以 CP 鱼丸质构综合得分作为响应值,进行三因素三水平响应面优化试验。

1.3.5 Matlab 优化试验 通过编写程序代码,计算水添加量、玉米淀粉添加量和 CP 添加量对 CP 蓝圆鲈鱼丸质构综合评分(Y)的四维和三维交互影响,并进行验证实验。

1.3.6 光学显微镜和扫描电镜观察 CP 蓝圆鲈鱼丸微观结构 参照刘树萍等^[14]的方法。

1.3.7 蓝圆鲈鱼丸贮藏期间品质特性测定

(1) 贮藏条件:在优化试验基础上,以最优 CP 添加量(7.9%)的鱼丸作为试验组,以不添加 CP 的样品作为对照组,将 EG、CG 样品于 4℃密封贮藏 10 d,定期测定鱼丸样品的相关理化指标。

(2) 滴水损失:以样品贮藏前后质量差值的占比表示^[15],按式(1)计算滴水损失。

$$S = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

S——滴水损失,%;

W_1 ——样品初始贮藏时的质量,g;

W_2 ——样品贮藏 10 d 后,用滤纸吸取表面水分后的质量,g。

(3) pH 值:采用 pH 计法。

(4) 挥发性盐基总氮(TVB-N)含量:按 GB 5009.228—2016 执行。

(5) 丙二醛(TBARS)值:按 GB 5009.181—2016 执行。

1.3.8 数据处理 试验结果用平均值±标准差表示,每组试验重复 3 次。采用 SPSS 22.0 软件进行数据显著性分析($P<0.05$ 为差异显著)。采用“因子分析法”提取质构指标主成分公因子,评定鱼丸产品的综合指标得分。采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行响应面优化试验设计。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 CP 添加量对鱼丸质构综合指标的影响

(1) 鱼丸质构:由表 1 可知,当 CP 添加量为 2%~10% 时,随着 CP 添加量的增加,蓝圆鲈鱼丸的 3 个质构指标均呈先增大后减小趋势($P<0.05$),当 CP 添加量为 4% 时,鱼丸的咀嚼性和硬度最大,当 CP 添加量为 6% 时,鱼丸的弹性最大。

(2) CP 鱼丸质构综合评分模型的建立:根据标准,一般 KMO 统计量 >0.5 就可以做因子分析。由表 2 可知,CP 蓝圆鲈鱼丸的质构指标降维模型显著($P<0.05$),说明该试验适用于因子分析。

由图 1 可知,特征值曲线只有一个因子的特征值 >1 ,

表 1 CP 添加量对鱼丸弹性、咀嚼性和硬度的影响[†]

Table 1 Effects of CP addition on elasticity, chewiness and hardness of fish balls

CP 添加量/%	弹性	咀嚼性/N	硬度/N
2	1.74±0.015 ^a	1.17±0.058 ^b	0.96±0.096 ^b
4	1.76±0.047 ^a	1.36±0.058 ^a	1.12±0.042 ^a
6	1.80±0.032 ^a	0.97±0.057 ^c	0.82±0.093 ^c
8	1.57±0.030 ^b	0.67±0.057 ^d	0.60±0.010 ^d
10	1.52±0.068 ^b	0.53±0.058 ^e	0.56±0.008 ^d

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 2 质构指标降维模型的 KMO 和 Bartlett 球形检验

Table 2 KMO and Bartlett sphere test for dimensionality reduction models of texture index

kaiser-meyer-olkin	Bartlett 球形度检验		
抽样充分性测度	近似卡方	自由度	显著性
0.719	11.256	3	0.010

3 个因子自然聚成一类,且均在主成分 1 上有较大载荷。由表 3 可知,经过方差最大化正交旋转后,1 个因子的累计方差贡献率达 93.309%。

根据载荷矩阵,以主成分每个因子的方差贡献率为权重,得到蓝圆鲈鱼丸质构综合评分的计算式为:

$$Y = 0.343X_1 + 0.349X_2 + 0.350X_3, \quad (2)$$

式中:

Y——质构综合评分;

X_1 ——弹性;

X_2 ——咀嚼性;

X_3 ——硬度。

将表 1 中各组数据代入式(2),得出不同 CP 添加量对产品质构综合评分的影响如图 2 所示。由图 2 可知,当 CP 添加量为 2%~10% 时,质构综合评分先升高后下降($P<0.05$),当 CP 添加量为 8% 时,鱼丸质构综合评分最高,此时蓝圆鲈鱼丸弹性适中,咀嚼性和硬度更适口。推测原因可能是添加量 8% 的 CP 多糖可将蓝圆鲈肌肉的蛋白质分子有效固定在 CP 形成的凝胶结构中^[16-17]。Ahmad 等^[18-19]研究表明,多糖类物质因其具备较好的增稠性、稳定性、乳化性以及凝胶性等功能特性,能够作为增稠剂、稳定剂、乳化剂、质地剂和凝胶剂广泛添加至各种肉丸类食品中,以提升产品品质。当 CP 添加量 $<8\%$ 时,CP 多糖不足以将鱼肉中蛋白分子有效固定,当 CP 添加量 $>8\%$ 时,过多的 CP 多糖与蛋白质分子所形成的凝胶结构未能形成最优的空间结构而导致鱼丸质构综合评分呈下降趋势^[16]。

