Hans Journal of Food and Nutrition Science 食品与营养科学, 2026, 15(6), 633-647
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjfns
https://doi.org/10.12677/hjfns.2026.156066

菊粉燕麦全麦饼干的配方优化及品质评价

周轩宇[1]，陈月星[1*]，阎佩云[1]，郎伍营[1,2]，李立丹[3]

[1]商洛学院现代农业与生物工程学院，陕西 商洛
[2]山阳县德源晟生态农业有限公司，陕西 商洛
[3]陕西省烟草公司商洛市公司，陕西 商洛

收稿日期：2026年9月5日；录用日期：2026年10月22日；发布日期：2026年11月2日

摘 要

随着消费者对健康食品需求的日益增长，开发兼具营养与功能性的烘焙食品成为食品科学领域的研究热点。本研究以菊粉、燕麦粉和全麦粉为主要原料，通过优化配方研制一款高膳食纤维、低热量的功能性饼干。以饼干的感官评分为考察指标，采用单因素实验分析菊粉添加量、燕麦粉添加量、黄油添加量、鸡蛋液添加量对饼干感官评分的影响，采用响应面优化试验对菊粉燕麦全麦饼干的配方进行优化，各个因素对感官评分的影响效果主次排序为：黄油添加量 > 燕麦粉的添加量 > 菊粉的添加量 > 鸡蛋的添加量。结果表明：以全麦粉50 g为基准，其中菊粉添加量15%，燕麦粉添加量29%，黄油添加量20%，鸡蛋液添加量23%，该条件制得饼干感官评分可达86.23分，膳食纤维含量23.92 g/100g；酸价0.46 mg/g，过氧化值0.037 g/100g，微生物指标均符合国家食品安全标准，饼干韧性小、易于咀嚼。本研究可为菊粉在焙烤食品中的开发利用提供实验依据，该饼干兼具良好适口性与高膳食纤维营养特征，具备市场开发潜力。

关键词

菊粉，燕麦粉，配方优化，响应面法

Formula Optimization and Quality Evaluation of Inulin-Oat Whole-Wheat Biscuits

Xuanyu Zhou[1], Yuexing Chen[1*], Peiyun Yan[1], Wuying Lang[1,2], Lidan Li[3]

[1]College of Modern Agriculture and Bioengineering, Shangluo University, Shangluo Shaanxi
[2]Shanyang Deyuansheng Ecological Agriculture Co., Ltd., Shangluo Shaanxi
[3]Shaanxi Provincial Tobacco Company Shangluo City Company, Shangluo Shaanxi

[*]通讯作者。

文章引用: 周轩宇, 陈月星, 阎佩云, 郎伍营, 李立丹. 菊粉燕麦全麦饼干的配方优化及品质评价[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(6): 633-647. DOI: 10.12677/hjfns.2026.156066

Received: September 5, 2026; accepted: October 22, 2026; published: November 2, 2026

Abstract

With the increasing consumer demand for healthy foods, developing baked goods that combine nutrition and functionality has become a research hotspot in the field of food science. Inulin, oat flour, and whole wheat flour were used as the main raw materials; this paper was designed to develop a kind of biscuit with high dietary fiber and low calorie content through formula optimization. Taking the sensory evaluation score of the biscuit as the assessment indicator, single-factor experiments were conducted to analyze the effects of inulin addition, oat flour addition, butter addition, and egg liquid addition on the sensory score of the biscuit. Response surface test was employed to refine the formula of the inulin oat whole wheat biscuit. The primary and secondary order of the influence of various factors on sensory scores is: butter addition amount > oat flour addition amount > inulin addition amount > egg addition amount. The results showed that, based on 50 g of whole wheat flour, the optimal formula was consisted of 15% inulin, 29% oat flour, 20% butter, and 23% egg liquid. Biscuits prepared under this formula achieved a sensory score of 86.23, with dietary fiber content of 23.92 g/100g. Its acid value was 0.46 mg/g and peroxide value was 0.037 g/100g. All microbial indicators complied with national food safety standards. The biscuits exhibited low toughness and good chewability. This study can provide experimental references for the application of inulin in baked foods. The prepared biscuits possess favorable palatability and high-dietary-fiber nutritional characteristics, and show potential for market development.

Keywords

Inulin, Oat Flour, Formula Optimization, Response Surface Methodology

Copyright © 2026 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

菊粉，亦称菊糖，主要源自菊科植物，属于天然水溶性膳食纤维与益生元[1] [2]，由果糖链以 β(2→1)糖苷键连接，末端常连 1 个葡萄糖单元，聚合度 2~60，具备低热量、难消化、持水性与凝胶特性[3]。菊粉可调节肠道菌群、增殖双歧杆菌，还可调节血糖血脂、促进矿物质吸收，对糖尿病、肥胖、心血管人群起到膳食干预效果[4]；同时可替代油脂与糖、改善食品质构、延长货架期，广泛用于乳制品、面制品、肉制品[5] [6]。Michele Canale 等[7]研究证实，菊粉替代小麦粉有利于制作低 GI、高纤维烘焙食品；于晴等[8]发现长链菊粉能够缓解冷冻熟面储藏过程中硬度、咀嚼性升高的品质劣变。燕麦为营养丰富的全谷物，含皂苷、生物碱等活性物质，可调节血脂、血糖、改善肠道功能[9]-[12]；其中 β-葡聚糖可延缓碳水消化、降低升糖指数，适合慢性病患者膳食干预[13]。袁贵英等[14] [15]以紫淮山泥与燕麦粉研制无糖饼干，燕麦粉添加量 35%时饼干酥脆、香气浓郁。

燕麦与菊粉虽存在协同应用潜力，但烘焙应用存在短板：菊粉高持水性提升面团黏性，燕麦麸纤维易造成饼干硬化，需要优化配方工艺平衡营养与感官。现有研究多针对单一组分，对燕麦 β-葡聚糖与菊粉的益生元协同效应、抑制淀粉消化、联合调控肠道健康缺乏系统研究。动物试验表明，菊粉联合谷物粉可改善便秘小鼠肠道状态，菊粉调节菌群、谷物纤维促进肠道蠕动，二者协同维持肠道微生态平衡[16]

[17]。基于此，本研究以燕麦和菊粉为主要原料，利用响应面法优化配方，开发高膳食纤维、低升糖指数且适口性良好的功能性饼干，为燕麦、菊粉的高值化利用及健康烘焙食品研发提供技术参考。

2. 材料与方法

2.1. 材料与设备

材料：全麦粉，益海粮油工业有限公司；菊粉，冠赢生物科技有限公司；燕麦粉，镇江市智农食品有限公司；赤藓糖醇，山东三元生物科技股份有限公司；黄油，上海妙可蓝多食品科技股份有限公司；鸡蛋，食盐，小苏打市售。

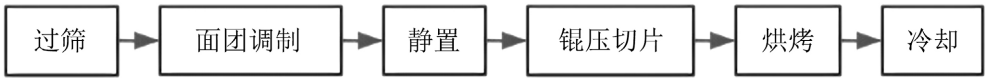
设备：SEC-3Y 烤箱，珠海三麦机械有限公司；TA.Portable 质构仪，苏州保曼精密仪器有限公司。

2.2. 实验方法

2.2.1. 菊粉燕麦全麦饼干的基础配方

全麦粉 50 g，燕麦粉 15 g，菊粉 7.5 g，鸡蛋液 10 g，黄油 10 g，赤藓糖醇 10 g，盐 0.5 g，小苏打 0.1 g。

2.2.2. 菊粉燕麦全麦饼干的工艺流程



(1) 过筛

全麦粉，燕麦粉，菊粉，鸡蛋液，黄油，赤藓糖醇，盐，小苏打等 60 目过筛备用。

(2) 面团调制

将黄油室温融化后搅打至颜色均匀、顺滑，加入赤藓糖醇、食盐和小苏打搅拌，形成均匀的乳浊液备用。将称量好的全麦粉与菊粉、燕麦粉放入容器中，接着分次加入室温鸡蛋液，边加边用橡皮刮刀翻拌，直到所有干粉湿润并形成柔软不粘手的面团。混合过程中注意控制搅拌力度，避免过度揉搓导致面团起筋。

(3) 静置

将调制完成的面团置于室温条件下静置 10~15 min，此过程有助于面筋网络充分形成，使面团组织结构趋于稳定。当面团达到适宜的硬度且表面不粘手时，即可进行后续加工操作。

(4) 辊压切片

待面团完成静置后，使用擀面杖将其均匀延展成厚度一致的面皮(建议厚度 3~5 mm)，随后采用特定模具成型，将成型后的饼坯整齐排列于烤盘内，注意保持适当间距以确保受热均匀。

(5) 烘烤

烘烤时设置上火 180℃、下火 173℃，烘烤时长为 10 min，在此过程中需留意饼干的色泽变化，防止烤得过焦。

(6) 冷却

将烘烤完成的饼干置于室温环境下自然冷却至 25℃~30℃，即获得菊粉燕麦全麦饼干成品。冷却过程中需注意保持通风干燥，避免产品回软，确保成品保持最佳酥脆口感。

2.3. 单因素试验

以全麦粉的质量为基准，其中食用盐添加量 1%、小苏打添加量 0.2%、赤藓糖醇 20%保持不变，将

饼干感官评分作为评判依据，分别探究不同添加比例的菊粉、燕麦粉、黄油、鸡蛋液四种成分对菊粉燕麦全麦饼干感官品质的作用效果。

2.3.1. 菊粉添加量对饼干感官评分的影响

研究采用单因素实验设计，在保持其他原料配比不变的条件下，设置 5%、10%、15%、20%和 25%五个梯度水平的菊粉添加量，系统考察其对饼干感官品质的影响规律。通过控制单一变量，准确评估菊粉添加量与产品感官评分之间的量效关系。

2.3.2. 燕麦粉添加量对饼干感官评分的影响

在保持配方其他组分含量恒定的条件下，分别加入 20%、25%、30%、35%及 40%比例的燕麦粉，探究不同水平燕麦粉添加量对饼干感官评分的作用效果。

2.3.3. 黄油添加量对饼干感官评分的影响

本实验采用控制变量法，固定其他原料配比不变，设置 10%、15%、20%、25%、30%五个黄油添加梯度，系统研究不同黄油含量对饼干感官品质的影响。通过测定各实验组的感官评分指标，分析黄油添加量与产品感官特性之间的相关性。

2.3.4. 鸡蛋液添加量对饼干感官评分的影响

本实验采用单因素变量控制法，在确保其他原料配比一致的基础上，设置 10%、15%、20%、25%和 30%五个鸡蛋液添加梯度，重点考察其对饼干感官品质的影响特性。通过对比分析不同添加量下产品的色泽、组织、气味等感官指标评分，建立鸡蛋液用量与饼干品质的对应关系模型。

2.4. 响应面试验设计

基于单因素实验结果，本研究筛选出对饼干感官品质具有显著影响的关键参数，通过响应面分析法对产品配方进行系统优化。利用 Design-Expert 统计软件构建实验方案、数据建模和回归分析，建立各因素与感官评分的数学模型，最终确定菊粉燕麦全麦饼干的最优原料配比方案。

2.5. 感官评价

依据 GB 7100—2015《食品安全国家标准饼干》[18]的检测方法，结合实验需求进行适当调整。本研究感官评价小组共 12 名评价员(男 6 名，女 6 名，年龄 22~32 岁)；评价员筛选标准：无色盲、色弱，无嗅觉味觉疾病，无饼干类食品过敏史。正式评价前开展集中培训：熟悉饼干感官评分表，学习色泽、组织状态、气味、口感的判别标准，对 5 组饼干样品进行预评价，评价结果变异系数小于 15%方可参与正式盲评实验。各项指标评分结果经算术平均后作为最终感官评定数据，具体评分标准详见表 1 所示。

2.6. 品质检测

理化指标检测参照《食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5—2025) [19]、《食品中脂肪的测定》(GB 5009.6—2025) [20]、《食品中过氧化值的测定》(GB 5009.229—2023) [21]、《食品中酸价的测定》(GB 5009.227—2025) [22]、《食品中膳食纤维的测定》(GB 5009.88—2014) [23]、《食品微生物学检验菌落总数测定》(GB 4789.2—2022) [24]、《食品微生物学检验大肠菌群计数》(GB 4789.3—2016) [25]。

采用质构分析仪的 TPA 测试程序，对饼干样品的关键质构参数进行系统评估。测试指标包括硬度、脆度、咀嚼性、黏聚性、回复性五个方面。对研制的饼干重复测定 5 次，最后结果以平均值 ± 标准差表示。

Table 1. Sensory evaluation criteria for inulin-oat whole-wheat biscuits
表 1. 菊粉燕麦全麦饼干的感官评分标准

指标	评分标准	分值/分
组织 (25 分)	厚薄均匀，断面无颗粒结块，无鼓包气泡，无裂痕	20~25
	厚薄不均断面无颗粒结块，少量鼓包气泡，有少量裂痕	11~19
	厚薄不均，断面有颗粒结块，有大量鼓包气泡，有大量裂痕	1~10
色泽 (25 分)	呈浅棕色，色泽均匀，无白粉，无过焦现象	20~25
	呈浅棕色，个别有白粉，少量过焦	11~19
	呈褐色，色泽不均匀，有白粉，大量过焦	1~10
气味 (25 分)	有产品应有的谷香味和奶香味，无异味	20~25
	产品谷香味和奶香味不明显，略有异味	11~19
	产品无谷香味和奶香味，有明显异味	1~10
口感 (25 分)	入口酥脆，甜度适宜，不黏牙	20~25
	脆度欠佳，略有粗糙感，甜味过浓或过淡，不黏牙	11~19
	不酥脆，口感粗糙且较硬，有异味，黏牙	1~10

2.7. 数据处理

每组单因素试验重复 3 次，结果以“平均值 ± 标准差”表示；采用 SPSS 软件对数据进行方差分析与 Duncan 多重比较；采用 Design Expert 13 软件拟合二次多项回归方程并进行方差分析、绘制响应面曲线。

3. 结果与分析

3.1. 单因素试验结果

3.1.1. 菊粉添加量对饼干感官评分的影响

按照试验方案，不同菊粉添加比例(5%、10%、15%、20%和 25%)对饼干感官评分的作用结果如图 1 所示。从图 1 可见，当菊粉添加比例控制在 15%左右时，制作的饼干获得最高感官评价。此时产品具有理想的口感特性，表现为恰到好处的酥脆质地和适宜的甜味强度，同时呈现出浓郁的乳制品香气与谷物芬芳的完美结合。实验发现，过量添加菊粉会导致面团黏度急剧上升，进而影响产品质构；当添加量达到 25%时，饼干出现明显的表面龟裂和结构疏松现象。因此，确定 15%为最佳添加量。基于此，选择 10%、15%、20%三个梯度作为响应面实验的菊粉添加量水平。

3.1.2. 燕麦粉添加量对饼干感官评分的影响

依据试验规划，不同比例(20%、25%、30%、35%以及 40%)的燕麦粉添加量对饼干感官评分所产生的作用，呈现于图 2 之中。从图 2 能够清晰看出，随着配方中燕麦粉含量的增加，饼干的感官评价分数表现出了典型的先增高后降低的变化规律。实验结果表明，在燕麦粉用量为 30%的条件下，产品获得了最高评分值，此时的饼干在各项品质指标上均展现出最优异的特性。但当添加量超过 30%时，会显著影响面筋网络形成，导致产品出现表面粗糙、结构致密等缺陷。因此，本研究选择 25%、30%、35%三个具有代表性的添加量水平进行后续响应面优化实验。

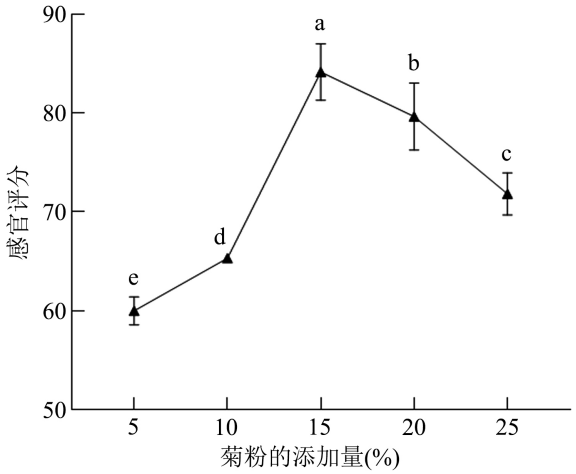


Figure 1. Effect of inulin addition amount on sensory scores of biscuits
图 1. 菊粉添加量对饼干感官评分的影响

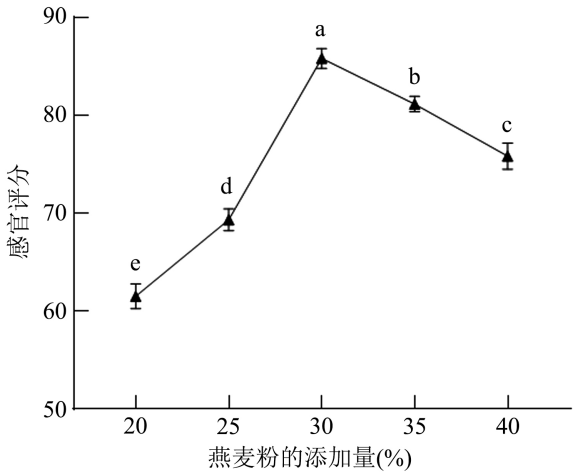


Figure 2. Effect of oat flour addition amount on sensory scores of biscuits
图 2. 燕麦粉添加量对饼干感官评分的影响

3.1.3. 黄油添加量对饼干感官评分的影响

依据实验设定，各类黄油添加比例(10%、15%、20%、25%及 30%)对饼干感官评价的影响情况见图表 3。从图 3 能够看出，在黄油添加量处于 10%至 30%区间时，菊粉燕麦全麦饼干的感官评分呈现出先增后减的显著波动趋势。当黄油添加比例达到 25%时，饼干在外观、口感及风味等维度均表现优异，感官评价得分达到峰值。实验结果表明，黄油添加量低于 25%时，面团可塑性较差，延展性不足，导致成型困难，同时由于油脂含量不足，产品香气较淡且口感偏硬，影响整体感官品质；反之，当黄油添加量超过 25%时，产品油脂感过重，不仅掩盖了燕麦粉的天然谷物香气，还会导致饼干结构过于松散，同样不利于感官评价。因此，本研究选择 20%、25%和 30%三个梯度作为黄油添加量的优化区间，用于后续响应面实验设计。

3.1.4. 鸡蛋液添加量对饼干感官评分的影响

依据实验设定，各类鸡蛋液添加比例(10%、15%、20%、25%及 30%)对饼干感官评分的影响呈现于

图 4。从图 4 可见，菊粉燕麦全麦饼干的感官评分在鸡蛋液添加比例为 20%时达到峰值，当添加比例超过 20%后，评分出现显著下降趋势。实验数据表明，当鸡蛋液添加量低于 20%时，面团黏着性不足，导致产品成型性差且质地偏硬；而添加量超过 20%又会造成面团过软，影响饼干酥脆度。因此，本研究最终选取 15%、20%和 25%三个梯度作为鸡蛋液添加量的优化区间，用于后续响应面实验设计。

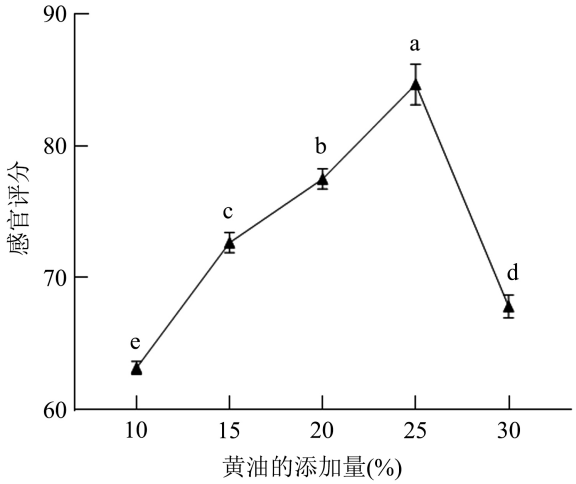


Figure 3. Effect of butter addition amount on sensory scores of biscuits
图 3. 黄油添加量对饼干感官评分的影响

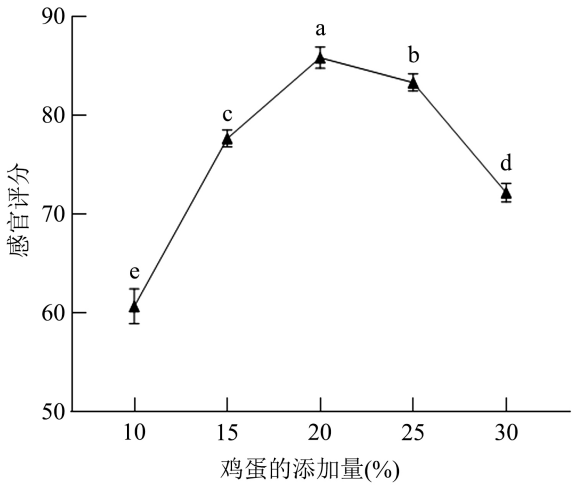


Figure 4. Effect of egg-liquid addition amount on sensory scores of biscuits
图 4. 鸡蛋液添加量对饼干感官评分的影响

3.2. 响应面试验结果与分析

3.2.1. 实验因素和水平的选取

基于单因素实验的系统分析，本研究确定了影响菊粉燕麦全麦饼干品质的四个关键因素：A (菊粉添加量)、B (燕麦粉添加量)、C (黄油添加量)和 D (鸡蛋液添加量)。为优化产品配方，采用 4 因素 3 水平的实验设计方法开展研究。各因素的具体水平设置详见表 2 所示。

Table 2. Factors and levels for response-surface analysis
表 2. 响应面分析因素和水平表

水平	因素			
	A 菊粉添加量/%	B 燕麦粉添加量/%	C 黄油添加量/%	D 鸡蛋液添加量/%
−1	10	25	20	15
0	15	30	25	20
1	20	35	30	25

3.2.2. 回归模型的建立与分析

本研究采用四因素三水平的响应面分析法，系统考察了 A (菊粉添加量)、B (燕麦粉添加量)、C (黄油添加量)和 D (鸡蛋液添加量)各成分用量变化对产品色泽、组织等感官品质的影响程度。以感官评分为响应值，通过 Design-Expert 软件构建二次多项式回归模型，分析各因素及其交互作用对产品品质的影响规律。完整的实验设计方案及对应的感官评分结果如表 3 所示，包括 29 组实验点的因素水平组合及实测响应值。

Table 3. Experimental design and results of response-surface analysis
表 3. 响应面分析实验与结果

序号	A	B	C	D	感官评分
1	−1 (10%)	−1 (25%)	0 (25%)	0 (20%)	81
2	1 (20%)	−1	0	0	80
3	−1	1 (35%)	0	0	81
4	1	1	0	0	85
5	0 (15%)	0 (30%)	−1 (20%)	−1 (15%)	84
6	0	0	1 (30%)	−1	81
7	0	0	−1	1 (25%)	86
8	0	0	−1	1	79
9	−1	0	0	−1	82
10	1	0	0	−1	82
11	−1	0	0	1	80
12	1	0	0	1	83
13	0	−1	−1	0	85
14	0	1	−1	0	85
15	0	−1	1	0	78
16	0	1	1	0	83
17	−1	0	−1	0	84
18	1	0	−1	0	84

续表

19	−1	0	1	0	78
20	1	0	1	0	80
21	0	−1	0	−1	81
22	0	1	0	−1	85
23	0	−1	0	1	82
24	0	1	0	1	83
25	0	0	0	0	84
26	0	0	0	0	85
27	0	0	0	0	85
28	0	0	0	0	84
29	0	0	0	0	85

采用 Design-Expert 软件对表 3 实验数据进行多元回归分析，建立如下二次多项式回归模型：

$$Y = 84.60 + 0.6667A + 1.25B - 2.42C - 0.1667D + 1.25AB + 0.5000AC + 0.7500AD + 1.25BC + 0.7500BD - CD - 1.97A^2 - 0.8417B^2 - 1.09C^2 - 0.9667D^2$$

对建立的回归模型进行方差分析及显著性检验，结果如表 4 所示。分析数据显示，该模型的 F 值达到 82.57 ($P < 0.0001$)，表明回归模型具有高度统计学意义。模型的决定系数 $R^2 = 0.9880$，调整决定系数 $R^2_{Adj} = 0.9761$，说明该模型能解释 97.61%的响应值变化，预测值与实测值吻合度良好。这些统计参数证实，所建立的二次回归模型能准确反映各因素与响应值之间的关系，可用于菊粉燕麦全麦饼干配方的优化预测。

表 4 的方差分析结果表明，四个关键因素对饼干综合评分的影响程度存在显著差异，其主效应大小排序如下：黄油添加量 > 燕麦粉添加量 > 菊粉添加量 > 鸡蛋液添加量。这一排序结果说明，在配方优化过程中应优先考虑黄油和燕麦粉的添加比例。变量 A、B、C、D 均对饼干品质有显著影响，其中 AB、AC、AD、BC、BD、CD 的交互作用较为显著($P < 0.05$)，且 A^2、B^2、C^2、D^2 对综合评分的影响达到极显著水平，因此可开展后续分析。

Table 4. Analysis of variance for quadratic regression equation of response-surface
表 4. 响应面二次回归方程的方差分析

来源	平方和	自由度	均方	*F* 值	显著性 *P*
模型	147.25	14	10.52	82.57	< 0.0001
A	5.33	1	5.33	41.87	<0.0001
B	18.75	1	18.75	147.20	<0.0001
C	70.08	1	70.08	550.19	<0.0001
D	0.3333	1	0.3333	2.62	0.1280
A-B	6.25	1	6.25	49.07	<0.0001

续表

A-C	1.0000	1	1.0000	7.85	0.0141
A-D	2.25	1	2.25	17.66	0.0009
B-C	6.25	1	6.25	49.07	<0.0001
B-D	2.25	1	2.25	17.66	0.0009
C-D	4.00	1	4.00	31.40	<0.0001
A^2	25.09	1	25.09	196.95	< 0.0001
B^2	4.60	1	4.60	36.07	< 0.0001
C^2	7.73	1	7.73	60.69	< 0.0001
D^2	6.06	1	6.06	47.58	< 0.0001
残差	1.78	14	0.1274		
失拟	0.5833	10	0.0583	0.1944	0.9387
纯误差	1.20	4	0.3000		

3.2.3. 因素的交互作用分析

为考察各配方组分间的协同效应，基于回归模型开展交互作用分析，确定最佳原料配比。通过 Design-Expert 软件处理实验数据，生成反映不同添加量组合对饼干感官品质影响的响应面曲面图谱(图 5~10)。

响应面三维图谱直观展示了不同配方因素对饼干品质的影响规律。通过分析图谱的曲面坡度变化可以发现，坡度越陡峭的因素对感官评分的影响越显著。具体而言，图谱中曲面的倾斜程度直接反映了各因素的效应强度——坡度越大表明该变量的调节作用越强。如图 5~10 所示，这些响应面图谱清楚地揭示了菊粉等原料添加量变化对产品感官品质的作用趋势，其排序为 C > B > A > D。经深入分析，这一结论与方差分析所获结果高度吻合，进一步验证了该排序的准确性与可靠性。从 3D 图看图 5、图 8、图 10 等高线曲率最大，图 6、图 7、图 9 次之，因而可以看出 AB、BC、CD 的交互作用极显著，AC、AD、BD 交互作用高度显著。

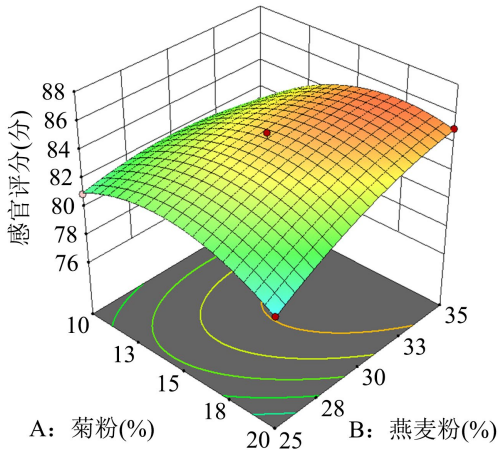


Figure 5. Response-surface plot for the interaction between inulin and oat flour addition amounts on sensory scores of biscuits

图 5. 不同菊粉和燕麦粉添加量交互作用对饼干感官评分影响的响应曲面图

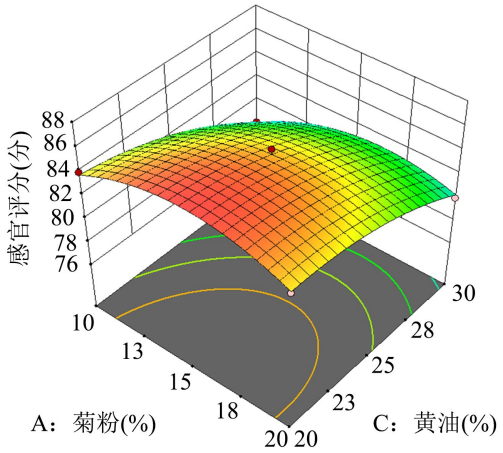


Figure 6. Response-surface plot for the interaction between inulin and butter addition amounts on sensory scores of biscuits
图 6. 不同菊粉和黄油添加量交互作用对饼干感官评分影响的响应曲面图

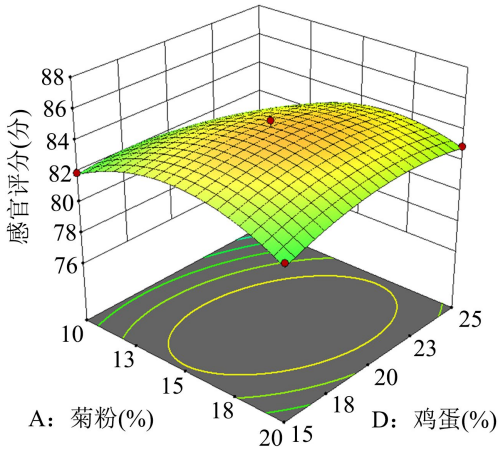


Figure 7. Response-surface plot for the interaction between egg-liquid and inulin addition amounts on sensory scores of biscuits
图 7. 不同鸡蛋和菊粉添加量交互作用对饼干感官评分影响的响应曲面图

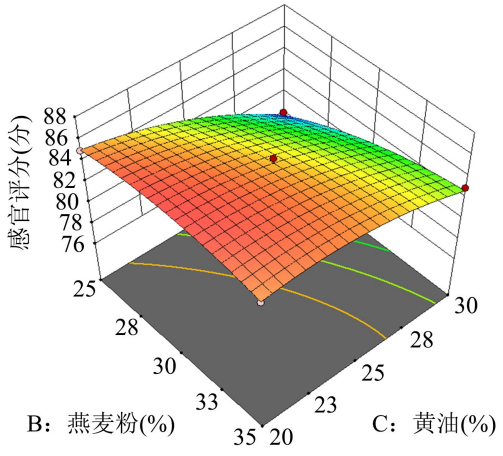


Figure 8. Response-surface plot for the interaction between butter and oat flour addition amounts on sensory scores of biscuits
图 8. 不同黄油和燕麦粉添加量交互作用对饼干感官评分影响的响应曲面图

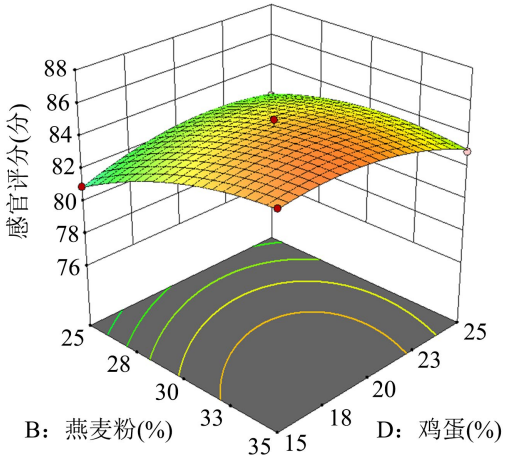


Figure 9. Response-surface plot for the interaction between egg-liquid and oat flour addition amounts on sensory scores of biscuits
图 9. 不同鸡蛋和燕麦粉添加量交互作用对饼干感官评分影响的响应曲面图

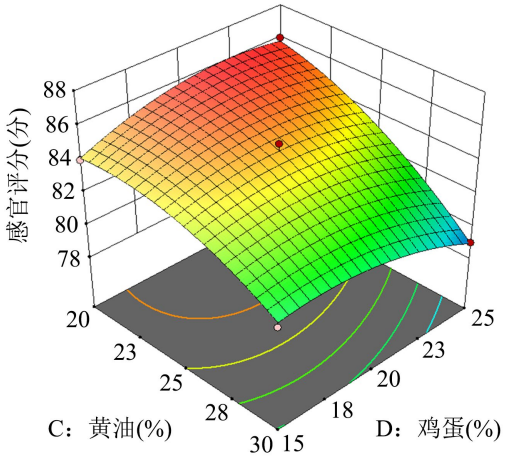


Figure 10. Response-surface plot for the interaction between butter and egg-liquid addition amounts on sensory scores of biscuits
图 10. 不同黄油和鸡蛋添加量交互作用对饼干感官评分影响的响应曲面图

3.2.4. 验证实验

通过响应面优化分析，最终确定菊粉燕麦全麦饼干的最佳配方配比为：以 50 g 全麦粉为基准，添加 15%菊粉、29%燕麦粉、20%黄油和 23%鸡蛋液。经 Design-Expert 软件预测，该配方组合的综合评分为 86.1 分。验证实验显示，优化配方(A’B’C’D’)的实际评分(86.23 分)与中心点组合(A0B0C0D0) (86.06 分)基本吻合，且略优于后者。因此，最终选定 A’B’C’D’作为最优生产工艺配方 6。

3.3. 理化指标检测结果

由表 5 可知，按照最优配方制成的菊粉燕麦全麦饼干理化及微生物指标检测结果均符合国家标准《饼干质量通则》(GB/T 20980—2021)要求，为合格产品，其膳食纤维含量为 23.92 g/100g，丰富了曲奇饼干的营养价值。菊粉燕麦全麦饼干酸价为 0.46 mg/g，过氧化值为 0.037 g/100g，符合 GB 7100—2015《食品安全国家标准饼干》[18]中对酸价和过氧化值的限定值要求。此外，分析结果还揭示了菊粉燕麦全麦饼干具有较小的韧性，易于嚼碎。

Table 5. Determination results of physicochemical indexes
表 5. 理化指标检测

检测指标	测定结果
蛋白质含量(g/100g)	4.68 ± 0.21
脂肪含量(g/100g)	25.47 ± 0.88
膳食纤维(g100g)	23.92 ± 0.75
酸价(mg/g)	0.46 ± 0.01
过氧化值(g/100g)	0.037 ± 0.00
细菌菌落总数(CFU/g)	0.14×10^2
大肠杆菌(CFU/g)	未检出
硬度/N	75.42 ± 13.27
脆度/N	75.42 ± 13.27
咀嚼性/N	90.39 ± 24.70
黏聚性	1.25 ± 0.18
回复性	3.76 ± 2.45

4. 讨论

本文研究了菊粉添加量、燕麦粉添加量、黄油添加量和鸡蛋添加量 4 个单因素对菊粉燕麦全麦饼干感官品质的影响，通过响应面试验法以感官评分确定最优配方：菊粉的添加量 15%，燕麦粉添加量 29%，黄油的添加量 20%，鸡蛋液的添加量 23%。面团调制、烘烤过程中，菊粉、燕麦中的特征功能成分会发生一系列物理化学变化，各组分之间相互作用，共同决定饼干的组织、口感、色泽与风味。

在和面阶段，菊粉作为水溶性果聚糖，具有强持水性，会竞争面团体系中的自由水，一方面抑制部分面筋蛋白充分吸水、交联，另一方面提升面团黏度。菊粉添加适宜时，适度弱化面筋网络，有利于饼干获得酥脆质地；菊粉添加过高时，过度抢夺水分，面筋水化严重受阻，面团黏度过大，成型困难，烘烤后饼干易出现表面龟裂、结构松散的现象。燕麦粉中富含 β-葡聚糖与不可溶性膳食纤维，β-葡聚糖同样具备强吸水溶胀特性，燕麦膳食纤维颗粒会物理切割、稀释面筋网络；燕麦粉添加量较低时，对面筋破坏作用小，可带来浓郁谷物香气；燕麦粉添加过高，连续面筋骨架被大量纤维破坏，面团延展性变差，成品饼干坚硬粗糙。黄油在和面阶段起到润滑作用，包裹面筋蛋白，阻碍面筋大分子交联，降低面团弹性，赋予饼干疏松酥脆的基础；鸡蛋中蛋白质吸水溶胀，为饼坯提供一定的结构支撑。

同时通过文献查阅未发现菊粉燕麦全麦饼干相关的研究，但在其他相关食品的开发中有所报道。杨佳雨等[26]通过研究不同菊粉添加量对面包品质特性的影响，实验结果表明，当配方中菊粉含量为 10% 时，制作的面包在比容、质构和风味等关键指标上均表现出最优异的综合品质。毛红艳等人[27]分析菊粉添加量对面团糊化、发酵以及粉质、拉伸特性的影响，开展馕感官和质构特性评价与分析，菊粉显著影响了面团加工特性和馕的质构特性，最终确定菊粉添加量为 6%。马成章等人[28]研发了一款粗粮饼干，结果表明，菊粉的添加量对饼干的感官评分具有显著的影响，最终确定菊粉添加量为 19%。本研究结果发现，菊粉添加量对菊粉燕麦全麦饼干的风味和口感亦具有明显的影响，经优化确定菊粉添加量为 15%。贾丽娇等人[29]通过在发酵乳中添加不同比例的菊粉，系统考察其对产品品质特性及感官接受度的影响。

将功能性膳食纤维菊粉与益生菌发酵乳有机结合，成功研制出一款兼具营养与风味的功能性发酵乳制品。由此可见，菊粉在食品加工中局限性较小，可广泛应用于面包、饼干、面条等的产品研发中。本文研制的菊粉燕麦全麦饼干在一定程度上丰富了菊粉相关食品的种类，为菊粉的深精加工及产品开发提供一定的思路和理论基础。

基于丰富的营养价值，燕麦粉在食品的研发过程中应用较为普遍。例如，在燕麦面包的研制中，以燕麦全粉和燕麦麸为原料生产面包，探究超高压预处理对燕麦面包加工特性的影响，为杂粮烘焙类食品开发提供理论依据和生产实践[30]。燕麦粉在饼干的研制方面，李娜等人[31]研究添加燕麦粉对面团特性和饼干品质的影响，结果表明，燕麦粉添加量 30%最优，燕麦饼干软硬适中、感官评分最高；孙芝杨等人[32]以富含膳食纤维的鹰嘴豆和燕麦为主要原料，生产一种富含膳食纤维的饼干，其中燕麦粉最优添加量为 12%。可见，不同类型的饼干，燕麦粉添加量变化较大，须根据相关产品配方、工艺及感官评定结果进行优化确定。

5. 结论

综上所述，黄油添加量、燕麦粉添加量、菊粉添加量、鸡蛋液添加量均会显著影响菊粉燕麦全麦饼干的感官品质，各因素对感官评分的影响大小排序为：黄油添加量 > 燕麦粉添加量 > 菊粉添加量 > 鸡蛋液添加量。通过响应面优化结合验证试验，确定以 50 g 全麦粉为基准的最优配方：菊粉 15%、燕麦粉 29%、黄油 20%、鸡蛋液 23%，同时添加 20%赤藓糖醇、1%食盐、0.2%小苏打。在此配方条件下制得的饼干感官评分为 86.23 分；产品膳食纤维含量可达 23.92 g/100g，酸价、过氧化值等理化指标，菌落总数、大肠菌群等微生物指标均符合国家食品安全相关标准；质构结果表明饼干韧性小，易于咀嚼，兼具良好适口性与高膳食纤维的营养特点。

本研究仅从配方角度完成产品开发，尚未开展储存货架期实验，未对饼干体外淀粉消化、体内肠道调节功效进行验证。后续可进一步探究不同聚合度菊粉对饼干贮藏稳定性、感官及质构的影响，开展体外消化试验评估饼干的消化特性，为该类功能性烘焙食品的深入开发提供更加全面的数据支撑。本研究可为菊粉、燕麦粉在烘焙食品中的高值化应用提供科学依据。

基金项目

商洛学院教育教学改革研究项目(25jyjx116)；商洛学院一流课程建设项目(25ylkc101)；商洛学院课程思政示范课程(25SFKC07)；校企合作项目(24HKY436)；陕西省 2026 年创新能力支撑计划项目(2026GH-KJFZ-276)。

参考文献

[1] 刘亚萍. 菊粉复配灵芝多糖降血糖作用的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2019.

[2] 张彤, 戚朝霞, 冯雨禾, 等. 超声辅助花生分离蛋白复合菊粉糖基化反应条件的优化及性质研究[J]. 中国调味品, 2025, 50(2): 67-74, 111.

[3] 李烜, 罗登林, 向进乐, 等. 菊粉的性质、功能及在食品中的应用进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 185-192.

[4] 徐小琴, 杨立琛, 邓桂龙, 等. 菊粉与谷物粉润肠通便作用的初步研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(12): 183-186.

[5] 张之握. 菊粉的特性、功能及其在食品中的应用[J]. 中国果菜, 2022, 42(8): 51-55.

[6] 曲春波, 徐小琴, 刘小杰. 低糖菊粉甜品的研制[J]. 食品工业, 2021, 42(2): 17-19.

[7] Canale, M., Sanfilippo, R., Strano, M.C., