

封丘芹菜叶饼干制作方法的研究

刘庆伟¹, 董彦琪¹, 赵酒林¹, 马玮超¹, 杨天佑^{2*}

¹新乡市农业科学院, 河南 新乡

²河南科技学院生命科技学院, 河南 新乡

收稿日期: 2025年7月21日; 录用日期: 2025年8月20日; 发布日期: 2025年8月27日

摘要

本研究以饼干添加封丘贡芹(以下均简称: 封芹)叶泥、鸡蛋全蛋液(以下均简称: 鸡蛋液)、菜籽油、食盐为变量, 探索其对饼干感官品质的影响, 通过正交试验结合Box-Behnken反应面分析法优化改良传统配方, 得到封芹叶饼干的最佳配方为: 封芹叶泥20%, 鸡蛋液58%, 菜籽油39%, 食盐1.90%, 通过标准化工艺、多维度评价验证表明, 其感官评分可达90分, 且营养特征显著优于空白传统配方, 该产品兼具高纤维、低饱和脂肪酸及抗氧化功能, 对高糖、高脂人群友好, 解决了芹菜叶废弃造成的资源浪费与环境污染问题, 为功能性饼干的工业化生产提供了理论依据。

关键词

封芹叶泥, 饼干, 封丘贡芹, 最佳配方, 正交试验, 响应面分析法

A Preparation Method for Whole Grain Biscuits with Celery Leaf Puree

Qingwei Liu¹, Yanqi Dong¹, Jiulin Zhao¹, Weichao Ma¹, Tianyou Yang^{2*}

¹Xinxiang Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang Henan

²College of Life Sciences, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang Henan

Received: Jul. 21st, 2025; accepted: Aug. 20th, 2025; published: Aug. 27th, 2025

Abstract

This study investigated the effects of adding Fengqiu Gongqin leaf puree, whole egg liquid (hereafter referred to as egg liquid), rapeseed oil, and salt as variables on the sensory quality of biscuits. Through orthogonal experiments combined with Box-Behnken response surface methodology, the optimal formula for whole grain biscuits with celery leaf puree was determined: celery leaf puree (20%),

*通讯作者。

文章引用: 刘庆伟, 董彦琪, 赵酒林, 马玮超, 杨天佑. 封丘芹菜叶饼干制作方法的研究[J]. 农业科学, 2025, 15(8): 1062-1078. DOI: 10.12677/hjas.2025.158133

egg liquid (58%), rapeseed oil (39%), and salt (1.90%). Standardized production processes and multi-dimensional evaluations confirmed that the sensory score of the optimized product reached 90 points, with significantly improved nutritional characteristics compared to traditional recipes. The product is rich in fiber, low in saturated fatty acids, and exhibits antioxidant properties, making it suitable for individuals with high sugar or fat intake. Additionally, this innovation addresses resource waste and environmental pollution caused by discarded celery leaves, providing a theoretical basis for the industrial production of functional biscuits.

Keywords

Celery Leaf Puree, Biscuits, Fengqiu Gongqin, Optimal Formula, Orthogonal Experiment, Response Surface Methodology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

封丘贡芹又名香芹、蒲芹、药封芹，简称封芹，作为地理标志农产品，在多个历史时期获得殊荣。本研究将小麦粉混合玉米粉作为主要原料，辅以一定比例的封芹菜叶泥、鸡蛋液、菜籽油经过烘焙制作形成封芹叶饼干；以感官评价为参考，用单因素分析法配合响应面试验来确定和改良配方，最后对创新最佳配方烘焙出的产品的各项理化指标，进行了细致的质量检验和分析，以期获得一种健康态功能性饼干[1][2]，为制作封芹叶功能性饼干工艺流程研究提供理论依据；一直以来芹菜都有食茎弃叶的情形，形成大量芹菜叶废弃物，不仅浪费且产生亚硝酸盐污染[3][4]。研究表明，以封芹叶为主要原料制作的封芹叶饼干，能使面团迅速发酵凝固成型又能增添饱腹感，预防便秘，促进肠道健康，增加饱腹感，降低食物摄入[5]-[8]；降低血糖，减缓糖分吸收，预防糖尿病，保护心脏，降低胆固醇，调节血压，增强免疫力，维持肠道微生物平衡[9]-[12]等等，对人身有多重益处。

在食品生产中，利用特种添加物开发新型功能性食品已有许多实例。例如，红枣粉披萨[13]、葡萄籽粉面包[14]、榛子皮酸奶[15]、绿茶啤酒等等，以及多种植物蛋白和膳食纤维添加在饼干和各类食品中的应用都表明，适当添加特殊的材料不仅能够提升产品的营养价值，还能增加它们的保健功能[16]。这些研究都为封芹叶饼干的研发提供了理论依据和实践指导。

我们通过感官评价、配方优化，旨在开发一种营养价值、口感兼备的封芹叶功能性饼干。在试验过程中，重点考虑封芹叶的添加对饼干营养价值以及保健功能的影响，以期获得口感、营养兼具的封芹叶饼干，并能改善一部分芹菜叶废弃的现状。

综上所述，封芹叶饼干的研发不仅具有现实意义，也与当前食品工业发展的大体趋势相符。通过本研究，有望为封芹叶的深度开发和饼干产业的创新发展提供新的思路和方法。

2. 材料与方法

2.1. 主要试验材料

五得利精制弱筋小麦专用粉——五得利集团新乡面粉有限公司；封丘贡芹——河南省封丘县贡芹合作社；玉米粉、食盐、鸡蛋、小苏打、酵母、山东鲁花集团“厨中香”非转基因菜籽油，均为市售食品级。

2.2. 主要仪器与试剂

仪器: JYL-YZ01 真空破壁料理机——九阳股份有限公司; 俊媳妇家用压面机——浙江俊媳妇厨具有限公司; 美的 G3EPro 烤箱——广州美的智慧家居有限公司; 华志 PTX-JA1000S 千分之一电子天平——上海实润实业有限公司; 右科 DRP-80L 恒温培养箱; H-1650 台式离心机——上海芸进仪器设备有限公司; CXC-06 粗纤维测定仪——上海垣逸仪器有限公司; TMS-PRO 全自动纤维测定仪质构仪——北京力高泰科技有限公司; EClassical3200 二元梯度配 DAD 自动系统高效液相色谱仪——大连依利特分析仪器有限公司; UV-1800 紫外-可见分光光度计——上海美谱达仪器有限公司; SC-80C 色差仪北京康光仪器有限公司; K9860 凯氏定氮仪——海能未来技术集团股份有限公司; SOX406 索氏提取装置——海能未来技术集团股份有限公司; ZDJ-4B 过氧化值滴定装置——上海雷磁仪器厂。

试剂: 硫酸(H_2SO_4)、氢氧化钠(NaOH)、硫代硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)、无水乙醚、 $\geq 99.5\%$ 硼酸(H_3BO_3)——国药集团化学试剂有限公司; $\geq 95\%$ DPPH、 $\geq 98\%$ ABTS、含 TPTZ 的 FRAP 试剂、HPLC 级 Trolox、 ≥ 2500 U/mg 胃蛋白酶、胰酶、胆盐——上海源叶生物科技有限公司; 14% w/w 三氟化硼甲醇溶液、 $\geq 98\%$ 硫代巴比妥酸(TBA)——上海麦克林生化科技有限公司; 脂肪酸甲酯(FAME)标准品(37 种混合标样)——上海安谱实验科技股份有限公司。

2.3. 封芹叶饼干的生产工艺流程

封芹叶饼干的生产工艺流程如图 1。

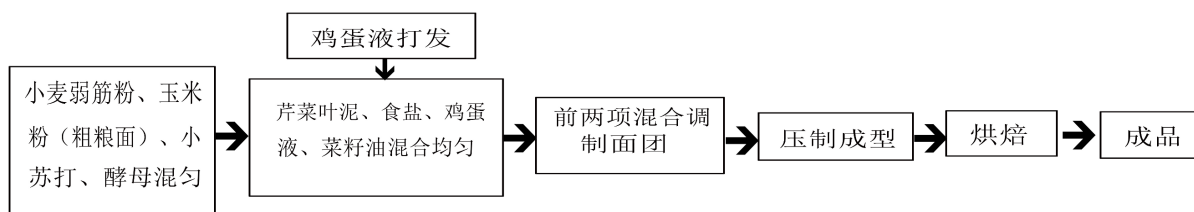


Figure 1. Process flow diagram
图 1. 工艺流程图

2.4. 操作要点

2.4.1. 调制面团

鸡蛋液打发后与封芹叶泥、食盐、菜籽油充分混合, 加入混合面粉中调制面团, 混合成面团时尽量减少和面次数做到无干粉即可, 压片机轧厚度为 2 mm 的面片, 撒上适量黑白芝麻, 切割成型, 摆入烤盘, 放置于醒发箱, 设置温度为 30℃, 静置 15~20 min 时间进行醒发。

1) 上述芹封芹叶泥制作方法

取处理干净的封芹叶(剔除不可食部分及须根、木质化病斑, 清洗沥干, 切 3 cm 段)。沸水中焯烫约 30 秒(叶片变软), 立即放入冰水冷却至大约 4℃。采用低速离心(约 1000 rpm, 10 秒)去除表面多余水分, 尽量保留内部水分。将沥干后的封芹段与冰水(芹叶与冰水比例约 5:1)及抗氧化剂混合。(抗氧化剂: 以芹菜总量为基准, 抗坏血酸 0.1%、柠檬酸 0.5%、EDTA 二钠 0.01%)使用料理机, 低速档位, 进行脉冲式打泥(运行 10 秒, 停机 10 秒, 重复 3~4 次, 控制打泥过程温度不超过 25℃), 可得到目数达为 20~30 mesh 含水量约 90%封芹泥。

2) 上述混合粉的成分

弱筋小麦粉和玉米粉各 50%, 其中苏打粉、酵母的使用量按照常规使用说明添加(一般来说以混合粉

总量为基准，苏打粉 0.3%、酵母 1%)。

2.4.2. 烤制

放入烤箱，控制上边和下边温度分别为 180℃和 160℃，经过 20~30 min 后，观察至饼干呈焦黄色，取出冷凉即可。

2.5. 单因素试验

在普通配方的基础之上进行单因素试验，参考已发表的关于饼干研究的相关文献[17]-[20]，确定与封芹叶饼干感官评分紧密相关的主要因素为：封芹泥添加量、鸡蛋液添加量、菜籽油添加量、食盐添加量。所以，用感官综合评分为参考依据，研究单因素封芹叶泥添加量(30%, 25%, 20%, 15%, 10%)、鸡蛋液(80%, 70%, 60%, 50%, 40%)、菜籽油(20%, 30%, 40%, 50%, 60%)、食盐添加量(4%, 3%, 2%, 1%, 0.5%)四个单因素对封芹叶饼干感官评分的影响。

封芹叶饼干感官评定

由 10 名经过专业培训的固定人员构成鉴评小组，对封芹饼干进行感官评分[21]-[25]，满分合计为 100 分，评分标准见下表 1。

Table 1. Fengqin leaf biscuit evaluation criteria form
表 1. 封芹叶饼干评分标准表

项目	评分标准	评分
外观形态 (满分 20)	外形无缺，纹理花型清晰，厚薄均匀，无形变，无起泡	19~25
	外形基本完整，厚薄均匀，少量鼓泡(小于 1/3)	9~18
	外形不完整破碎，厚薄不均匀，表面起泡	0~8
色泽 (满分 25)	呈黄绿色或浅绿色，色泽均匀，无焦胡色	19~25
	呈黄绿色或浅绿色，色泽不均匀，无焦胡色	9~18
	呈深绿色，色泽不均匀，焦胡色	0~8
滋味与口感 (满分 25)	蛋香浓郁，有封芹特有的香味，无异味，口感酥脆不硬，不黏牙	19~25
	蛋香味少许，封芹味淡，口感较酥脆，略硬，略黏牙	9~18
	无蛋香味，无封芹香，口感过硬并黏牙	0~8
组织 (满分 30)	断面结构多孔状，细密，无孔洞	19~25
	断面结构多孔状，细密，有小孔洞，无过大孔洞	9~18
	断面结构多孔状，不细密，有大孔洞	0~8

2.6. 数据处理

每组试验需重复进行 3 次，使用 Origin 2021 版软件作图和统计分析，再利用 Design-Expert V8.0.6 软件进行 Box-Benhknen 试验设计和分析。

3. 结果与分析

3.1. 封芹叶饼干创新配方的确定

3.1.1. 封芹叶泥添加量对饼干品质的影响

在封芹叶饼干基本配方条件下，选取封芹叶泥添加量 30%、25%、20%、15%、10%，菜籽油 40%，

鸡蛋液 50%，食盐 2%，用以探究封芹泥不同的添加量对饼干综合感官评分的影响。使用破壁机对封芹叶泥加工打碎为粒径 30 mesh 左右颗粒的封芹泥，封芹泥含水率约为 90%，面团的软硬度对饼干的成型至关重要，若加入封芹泥过多，面团容易起筋，饼干发硬，烘烤过程中容易变形，花纹模糊、质地不酥松，由图 2 可看出，当封芹泥添加量为 20% 的比例时，感官得分最高，添加过少封芹香气较淡，饼干整体口感不好，容易断裂和破碎，随着继续添加当添加量达到 20% 的时候封芹味和饼干整体感官评分最高，当继续增加添加量的时候，由于封芹泥水分含量偏高，导致做出的饼干胚不易成型，烘焙出的饼干花纹和纹路变浅或消失，外形不完整，变形有湿芯。

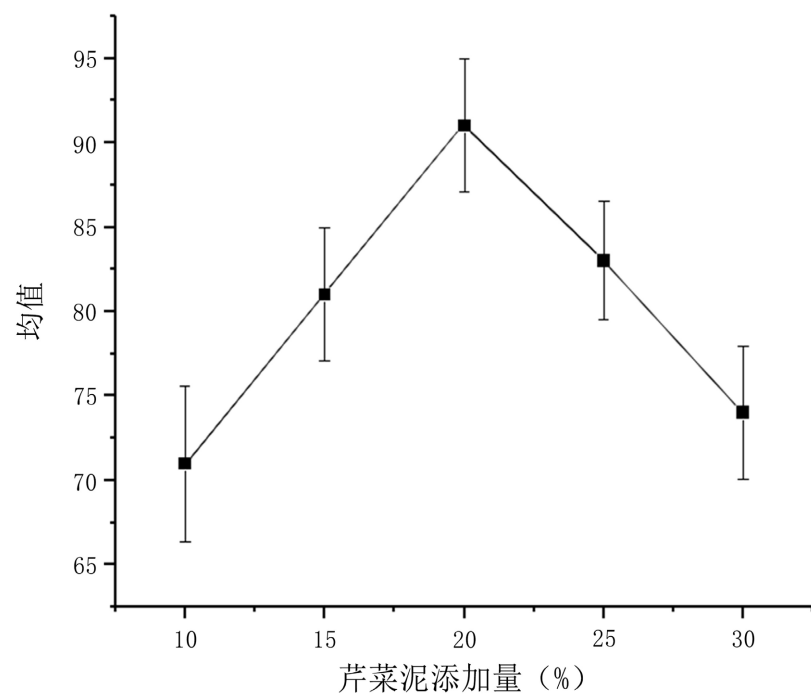


Figure 2. Sensory scores vs. Fengqin puree content
图 2. 封芹叶泥添加量对感官评价的影响

3.1.2. 鸡蛋液添加量对饼干品质的影响

在封芹叶饼干基本配方条件下，选取鸡蛋液添加量 80%、70%、60%、50%、40%，封芹叶泥 20%，菜籽油 40%，食盐 2%，用以探究封芹泥不同的添加量对饼干综合感官评分的影响。鸡蛋液对于饼干的色泽味道和口感影响很大，能够使饼干有诱人的蛋香味，蛋清能起到膨发的作用，蛋黄中的卵磷脂蛋白能够使水和油充分混合，形成稳定的乳化体系，缩短和面时间，保持面团的均一性和使得面团更加光滑，内部组织细腻、柔软，蛋黄中的胡萝卜素能够使饼干呈现出诱人的金黄色[24]。添加过少时成品口感硬实，缺乏疏松感，容易碎裂，颜色发白且不均匀，油、水无法更好的融合，面团不光滑，由感官测试评分表分析可得出，当鸡蛋液添加量在 50%~70% 时口味佳，见图 3。随着鸡蛋液的增加感官得分先升后降，饼干的硬度、弹性、黏聚性、胶黏性和咀嚼型先增后降，添加过多时有明显的蛋腥味，掩盖了封芹的清香，导致油水分离面团品质不匀且过于湿润无法保持花纹和性状，蛋液过多也会导致烘烤过程中水分散失过快，而使饼干过硬[25]-[28]。

3.1.3. 菜籽油添加量对饼干品质的影响

在封芹饼干基本配方条件下，选取菜籽油添加量 60%、50%、40%、30%、20%，封芹叶泥 20%，鸡

蛋液 50%，食盐 2%，用以探究封芹泥不同的添加量对饼干综合感官评分的影响，由表 2 和图 4 可以看出，菜籽油添加量为 40%时综合感官得分最高，随着菜籽油添加量的增加，饼干的感官得分先增加后减少，当菜籽油添加较少时，饼干不酥脆缺乏松软度，外观粗糙不光滑内部结构紧密缺乏层次感且烘烤、冷却过程中容易破裂[29]，当添加量在 40%时如果继续增加，感官得分呈下降趋势，过多的人菜籽油遮盖了封芹的风味过于油腻影响整体风味平衡，影响饼干的定型和可塑性[30] [31]。

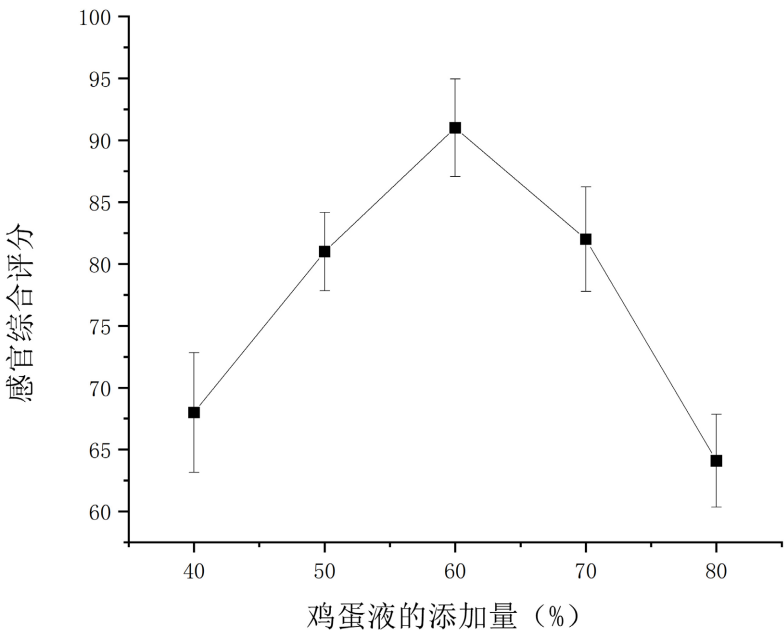


Figure 3. Sensory score vs. egg liquid
图 3. 鸡蛋液添加量对感官评分的影响

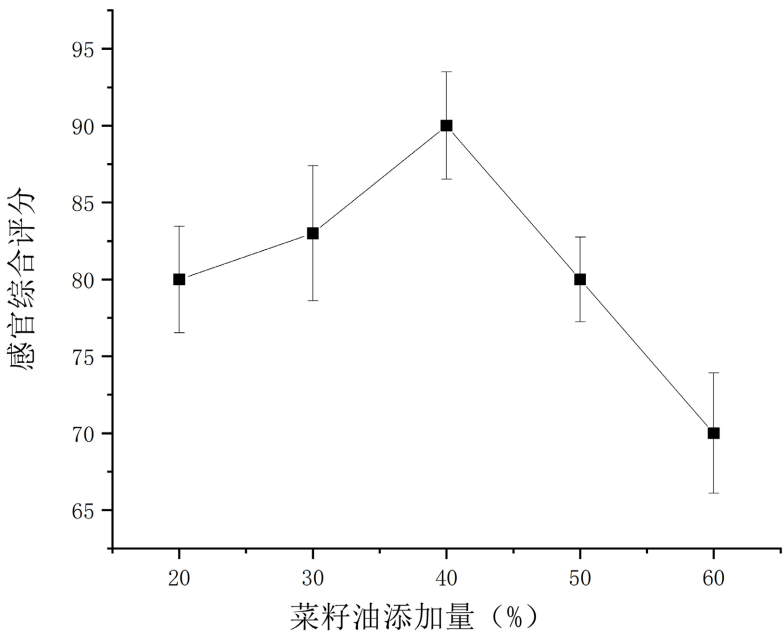


Figure 4. Sensory properties vs. rapeseed oil
图 4. 菜籽油添加量对感官评分的影响

3.1.4. 食盐的添加量对饼干品质的影响

在封芹叶饼干基本配方条件下,选取 4%、3%、2%、1%、0.5%食盐添加量,以及封芹泥 20%,菜籽油 40%,鸡蛋液 50%,对比食盐的不同添加量对饼干感官评分、弹性、胶黏性、硬度和咀嚼性的影响,结果在图 5 可以看出,当食盐的添加量为 1%~2%时,饼干的感官得分最高。由于我们制作饼干其中一项重要原料为封芹,其本身含有钠元素较多,当不加盐时无法激发封芹的咸味,对食物味道影响微小,但是随着食盐添加数量的增加达到临界值时,芹菜本身所含钠元素我们就需要考虑,故以芹菜为原料的食品所需含盐量一般小于其他食品所需盐分,食盐添加量过少时寡而无味,逐渐加量感官评分先增后减,在食盐的添加数量达到 2%时感官评分,如果食盐继续加量,饼干的感官评分显著下降,味道过咸、微苦,口感偏重。烘焙饼干时,适量的食盐添加量[32],不仅能够增加饼干的筋度有利于面团的延展,还能改善和调节饼干的风味。但食盐的添加量过多时,会导致面团面筋筋力过大,不易压制面胚,或者面胚压制好后易变形[33]-[35]。

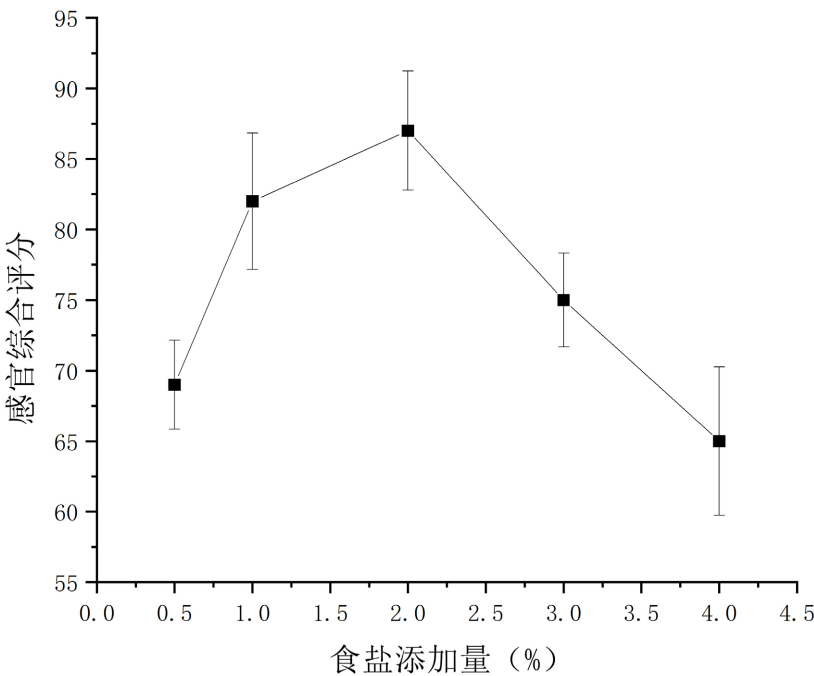


Figure 5. Sensory response vs. salt content
图 5. 食盐添加量对感官评分的影响

3.2. 响应面试验显著性和方差分析

以单因素、正交试验的基础数据(表 2),对封芹叶泥、鸡蛋液、菜籽油、食盐添加量的数据和感官综合评分数据,使用 Design-Expert V8.0.6 软件进行 Box-Benhnken 试验设计和使用表 2 数据进行分析,得到封芹叶泥(A)、鸡蛋液(B)、菜籽油(C)、食盐(D),获得的实验结果进行回归模型方程进行方差分析得到的回归方程为:

$$\begin{aligned} \text{感官综合评分} \quad Y = & 87.42 + 6.94A + 1.75B + 0.05171C - 0.68D + 0.125AB + 2.63AC + 1.35AD \\ & - 7.02BC + 0.48BD + 4.63CD - 7.83A^2 - 3.24B^2 - 3.78C^2 - 2.97D^2 \end{aligned}$$

由(表 3)可知,回归模型的 P-value 值 <0.0001,差异极显著, Lack of Fit(拟失项)为 0.5515,差异不显著,回归模型确定系数 R-Squared = 0.9444,调整确定系数 Adj R-Squared = 0.8887,预测确定系数 Pred

$R\text{-Squared} = 0.7465$ ，表示此模型拟合度高，设置试验误差较小，能够相对准确的反应响应值的变化。其中 A 、 BC 、 A^2 、 CD 为极显著因素，影响程度顺序为： $A > C > B > D$ ，即表示封芹叶泥用量 > 菜籽油用量 > 鸡蛋液用量 > 食盐用量。

Table 2. Response surface methodology experimental design and results

表 2. 响应面实验设计方案及结果

Std	Run	因素				感官综合评分 Y
		封芹叶泥添加量 %A	鸡蛋液添加量 %B	菜籽油添加量 %C	食盐添加量 %D	
1	19	15	50	40	2	69.2
2	26	25	50	40	2	80.0
3	8	15	70	40	2	70.1
4	2	25	70	40	2	85.9
5	13	20	60	30	1	84.2
6	10	20	60	50	1	80.8
7	22	20	60	30	3	71.2
8	24	20	60	50	3	86.3
9	29	15	60	40	1	71.9
10	21	25	60	40	1	82.9
11	25	15	60	40	3	65.9
12	23	25	60	40	3	82.3
13	16	20	50	30	2	68.1
14	1	20	70	30	2	87.0
15	12	20	50	50	2	86.1
16	20	20	70	50	2	76.9
17	11	15	60	30	2	71.8
18	27	25	60	30	2	81.2
19	18	15	60	50	2	67.0
20	6	25	60	50	2	86.9
21	4	20	50	40	1	80.0
22	14	20	70	40	1	81.3
23	15	20	50	40	3	82.0
24	17	20	70	40	3	85.2
25	3	20	60	40	2	89.0
26	7	20	60	40	2	88.3
27	28	20	60	40	2	85.8
28	5	20	60	40	2	84.0
29	9	20	60	40	2	90.0

Table 3. ANOVA of regression model
表 3. 回归模型方差分析

Source	Sun of Squares	df	Mean Square	F Value	P-value Prob > F
Model	1433.44	14	102.39	16.97	<0.0001**
A-封芹叶泥	578.24	1	578.24	95.84	<0.0001**
B-鸡蛋液	36.75	1	36.75	6.09	0.0271*
C-菜籽油	35.2	1	35.02	5.80	0.0303*
D-食盐	5.60	1	5.60	0.93	0.3516
AB	6.25	1	6.25	1.04	0.3260
AC	27.56	1	27.56	4.57	0.0507
AD	7.29	1	7.29	1.21	0.2902
BC	197.40	1	197.40	32.72	<0.0001**
BD	0.90	1	0.90	0.15	0.7048
CD	85.56	1	85.56	14.18	0.0021*
A ²	397.76	1	397.76	65.93	<0.0001**
B ²	68.23	1	68.23	11.31	0.0046**
C ²	92.72	1	92.72	15.37	0.0015**
D ²	57.15	1	57	9.47	0.0082**
Residual	84.47	14	6.03		
Lack of Fit	60.22	10	6.02	0.99	0.5515
Pure Error	24.25	4	6.06		
Cor Total	1517.91	28			

R-Squared = 0.9444 Adj R-Squared = 0.8887 Pred R-Squared = 0.7465

注： **表示极显著水平(P < 0.01); *表示显著水平(P < 0.05)。

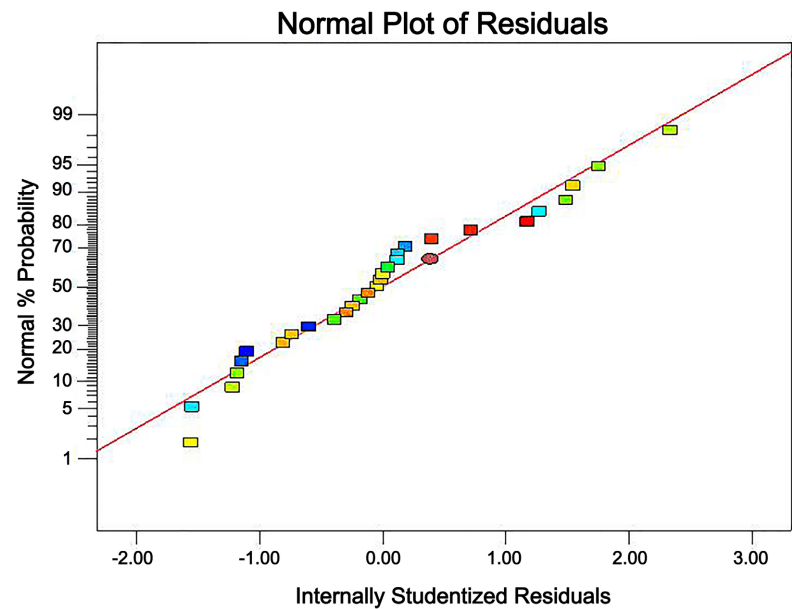


Figure 6. Studentized residual probability plot
图 6. 内学生氏残差(残差的正态概率)

3.3. 对以上模型进行充分性诊断

所获得的模型和数据进行诊断。由图 6 (内学生氏生化残差图)可看到, 正态分布点基本排列在一条直线附近, 无过远的游离点, 表明上述使用模型拟合度较高; 从图 7 可得内学生氏生化残差分布点在-2~3 之间范围, 表示模型相对准确有效; 综上所述, 模型较为准确, 有一定的参考价值。

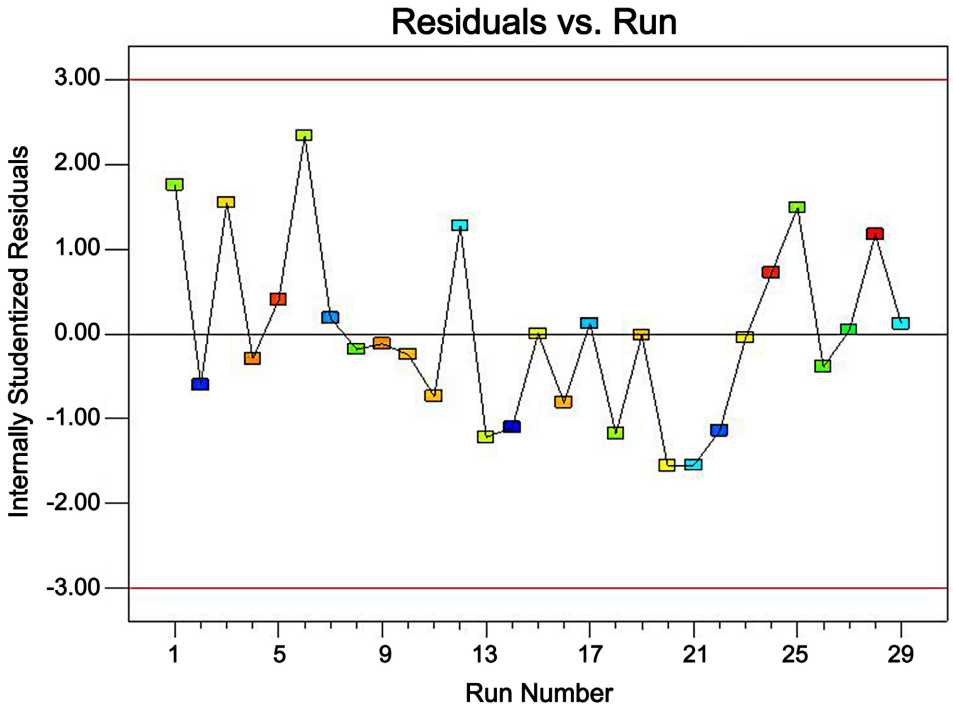
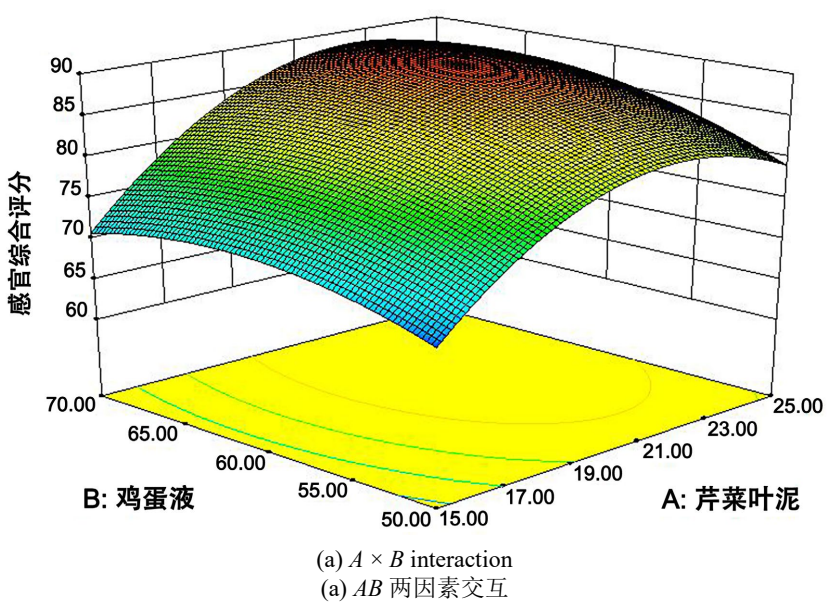
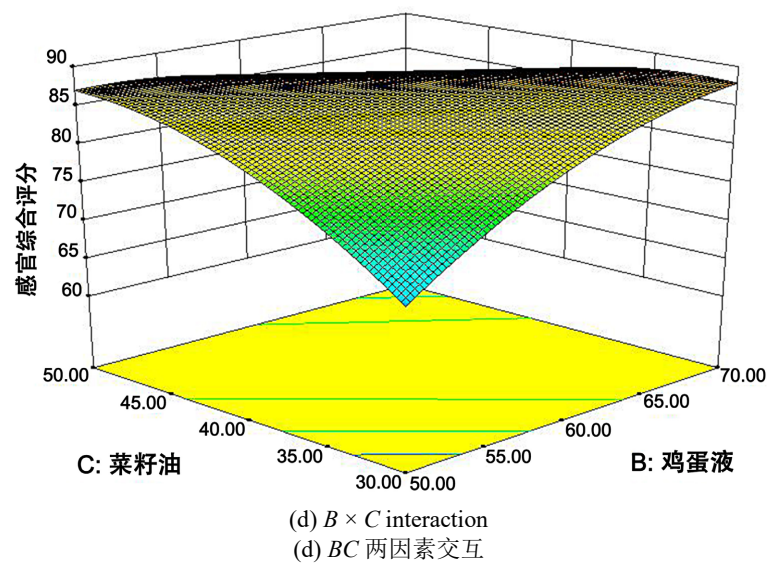
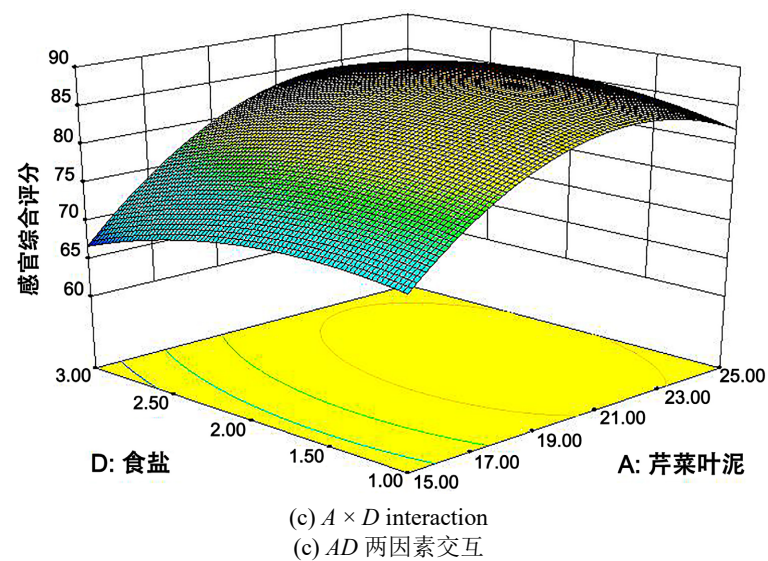
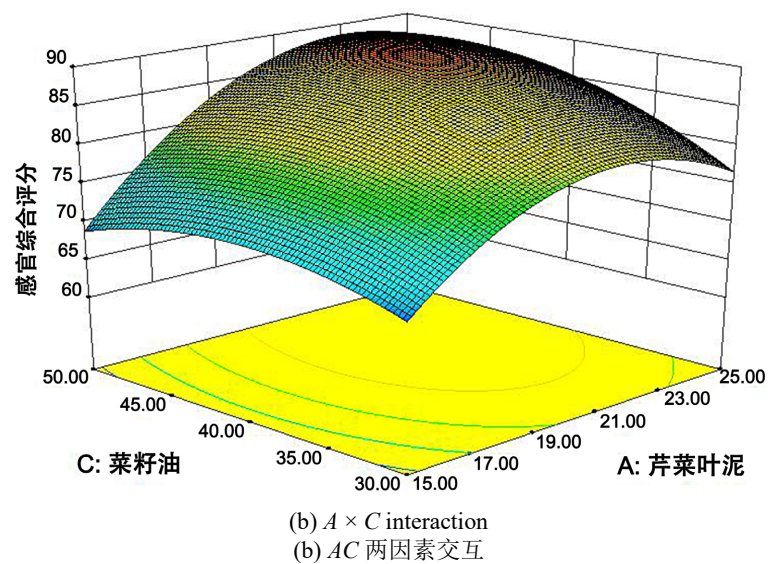


Figure 7. Predicted vs. actual value
图 7. 预测值与实际值的关系图

3.4. 响应面优化分析





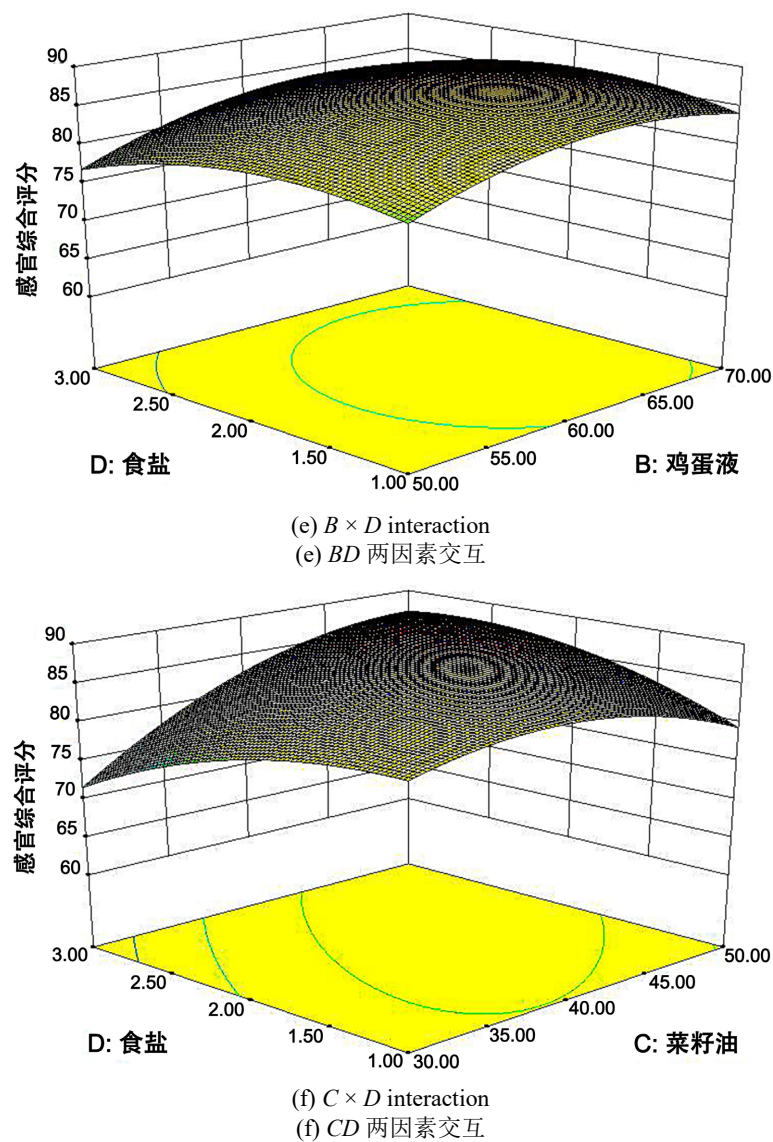


Figure 8. Response surface optimization analysis
图 8. 响应面优化分析

通过设置三个因素中，其中任意一个因素使用中间值，检验其他两个因素对感官评分的影响，响应面起伏越大表示影响程度越高。由响应面图 8 可知 AB 、 BC 、 AC 、 AD 的交互作用下对感官综合评分影响显著， BD 、 CD 响应面图相对平滑，呈现出对感官综合评分影响不显著，图和回归模型反差分析的结果具有一致性。

通过 Box-Behnken 优化微调的出封芹叶饼干最佳创新配方组合为：封芹叶泥 20%，鸡蛋液 58%，菜籽油 39%，食盐 1.90%，根据优化数据进行试验，得到封芹叶饼干的感官评分为 90 分，与理论值相同，说明模型可信度和拟合程度都很好，优化后的配方比例能够对制作封芹叶饼干提供相关参考。

4. 验证性试验

对照组与重复设置理化指标数据测定，实验组：创新最佳配方(20%封芹叶泥 + 39%菜籽油 + 100%混合面粉 + 1.9%盐 + 58%鸡蛋液)；对照组：空白传统配方(75%黄油 + 35%糖 + 100%低筋面粉 + 58%

鸡蛋液)。严格按照图 1 工艺流程图的制作工艺流程制作出饼干，每组制作 3 个批次，每批次制作 10 块饼干，在每组 30 块饼干中随机挑选十块饼干进行数据测试，确保数据可靠性。

4.1. 产品品质分析

对最佳配比量的封芹叶饼干成品进行品质分析，检验最佳创新配方下的封芹叶饼干符合国家标准《饼干质量通则》(GB/T 20980-2021)相关标准[36]-[43]，见表 4。

Table 4. Physicochemical indicators of Fengqin Leaf Biscuits

表 4. 封芹叶饼干理化指标

指标	标准	实测结果
水分含量%	≤6.00	5.52
蛋白质含量%		13.90
碱度(以碳酸钠计)%	≤0.40	0.31
酸性 mg·g ⁻¹	≤5.00	0.18
过氧化值 g	≤0.25	0.11
膳食纤维含量%		2.56
菌落总数 CFU/g		<10
霉菌 CFU/g		<1

4.2. 创新配方与空白对照部分理化参数对比

4.2.1. 创新配方与空白传统配方的质构分析

为对比封芹叶饼干创新配方(含封芹叶泥)与空白传统配方(仅黄油)的质构特性差异，使用食品质构测定通用方法[44]。结果如表 5 所见：封芹叶的添加在保持饼干结构的同时，优化了质构特性，更适合酥性饼干的消费需求。

Table 5. Texture profile comparison between conventional and innovative formulations

表 5. 创新配方与空白对照质构特性对比

组别	硬度(g)	脆性(g)	弹性(mm)	咀嚼性(mJ)
空白对照	1255 ± 85	990 ± 62	2.2 ± 0.2	13.5 ± 1.4
创新配方	1060 ± 62*	840 ± 65*	2.7 ± 0.4*	15.1 ± 1.6*

注：*表示与空白组相比差异显著(p < 0.05, t 检验)；温度 25℃，湿度 50%，样品厚度统一为 10 mm；每组样品平行测定 5 次，结果取平均值。

封芹叶的添加在保持饼干结构的同时，优化了质构特性，更适合追求酥软口感的消费需求。

4.2.2. 膳食纤维

将创新配方与空白对照饼干，随机抽取十个样本的膳食纤维含量进行测定对比[45]，空白饼干的膳食纤维质量分数的平均值为 0.128%，最优饼干的膳食纤维质量分数的平均值为 3.019%，即创新配方的膳食纤维含量是空白对照的 23.53 倍。

4.2.3. 抗氧化能力测定和货架期氧化情况的评估

使用 DPPH 法[46]对比两组饼干的抗氧化能力，十个样品测试结果平均值为：空白对照 DPPH 自由

基清除率为 41.6%，创新配方饼干为 58.5%，增加显著。高自由基清除率的蔬菜富含抗氧化物质，保护视力、改善皮肤健康、增强免疫力，降低多种慢性病风险、延缓衰老[47]-[49]。

为评估封芹叶饼干在储存过程中的氧化情况，对创新配方(含封芹叶泥)与空白传统配方(空白对照)的饼干进行了加速货架期试验。样品置于 30℃、65%相对湿度条件下储存，并在 0 个月、2 个月、5 个月时取样，严格遵循国家标准[45]，定期检测过氧化值(POV)以评估油脂氧化程度；考察封芹叶成分对饼干货架期稳定性的影响，发现两个配方前期(0~2 月)氧化程度相近，但是随着时间的变长，创新配方抗氧化能力渐渐显示出较强状况，具体数据见表 6。

Table 6. Peroxide values of control and innovative groups during storage
表 6. 对照表创新组和空白组在不同储存时间点的过氧化值情况表

储存时间	空白组(黄油) POV (meq/kg)	创新组(封芹泥 + VC) POV (meq/kg)
0 个月	5.2 ± 0.3	4.8 ± 0.2
2 个月	24.1 ± 1.5	18.3 ± 0.9
5 个月	42.4 ± 2.8 (超标)	24.7 ± 1.2 (安全)

注：使用橄榄油 CRM 标准品校准流程，每个样品至少测 3 次，相对偏差 ≤10%，若 POV 突增，则检查排除问题再次取样。

4.2.4. 脂肪酸含量测试

见表 7，采用气相色谱法分析两组饼干的饱和与不饱和脂肪酸比例[50][51]。创新配方饱和脂肪酸远低于空白对照；较空白传统配方创新配方不饱和脂肪酸有大幅度提升；不饱和脂肪酸对身体健康有益能够降低胆固醇、减少心脏病风险、抗炎、支持大脑发育和认知功能、改善情绪、促进皮肤健康、增强免疫系统、帮助体重管理以及支持胎儿发育，适量摄入不饱和脂肪酸有助于维持整体健康，预防慢性疾病。

Table 7. Physicochemical parameters: innovative formula vs. blank control
表 7. 创新配方与空白对照部分理化参数对照表

组别 测试项目	膳食纤维(%)	自由基清除率(%)	脂肪酸含量%	
			不饱和脂肪酸	饱和脂肪酸
空白对照	0.128	41.6	19.112	51.843
创新配方	3.019	58.5	32.885	6.115

注：数据为 10 次测定平均值。

4.3. 封芹叶饼干功能特性试验结果

采用 INFOGEST 标准体外消化模型[52][53]，模拟了饼干在口腔、胃和小肠的消化过程。分析了最佳配方(创新配方)与传统配方(空白配方)饼干样品的体外消化特性。主要测定淀粉消化特性 RDS (快速消化淀粉, Rapidly Digestible Starch)、SDS (慢速消化淀粉, Slowly Digestible Starch)、RS (抗性淀粉, Resistant Starch)含量)、蛋白质消化率以及消化后残渣的膳食纤维组成，结果见表 8。

1) RDS 显著降低，使用激光共聚焦显微镜观察到淀粉 - 多酚复合物形成明显的共定位荧光信号(激发波长 488 nm，发射波长 520 nm)。在 1047 cm⁻¹ 和 1022 cm⁻¹ 处观察到特征峰位移，证实 C-O 键振动变化，表明淀粉 - 多酚氢键形成。使用酶标仪测定，结果显示芹菜素对 α-淀粉酶的抑制类型为混合型抑制，抑制常数(Ki, Inhibition Constant)值为 0.28 ± 0.03 mm。

2) SDS 显著提升，使用快速粘度分析仪测试，显示试验组糊化峰值粘度降低 15.2%，暗示淀粉颗粒

表面改性。并观察到淀粉表面出现均匀孔隙结构(平均孔径 $2.8 \pm 0.4 \mu\text{m}$)。

3) RS 显著增加, 体外发酵实验(使用 3.5 kDa 透析袋)显示 RS 组的短链脂肪酸(SCFAs, Short-Chain Fatty Acids)产量增加 42.3%。体外血糖生成指数(eGI, Estimated Glycemic Index)降至 58.3 ± 1.8 。

对照组消化特性对比分析: 使用显微镜显示黄油形成连续相(尼罗红染色), 包裹淀粉颗粒(荧光素染色)。

测定显示表观粘度增加 32.5%, 导致酶扩散受限[54] [55]。

Table 8. Peroxide value (POV) profiles of the control and experimental formulations during storage
表 8. 创新配方与空白传统配方消化动力学差异性参数对照表

指标	创新配方	空白传统配方	差异显著性
RDS (快速消化淀粉)	↓47%	高(基准值)	极显著↓
SDS (慢速消化淀粉)	↑45.3%	低(基准值)	显著↑
RS (抗性淀粉)	↑36.0%	低(基准值)	极显著↑
消化速率常数(k)	0.18 min^{-1}	0.42 min^{-1}	显著↓

4) 创新配方通过多酚-淀粉复合物构建, 通过表 8 试验数据显示, 创新配方相比空白传统配方在代谢健康功能和加工特性上具有显著优势, 可作为功能性碳水化合物的理想候选配方。

5. 结论

本研究通过正交试验和响应面分析优化, 以低筋小麦粉与玉米粉为主要原料, 配合一定比例的封芹叶泥、菜籽油、鸡蛋液经过传统的饼干制作工艺完成制作, 以感官综合评分为主要参考指标, 确定其最优配比为: 菜籽油 39.95%, 封芹叶泥 19.90%, 食盐 2.10%, 鸡蛋液 59.50%, 创新配方产品, 烘焙感官品质优异, 产品色泽金黄偏绿, 外形完整薄厚口感适中, 并具备封芹的淡香味且膳食纤维含量较高。本产品的研发不仅把封芹主产区封芹叶高价值利用, 减少了污染环境, 还为开发低饱和脂肪酸富含膳食纤维的封芹叶饼干提供了方向, 故对实际生产有一定的借鉴意义。

基金项目

河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2024JD19); 河南省科技攻关计划项目(222102110122)。

参考文献

[1] Temple, N.J. (2022) A Rational Definition for Functional Foods: A Perspective. *Frontiers in Nutrition*, **9**, Article ID: 957516. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.957516>

[2] Godefroidt, T., Ooms, N., Pareyt, B., Brijs, K. and Delcour, J.A. (2019) Ingredient Functionality during Foam-Type Cake Making: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **18**, 1550-1562. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12488>

[3] 王娟娟, 张曦, 蒋靖怡. 关于豇豆、芹菜和韭菜质量安全的思考[J]. *中国蔬菜*, 2022(6): 7-10.

[4] 赵愉涵. 芹菜叶超微粉的制备及性质研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022.

[5] 孙华林, 田奎蓉, 洪业, 等. 芹菜不同部位提取物对调节大鼠高血压与血脂代谢紊乱作用机制研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(7): 289-294.

[6] 刘丽萍. 不同杂粮中可溶性膳食纤维对肥胖小鼠的干预作用[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2020.

[7] Ni, D., Smyth, H.E., Cozzolino, D. and Gidley, M.J. (2022) Integrating Effects of Human Physiology, Psychology, and Individual Variations on Satiety—An Exploratory Study. *Frontiers in Nutrition*, **9**, Article ID: 872169. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.872169>

- [8] Borkoles, E., Krastins, D., van der Pols, J.C., Sims, P. and Polman, R. (2022) Short-Term Effect of Additional Daily Dietary Fibre Intake on Appetite, Satiety, Gastrointestinal Comfort, Acceptability, and Feasibility. *Nutrients*, **14**, Article 4214. <https://doi.org/10.3390/nu14194214>
- [9] 杨红霞, 孙倩. 芹菜素的现代研究进展[J]. 长治医学院学报, 2012, 26(5): 397-400.
- [10] Zhang, Y., Li, R., Wang, X., *et al.* (2024) Apigenin Modulates NAD⁺ Metabolism via CD38 Inhibition: Implications in Aging and Neurodegeneration. *Aging Cell*, **23**, e14089.
- [11] Kim, S., Jung, J. and Lee, H. (2025) Synergistic Anti-Tumor Effects of Apigenin and Temozolomide in Glioblastoma Multiforme. *Molecular Cancer Therapeutics*, **24**, 567-578.
- [12] Falciano, A., Sorrentino, A., Masi, P. and Di Pierro, P. (2022) Development of Functional Pizza Base Enriched with Jujube (*Ziziphus jujuba*) Powder. *Foods*, **11**, Article 1458. <https://doi.org/10.3390/foods11101458>
- [13] Mondéjar-Jiménez, J.A., Sánchez-Cubo, F. and Mondéjar-Jiménez, J. (2022) Consumer Behaviour Towards Pork Meat Products: A Literature Review and Data Analysis. *Foods*, **11**, Article 307. <https://doi.org/10.3390/foods11030307>
- [14] Dinkçi, N., Aktaş, M., Akdeniz, V. and Sirbu, A. (2021) The Influence of Hazelnut Skin Addition on Quality Properties and Antioxidant Activity of Functional Yogurt. *Foods*, **10**, Article 2855. <https://doi.org/10.3390/foods10112855>
- [15] Sousa, J.M.S., de Abreu, F.A.P., Ruiz, A.L.T.G., da Silva, G.G., Machado, S.L., Garcia, C.P.G., *et al.* (2021) Cashew Apple (*Anacardium occidentale* L.) Extract from a By-Product of Juice Processing: Assessment of Its Toxicity, Antiproliferative and Antimicrobial Activities. *Journal of Food Science and Technology*, **58**, 764-776. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04594-0>
- [16] 赵萍, 巩慧玲, 王雅, 等. 膳食纤维的保健作用及其新产品开发前景[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(3): 69-72.
- [17] 徐微, 于成龙, 刘玉兵, 等. 荞麦杂粮饼干的研制及品质分析[J]. 食品工业, 2020, 41(12): 63-67.
- [18] 赵凯乐, 高云, 吴玉娟, 等. 紫薯大豆多肽饼干的研制[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(1): 121-124.
- [19] 何四云. 无膨松剂甜杏仁酥性饼干的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [20] 卢濛. 红枣曲奇饼干的研制[J]. 现代食品, 2024, 30(15): 110-113.
- [21] 洪文龙, 杨晨, 陈玉琳, 等. 紫薯粉对苡麦饼干品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(18): 122-131.
- [22] 张静, 赵元元, 李小定, 等. 原料特性对曲奇饼干品质和丙烯酰胺生成的影响[J]. 现代食品科技, 2020, 36(6): 190-197, 273.
- [23] 毛恒杰. 曲奇饼干加工工艺优化研究[J]. 现代食品, 2024, 30(13): 117-122.
- [24] 熊盈盈, 王祖文, 周玉伟, 等. 基于模糊数学感官评价的无蔗糖黄精曲奇饼干的工艺研究[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(5): 52-57, 63.
- [25] 黄丹. 高乳化性蛋黄粉的制备、性能表征及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [26] Tang, T., Wu, S., Tang, S., Xiao, N., Wu, L., Tu, Y., *et al.* (2022) Effect of Modified Egg White Powder on the Properties of Angel Cakes. *Journal of Food Engineering*, **326**, Article 111012. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111012>
- [27] Sang, S., Xu, D., Ma, Y., Jin, Y., Wu, F. and Xu, X. (2020) Effect of Egg Yolk on the Properties of Wheat Dough and Bread. *Food Bioscience*, **37**, Article 100689. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100689>
- [28] Dreher, J., Weißmüller, M., Herrmann, K., Terjung, N., Gibis, M. and Weiss, J. (2021) Influence of Protein and Solid Fat Content on Mechanical Properties and Comminution Behavior of Structured Plant-Based Lipids. *Food Research International*, **145**, Article 110416. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110416>
- [29] Li, S., Zhu, L., Wu, G., Jin, Q., Wang, X. and Zhang, H. (2022) Relationship between the Microstructure and Physical Properties of Emulsifier Based Oleogels and Cookies Quality. *Food Chemistry*, **377**, Article 131966. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131966>
- [30] 胡文娜. 酥性饼干中氯丙醇酯和缩水甘油酯的控制及其品质变化研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [31] 樊亮, 叶文斌, 胡文斌, 等. 响应面结合模糊数学感官评价法优化油橄榄果渣曲奇饼干的配方及其品质测定[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(2): 282-295.
- [32] Nurmilah, S., Cahyana, Y., Utama, G.L. and Ait-Kaddour, A. (2022) Strategies to Reduce Salt Content and Its Effect on Food Characteristics and Acceptance: A Review. *Foods*, **11**, Article 3120. <https://doi.org/10.3390/foods11193120>
- [33] Zhang, L., Guan, E., Yang, Y., Liu, Y., Zhang, T. and Bian, K. (2021) Impact of Wheat Globulin Addition on Dough Rheological Properties and Quality of Cooked Noodles. *Food Chemistry*, **362**, Article 130170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130170>
- [34] Fan, H., Fu, F., Chen, Y., Liu, M., Ai, Z. and Bian, K. (2020) Effect of NaCl on Rheological Properties of Dough and

- Noodle Quality. *Journal of Cereal Science*, **93**, Article 102936. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102936>
- [35] 贾峰, 柳甜甜, 王震磊, 等. 外源添加食盐、牛奶和蔗糖对小麦面筋力学特性的影响[J]. 现代食品, 2016(14): 56-59.
- [36] 国家卫生和计划生育委员会. GB5009.3-2016 食品安全标准食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [37] 国家卫生和计划生育委员会. GB5009.5-2016 食品安全标准食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [38] 国家食品药品监督管理总局. GB20980-2017 对饼干的碱度进行测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [39] 国家卫生和计划生育委员会. GB5009.229-2016 食品安全标准食品中酸价的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [40] 国家卫生和计划生育委员会. GB5009.227-2016 食品安全标准食品中过氧化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [41] 国家卫生和计划生育委员会. GB2009.88-2014 食品安全标准食品中膳食纤维的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [42] 国家卫生和计划生育委员会. GB4789.2-2016 食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [43] 国家卫生和计划生育委员会. GB4789.15-2016 食品安全国家标准食品微生物学检验霉菌和酵母计数[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [44] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 23781-2009 食品质构测定通用方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [45] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.227-2016 食品安全国家标准食品中过氧化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [46] 徐魏, 雷艳琴, 魏湘芝, 等. 紫花地丁芹菜素清除 DPPH 自由基稳定性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(11): 2775-2779.
- [47] Chen, L., Zhang, Y., Wang, Z., *et al.* (2025) Apigenin from Celery Extract: Mechanisms of DPPH Radical Scavenging Activity and Structure-Activity Relationship Analysis. *Food Chemistry*, **478**, 128-135.
- [48] Khalid, M., Saeed-ur-Rahman, Bilal, M. and Huang, D-F. (2019) Role of Flavonoids in Plant Interactions with the Environment and against Human Pathogens—A Review. *Journal of Integrative Agriculture*, **18**, 211-230. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(19\)62555-4](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(19)62555-4)
- [49] 陈季武, 胡斌, 赵实等. 天然黄酮类化合物清除 DPPH 的构效关系[J]. 发光学报, 2005, 26(4): 664-668.
- [50] 曾维丽, 石晓, 张锋杰. 白花菜籽油的制备及脂肪酸组成分析[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(7): 110-114.
- [51] Coniglio, S., Shumskaya, M. and Vassiliou, E. (2023) Unsaturated Fatty Acids and Their Immunomodulatory Properties. *Biology*, **12**, Article 279. <https://doi.org/10.3390/biology12020279>
- [52] Brodkorb, A., Egger, L., Alming, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., *et al.* (2019) INFOGEST Static *in Vitro* Simulation of Gastrointestinal Food Digestion. *Nature Protocols*, **14**, 991-1014. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1>
- [53] Mulet-Cabero, A.-I., Egger, L., Portmann, R., Ménard, O., Marze, S., Minekus, M., Le Feunteun, S., Sarkar, A., Grundy, M. M.-L., Carrière, F., Golding, M., Dupont, D., Recio, I., Brodkorb, A. and Mackie, A. (Year) A Standardised Semi-Dynamic *in Vitro* Digestion Method Suitable for Food—An International Consensus. *Food & Function*, **11**, 1702-1720.
- [54] Jiménez-Munoz, L., Torp Nielsen, M., Roman, L. and Corredig, M. (2023) Variation of *in Vitro* Digestibility of Pea Protein Powder Dispersions from Commercially Available Sources. *Food Chemistry*, **401**, Article 134178. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134178>
- [55] Soto, J.E., Burnett, C.M.L., Ten Eyck, P., Abel, E.D. and Grobe, J.L. (2019) Comparison of the Effects of High-Fat Diet on Energy Flux in Mice Using Two Multiplexed Metabolic Phenotyping Systems. *Obesity*, **27**, 793-802. <https://doi.org/10.1002/oby.22441>