2.1.2 玉米淀粉添加量对鱼丸质构综合指标的影响 由图 3 可知,蓝圆鲈鱼丸质构综合评分随玉米淀粉添加量的增加呈先上升后下降趋势($P<0.05$)。当玉米淀粉添加量

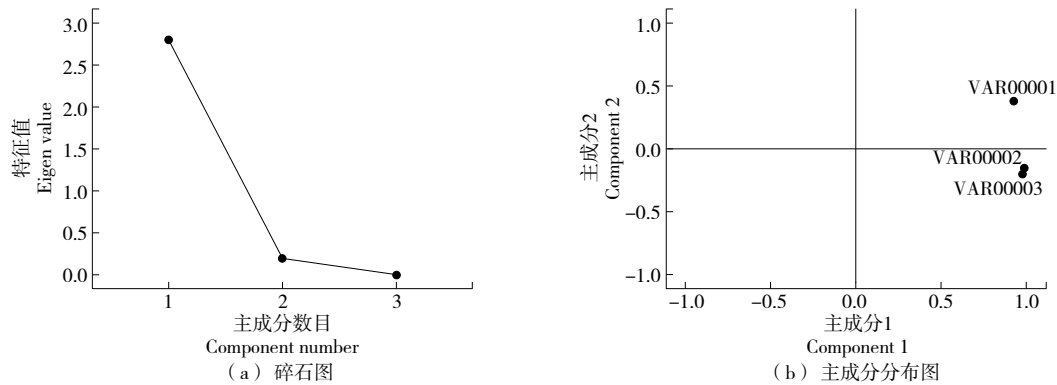


图1 因子分析的碎石图 and 主成分分布图

Figure 1 Factor analysis of lithotripsy and the distribution of principal component

表3 主成分分析的总方差

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差 / %	累积方差 / %	合计	方差 / %	累积方差 / %
1	2.799	93.309	93.309	2.799	93.309	93.309
2	0.190	6.344	99.653	0.190	6.344	99.653
3	0.010	0.347	100.000			

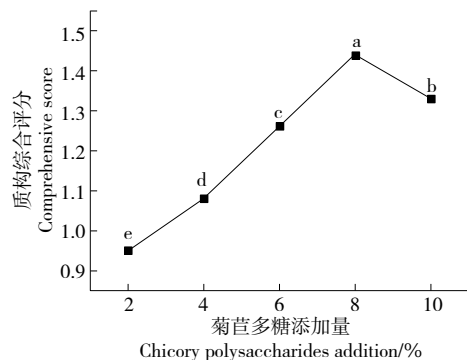
字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图2 CP添加量对鱼丸质构综合评分的影响

Figure 2 Effects of CP addition on the texture comprehensive score of fish balls

为25%时,质构综合评分最高,此时鱼丸组织形态较好,切面致密光滑。这可能是蓝圆鲈鱼糜加热时,肌肉蛋白会变性展开,彼此交联形成蛋白凝胶三维网络结构,而此时添加的鱼糜淀粉颗粒溶胀,并填充至凝胶网络结构空隙中,使得凝胶网络结构更加致密,从而增加了整个体系的抗压性和凝胶强度^[20]。玉米淀粉添加量过多时,蛋白凝胶网络已无法容纳和支撑多余的淀粉,也会导致鱼丸的凝胶强度下降。

2.1.3 盐添加量对鱼丸综合指标的影响 由图4可知,随着盐添加量的增加,鱼丸的质构综合评分逐渐升高,且盐

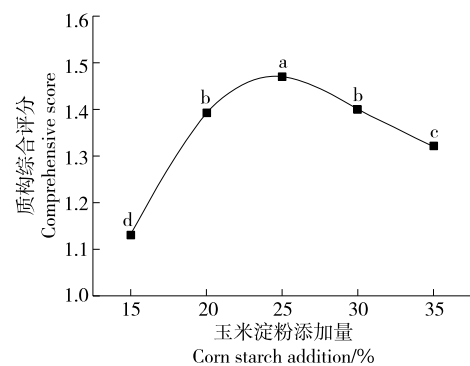
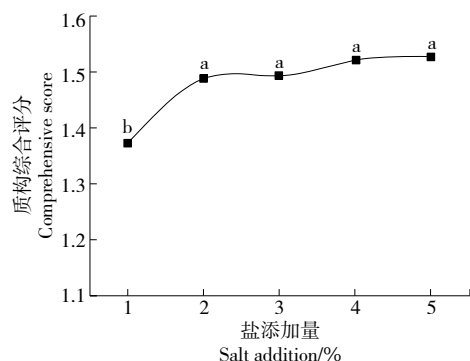
字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图3 玉米淀粉添加量对鱼丸质构综合评分的影响

Figure 3 Effects of corn starch addition on the texture comprehensive score of fish balls

添加量为2%~5%的质构综合评分差异不显著。肌原纤维蛋白是一种盐溶性蛋白,对鱼糜凝胶的形成起着重要作用,添加适量的食盐能够促使肌原纤维蛋白溶出,从而赋予蓝圆鲈鱼丸较好的弹性、咀嚼性和硬度^[21]。当食盐添加量为1%~2%时,鱼糜中的盐溶蛋白能够高效溶出,其通过与CP多糖形成较稳定的凝胶结构而提升鱼丸的质构综合评分。综合考虑,选择2%盐添加量进行后续试验。

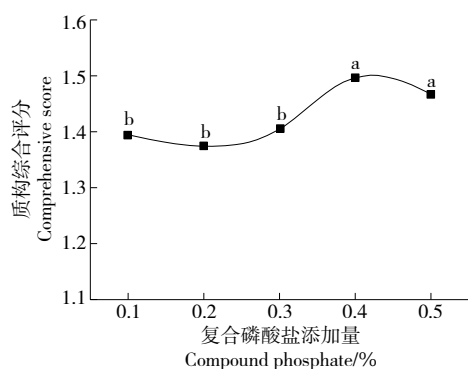
2.1.4 水添加量对鱼丸综合指标的影响 由图5可知,当水添加量为10%~30%时,随着水添加量的增加,蓝圆鲈鱼丸的质构综合评分先上升后下降 ($P < 0.05$),且在水添加量为15%时达最大值。加入适量的水不仅可以增大多糖的溶解,促进淀粉糊化,还能够加速食盐和复合磷酸盐的溶解及扩散,增大盐溶性蛋白的溶出量,从而提升鱼丸蛋白质凝胶网络结构的牢固性^[13]。当水添加量 $< 15\%$ 时,CP多糖溶解不足,且盐溶性蛋白溶出率受到负面影响,CP多糖与鱼丸蛋白形成的凝胶网络结构不够牢固,影响了鱼丸的质构综合评分;水添加量过多时,CP多糖浓度下降,其与鱼肉蛋白形成的凝胶网络结构不够密实,降低了鱼丸的质构综合品质。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 盐添加量对鱼丸质构综合评分的影响

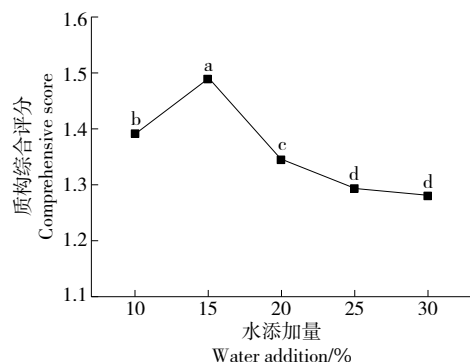
Figure 4 Effects of salt addition on the texture comprehensive score of fish balls



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 6 复合磷酸盐对鱼丸综合评分的影响

Figure 6 The effect of compound phosphate addition on the texture comprehensive score of fish balls



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

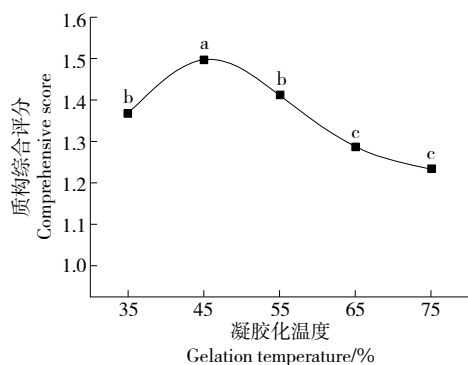
图 5 水添加量对鱼丸质构综合评分的影响

Figure 5 Effects of water addition on the comprehensive score of fish balls

2.1.5 复合磷酸盐添加量对鱼丸综合指标的影响 由图 6 可知,随着复合磷酸盐用量的增加,鱼丸质构综合评分呈先升高后下降趋势,当复合磷酸盐添加量为 0.4% 时,鱼丸质构综合评分达最大。复合磷酸盐是被广泛用于肉制品的合成添加剂,具有较优的保水能力和抗氧化活性,能够增加肌原纤维蛋白溶解度和提取率^[22]。当复合磷酸盐添加量为 0.1%~0.4% 时,随着添加量的增大,鱼丸的保水性增强,鱼丸中的肌原纤维蛋白溶解度不断增大,鱼丸凝胶更加稳固,提升了其质构综合评分;继续添加复合磷酸盐会使肉丸持水能力下降,降低鱼丸的质构综合得分^[13,22]。

2.1.6 凝胶化温度对鱼丸综合指标的影响 由图 7 可知,随着凝胶化温度的升高,鱼丸的质构综合评分呈先上升后下降趋势,且在 45 °C 时鱼丸质构综合评分达最大值。由于温度 < 50 °C 时为凝胶化温度带,因此,鱼糜加热至 45 °C 时,肌动球蛋白在受热的情况下,蛋白三级结构逐渐松散,分子间彼此架桥形成复杂的三维网状结构,此时自由水被该网络结构阻封不能流动,从而形成具有弹性的

凝胶状混合物;继续升高温度至 50~70 °C 时,鱼糜凝胶的网状结构在自身内源酶的作用下发生断裂,凝胶稳定性发生劣变^[23]。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 7 凝胶化温度对鱼丸质构综合评分的影响

Figure 7 The effect of gelation temperature on the texture comprehensive score of fish balls

2.2 Box-Behnken 结合 Matlab 优化试验结果

2.2.1 Box-Behnken 响应面模型的建立 在单因素试验基础上,根据 Box-Behnken Design 原理,选择水添加量、玉米淀粉添加量、CP 添加量作为考察因素,以质构综合评分值为指标,进行三因素三水平响应面优化试验。试验因素水平见表 4,试验设计及结果见表 5。

经数据分析,得到回归方程模型为:

$$Y = 1.49 - 0.023A + 0.015B + 0.008125C + 0.012AB + 0.025AC - 0.0015BC - 0.015A^2 - 0.087B^2 - 0.064C^2. \quad (3)$$

2.2.2 响应面模型的显著性检验 由表 6 可知, A、B²、C² 对模型影响极显著 ($P < 0.01$), AC 对模型影响显著 ($P < 0.05$), B、C、AB、BC、A² 对模型影响不显著。模型 P 值 < 0.01, 极显著;失拟项 $P > 0.05$, 不显著,表明试验结果和数学模型有良好的拟合性。 R^2 为 0.963 0,表明回归方程较

表4 因素水平表
Table 4 Factor level table

水平	A 水添加量/%	B 玉米淀粉添加量/%	C CP添加量/%
—1	12	22	7
0	15	25	8
1	18	28	9

表5 响应面试验设计及结果
Table 5 Design and result of response surface optimization

试验号	A	B	C	质构综合评分
1	—1	—1	0	1.415
2	1	—1	0	1.344
3	—1	1	0	1.403
4	1	1	0	1.380
5	—1	0	—1	1.448
6	1	0	—1	1.352
7	—1	0	1	1.415
8	1	0	1	1.418
9	0	—1	—1	1.302
10	0	1	—1	1.354
11	0	—1	1	1.321
12	0	1	1	1.367
13	0	0	0	1.484
14	0	0	0	1.492
15	0	0	0	1.463
16	0	0	0	1.520
17	0	0	0	1.478

为可靠; R^2_{Adj} 为0.915 3,回归方程校正后可以解释91.53%的响应值的变化;信噪比为 $12.25>4$,表明该方程有较好的拟合度与可信度;变异系数为1.33%,说明回归方程的置信度较高。

2.2.3 Matlab 试验结果 通过Matlab编程,得到玉米淀粉添加量、水添加量和CP添加量对鱼丸质构综合评分的四维响应图如图8所示。当质构综合评分的理论最大值为1.497 3时,由系统矩阵计算出条件参数为:水添加量12.41%,玉米淀粉添加量25.09%,CP添加量7.90%。

为了更好地描述和分析数据之间的交互作用,分别绘制了较低CP添加量(7%)、中等CP添加量(8%)和较高CP添加量(9%)3种情况下因素间交互作用的三维响应面和平面投影图(图9)。当CP添加量为7%时,固定玉米淀粉添加量,随着水添加量的增加,质构综合评分不断降低;固定水添加量,随着玉米淀粉添加量的增加,质构综合评分先上升后下降;此条件下,质构综合评分为1.236 2~1.448 3;当CP添加量为7%,水添加量为12%~13%,玉米淀粉添加量为24.1%~26.0%时,质构综合评分最高。同理,当CP添加量为8%时,交互作用与CP添加量为7%时相似;固定玉米淀粉添加量,随着水添加量的

表6 方差分析[†]
Table 6 Variance analysis

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.064 000	9	0.007 117	20.22	0.000 3	**
A	0.004 371	1	0.004 371	12.42	0.009 7	**
B	0.001 860	1	0.001 860	5.29	0.055 1	
C	0.000 528	1	0.000 528	1.50	0.260 2	
AB	0.000 576	1	0.000 576	1.64	0.241 6	
AC	0.002 450	1	0.002 450	6.96	0.033 5	*
BC	0.000 009	1	0.000 009	0.026	0.877 5	
A ²	0.000 938	1	0.000 938	2.63	0.149 0	
B ²	0.032 000	1	0.032 000	90.70	<0.000 1	**
C ²	0.017 000	1	0.017 000	49.50	0.000 2	**
剩余	0.002 464	7	0.000 352			
失拟	0.000 685	3	0.000 228	0.51	0.694 8	不显著
纯误差	0.001 779	4	0.000 445			
总误差	0.067 000	16				

[†] *为显著($P<0.05$),**为极显著($P<0.01$); $R^2=0.963 0$,
 $R^2_{Adj}=0.915 3$, $AP=12.25$, $CV=1.33\%$ 。

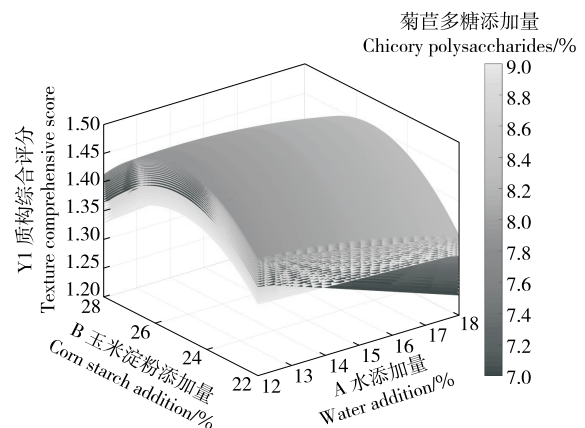


图8 玉米淀粉添加量、水添加量和CP添加量对鱼丸质构综合评分的四维响应图

Figure 8 The four-dimensional responses of cornstarch, water and CP to the composite score of fish balls

增加,质构综合评分不断降低;固定水添加量,随着玉米淀粉添加量的增加,质构综合评分先升高后降低;此条件下,质构综合评分为1.334 9~1.496 7;当玉米淀粉添加量为24.2%~25.9%,水添加量为12.0%~14.7%时,质构综合评分达到最大值,且玉米淀粉添加量与水添加量的相互作用也较为明显。当CP添加量为9%时,质构综合评分先升高后降低,为1.304 9~1.431 8;当水添加量为14.0%~16.2%,玉米淀粉添加量为24.8%~25.7%时,质构综合评分接近最大值。综上,当CP添加量为8%,水添加量为12.0%~14.7%,玉米淀粉添加量为24.2%~25.9%时,质构综合评分能获得较大理论值(1.496 7~1.497 3)。

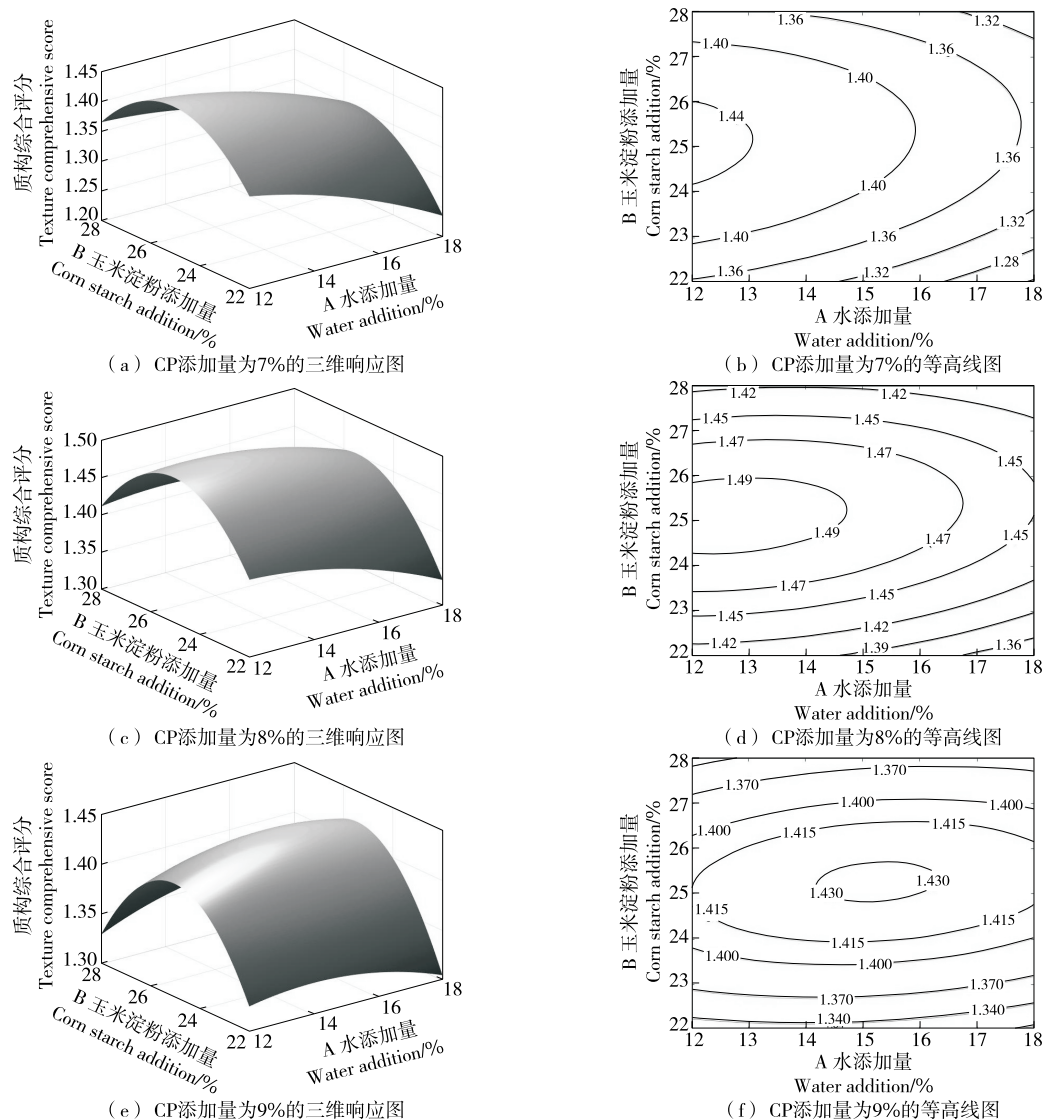


图9 不同CP添加量下因素间交互作用的三维响应面和等高线图

Figure 9 The three-dimensional response surface and contour plots of the interaction between factors under the condition of different CP addition amount

2.2.4 验证实验 根据 Box-Behnken 结合 Matlab 分析结果,得到 CP 蓝圆鲈鱼丸最佳加工工艺条件为:水添加量 12.41%,玉米淀粉添加量 25.09%,CP 添加量 7.90%,预测质构综合评分为 1.497 3,实际质构综合评分为 1.489 5 ± 0.017 0,与预测值较接近,表明模型可靠。

2.3 CP 蓝圆鲈鱼丸的微观结构分析

由图 10 可知,添加 CP 后,鱼丸的颗粒状较未添加组的增多,且质地更加致密,孔洞面积和数量减少。由图 11 可知,未添加 CP 的鱼丸横截面疏松多孔,结构松散粗糙,此时鱼丸内部凝胶网络结构不够细致紧密,孔径不均匀,形成了较多且相对较大的腔室结构,而添加 7.9% CP 后的鱼丸横截面平坦光滑,微观结构细密均匀,与任多多等^[24]的研究结果一致,说明此时鱼丸内部凝胶网络相互交联

程度增强^[25-26],再次验证了添加适量的 CP 有利于改善蓝圆鲈鱼丸的整体结构。

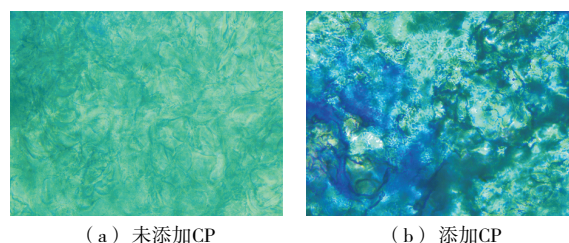


图 10 光学显微镜观察鱼丸微观结构

Figure 10 Microstructure of fish balls observed by optical microscope

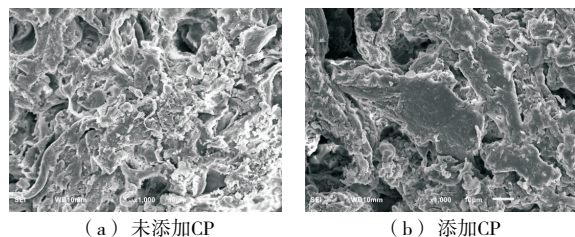


图 11 扫描电镜观察鱼丸微观结构

Figure 11 Microstructure of fish balls observed by SEM (1 000×)

2.4 CP对蓝圆鲈鱼丸贮藏品质的影响

2.4.1 滴水损失 由图 12可知,4℃贮藏期间,试验组和对照组蓝圆鲈鱼丸的滴水损失均呈显著上升趋势($P<0.05$),对照组的滴水损失高于试验组且上升得更快。CP是一种多聚果糖,具有较强的吸湿性和自由水结合能力,故常被作为保水剂降低产品的水分活度值,因此,添加CP的试验组在贮藏过程中较对照组有较低的滴水损失率^[27]。

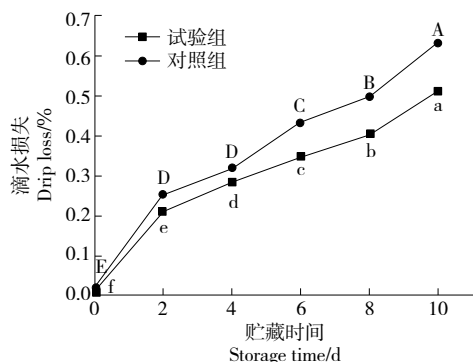
字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 12 贮藏期间鱼丸滴水损失的变化

Figure 12 Changes of drip loss of fish balls during storage

2.4.2 pH值 由图 13可知,冷藏期间,试验组和对照组蓝圆鲈鱼丸的pH值均呈先略微升高后整体下降的趋势($P<0.05$)。贮藏前期,对照组的pH值较试验组的略高;贮藏4d后,对照组的pH值较试验组的大幅下降。贮藏初期,鱼丸中的蛋白质和氨基酸在细菌代谢的作用下被分解成含氮的小碱性化合物,导致pH值升高,随后pH值降低是由于细菌代谢利用了小分子有机物,发酵产生了酸^[28]。

2.4.3 TVB-N值 由图 14可知,随着贮藏时间的延长,试验组和对照组的TVB-N值均逐渐升高,且对照组的TVB-N值高于试验组的。贮藏时鱼丸中的蛋白质和氨基酸在细菌代谢的作用下被分解成含氮的小碱性化合物,故TVB-N值升高^[28]。

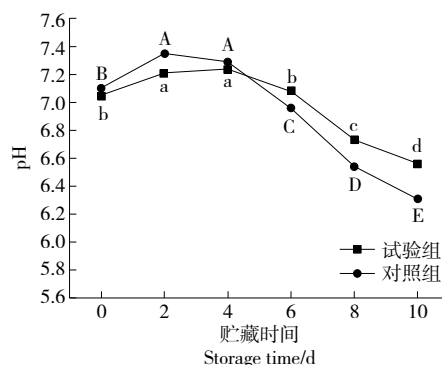
字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 13 贮藏期间鱼丸pH值的变化

Figure 13 Change of pH of values fish balls during storage

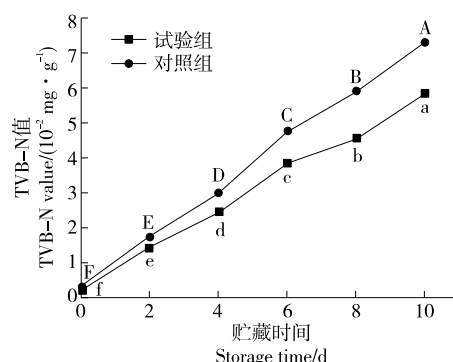
字母不同表示差异显著($P<0.05$)

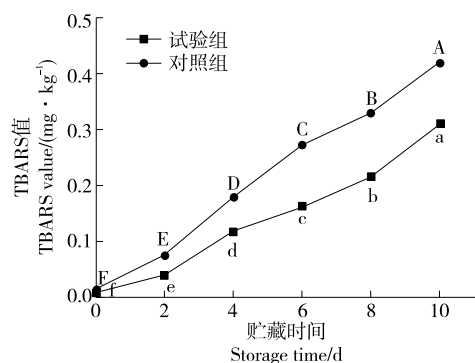
图 14 贮藏期间鱼丸TVB-N值的变化

Figure 14 Changes of TVB-N of fish balls during storage

2.4.4 TBARS值 由图 15可知,随着冷藏时间的延长,两组蓝圆鲈鱼丸的TBARS值显著升高($P<0.05$),且对照组的TBARS值高于试验组的,尤其是贮藏4d后TBARS值上升更显著。研究^[29]表明,菊苣具有药用特性以及许多生物学功能,如抗氧化、抗炎、降糖和降血脂作用等,可作为一种天然抗氧化剂用于抑制食品中蛋白质以及脂类的氧化变质。菊苣多糖是菊苣的主要功效成分,其抗氧化作用显著,在食品中适量添加不仅可以提升产品的营养品质,还能够减缓脂质等易腐成分的劣变。

3 结论

采用Box-Behnken设计结合Matlab分析法,基于质构(弹性、咀嚼性、硬度)综合评分,优化了菊苣多糖蓝圆鲈鱼丸的加工工艺,得到最优工艺参数为:水添加量12.41%、玉米淀粉添加量25.09%、菊苣多糖添加量7.90%、复合磷酸盐添加量0.4%、凝胶温度45℃,此时鱼丸质构综合评分为 1.4895 ± 0.0170 ,与预测值差异不显著,模型合理。光学显微镜和扫描电镜观察鱼丸微观结构显示,7.90%菊苣多糖添加组鱼丸较空白对照组能够显



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 15 贮藏过程中鱼丸 TBARS 值的变化

Figure 15 Changes of TBARS of fish balls during storage

著改善鱼丸的整体结构,使其微观结构细密均匀,内部凝胶网络相互交联程度增强。同时,菊苣多糖的添加可减小鱼丸在 4 °C 贮藏期间的滴水损失,维持 pH 值稳定,抑制挥发性盐基总氮和丙二醛值的升高,有效改善蓝圆鲹鱼丸的质构及耐贮藏性。后续可研究不同菊苣多糖组成及相对分子质量分布对蓝圆鲹鱼丸特性的影响及作用机制。

参考文献

- [1] WU R, CHEN L, LIU D, et al. Preparation of antioxidant peptides from salmon byproducts with bacterial extracellular proteases[J]. Marine Drugs, 2017, 15: 4.
- [2] 薛山. 蓝圆鲹高值化利用现状及趋势展望[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(3): 226-232.
XUE S. Current situation and trend expectation of high value utilization of round scad[J]. Storage and Process, 2020, 20(3): 226-232.
- [3] CHEN H, WANG S, ZHOU A, et al. A novel antioxidant peptide purified from defatted round scad (*Decapterus maruadsi*) protein hydrolysate extends lifespan in *Caenorhabditis elegans*[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 68: 1-11.
- [4] 黄茂坤, 陈晓婷, 潘南, 等. 蓝圆鲹热风干制工艺的优化及品质变化分析[J]. 武汉轻工大学学报, 2023, 42(2): 24-32.
HUANG M K, CHEN X T, PAN N, et al. Optimization of hot air drying process and analysis of quality change of *Decapterus maruadsi*[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2023, 42(2): 24-32.
- [5] WANG J, LI Z, ZHENG B, et al. Effect of ultra-high pressure on the structure and gelling properties of low salt golden threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) myosin[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 100: 381-390.
- [6] ALAEI F, HOJJATOLESAMI M, DEHKORDI S M H. The effect of inulin as a fat substitute on the physicochemical and

sensory properties of chicken sausages[J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(2): 512-519.

- [7] KEENAN D F, RESCONI V C, KERRY J P, et al. Modelling the influence of inulin as a fat substitute in comminuted meat products on their physicochemical characteristics and eating quality using a mixture design approach[J]. Meat Science, 2014, 96: 1 384-1 394.
- [8] 李明清, 孔保华, 王宇, 等. 菊粉对鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2010, 31(10): 105-112.
LI M Q, KONG B H, WANG Y, et al. Influence of inulin on the characteristics of common carp (*Cyprinus carpio*) myofibrillar protein gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(10): 105-112.
- [9] SANCHEZ-SAEZ C M, DE OLIVEIRA R A, PARK K J. Evaluation of chicory roots submitted to hot drying process and its optimization[J]. Journal of Food Process Engineering, 2015, 38(1): 57-66.
- [10] 薛山, 巩子童, 林靖娟, 等. 芽球菊苣根粗多糖提取工艺优化及其体外抗氧化活性和相对分子量分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 138-145.
XUE S, GONG Z T, LIN J J, et al. Optimization of extraction process of crude polysaccharide from chicory root of *Cichorium intybus* L. var. *foliosum* hegi, and analysis of antioxidant activity in vitro and relative molecular weight[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(10): 138-145.
- [11] SHOAIB M, SHEHZAD A, OMAR M, et al. Inulin: properties, health benefits and food applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 147: 444-454.
- [12] PAGLARINI C DE S, MARTINI S, POLLONIO M A R. Using emulsion gels made with sonicated soy protein isolate dispersions to replace fat in frankfurters[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 453-459.
- [13] 薛山, 谢建山. 基于质构优化蜜柚白瓢水不溶性膳食纤维兔肉丸制作配方[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 138-145, 151.
XUE S, XIE J S. Optimisation of the formulation of rabbit meatballs added with insoluble dietary fiber from white flesh of honey-pomelo based on texture[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 138-145, 151.
- [14] 刘树萍, 冯爽, 陆家慧, 等. 黑豆豆腐替代脂肪对肉丸品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 41-49.
LIU S P, FENG S, LU J H, et al. Effect of replacing fat with black bean tofu on quality characteristics of meatballs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 41-49.
- [15] HONIKEL K O. Reference methods for the assessment of physical characteristics of meat[J]. Meat Science, 1998, 49(4): 447-457.
- [16] DAS A, NANDA P K, MADANE P, et al. A comprehensive review on antioxidant dietary fibre enriched meat-based functional foods[J]. Trends in Food Science & Technology,

- 2020, 99: 323-336.
- [17] SANTHI D, KALAIKANNAN A, SURESHKUMAR S. Factors influencing meat emulsion properties and product texture: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(10): 2 021-2 027.
- [18] AHMAD A, KALEEM M. β -Glucan as a food ingredient[J]. Biopolymers for Food Design, 2018, 20: 351-381.
- [19] KAUR R, SHARMA M. Cereal polysaccharides as sources of functional ingredient for reformulation of meat products: a review[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 62: 103527.
- [20] 米红波, 王聪, 仪淑敏, 等. 淀粉在鱼糜制品中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(1): 291-295.
- MI H B, WANG C, YI S M, et al. Research progress on starch use in surimi seafood[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(1): 291-295.
- [21] LIU X, ZHANG T, XUE Y, et al. Changes of structural and physical properties of semi-gel from Alaska pollock surimi during 4 °C storage[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 772-782.
- [22] DUŠEK M, KVASNIČKA F, LUKÁŠKOVÁ L, et al. Isotachophoretic determination of added phosphate in meat products[J]. Meat Science, 2003, 65(2): 765-769.
- [23] 谭力, 周春霞, 洪鹏志. 淡水鱼鱼糜制品加工特性及品质影响因素[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 34-38.
- TAN L, ZHOU C X, HONG P Z. Research progresses on processing and utilization of freshwater fish surimi and surimi products[J]. Food & Machinery, 2018, 34(8): 34-38.
- [24] 任多多, 江伟, 孙印石, 等. 果胶的分类、功能及其在食品工业中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 438-446.
- REN D D, JIANG W, SUN Y S, et al. Research progress on the classification, function and application of pectin in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43 (3): 438-446.
- [25] LEE C H, CHIN K B. Changes in physicochemical properties of pork myofibrillar protein combined with corn starch and application to low-fat pork patties[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(1): 157-164.
- [26] AMAN H, NATIS M F, THAM Y, et al. Bacteria contamination analysis on the hands and bowls of meatball cart vendors: an observational descriptive study[J]. Gaceta Sanitaria, 2021, 35(4): 71-75.
- [27] 胡超, 白史旦, 游明鸿, 等. 菊苣多糖的研究进展[J]. 草业与畜牧, 2013(2): 44-48.
- HU C, BAI QI Q, YOU M H, et al. Research progress of polysaccharides in *Cichorium intybus* L. [J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2013(2): 44-48.
- [28] MANJU S, JOSE L, SRINIVASA GOPAL T K, et al. Effects of sodium acetate dip treatment and vacuum-packaging on chemical, microbiological, textural and sensory changes of Pearlsport (*Europlus suratensis*) during chill storage[J]. Food Chemistry, 2007, 102(9): 27-35.
- [29] GHOLAMI H, SAHARKHIZ M J, FARD F R, et al. Humic acid and vermicompost increased bioactive components, antioxidant activity and herb yield of Chicory (*Cichorium intybus* L.) [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2018, 14: 286-292.
- (上接第 55 页)
- [20] BOGOŽALEC K A, DEMŠAR T, ŠTEBIH D, et al. Digital PCR as an effective tool for GMO quantification in complex matrices[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 73-78.
- [21] DEMEKE T, LEE S J, ENG M. Increasing the efficiency of canola and soybean GMO detection and quantification using multiplex droplet digital PCR[J]. Biology, 2022, 11(2): 201.
- [22] BASANISI M G, BELLA G L, NOBILI G, et al. Application of the novel droplet digital PCR technology for identification of meat species[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(3): 1 145-1 150.
- [23] 陈佳, 秦丽, 刘浩, 等. 微滴式数字 PCR 定量检测欧洲甜樱桃中掺假苹果成分的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 349-355.
- CHEN J, QIN L, LIU H, et al. Quantitative detection of adulterated apple components in European sweet cherries by droplet digital PCR[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 349-355.
- [24] MAYER W, SCHULLER M, VIEHAUSER M C, et al. Quantification of the allergen soy (Glycine max) in food using digital droplet PCR (ddPCR)[J]. European Food Research and Technology, 2019, 245: 499-509.
- [25] CAU S, TILOCCA M G, SPANU C, et al. Detection of celery (*Apium graveolens*) allergen in foods of animal and plant origin by droplet digital PCR assay[J]. Food Control, 2021, 130: 108407.
- [26] DAGA C, CAU S, TILOCCA M G, et al. Detection of fish allergen by droplet digital PCR[J]. Italian Journal of Food Safety, 2018, 7(4): 7 264.
- [27] 陈佳. 樱桃制品中植物源性成分筛查及定量鉴别技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020: 22-23.
- CHEN J. Study on screening and quantitative identification of plant-derived ingredients in cherry products[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020: 22-23.
- [28] Codex Committee on Methods of Analysis and Sampling. Guidelines on performance criteria and validation of methods for detection identification and quantification of specific DNA sequences and specific proteins in foods: CAC/GL 74—2010 [S]. Rome: Codex Alimentarius, 2010: 10-11.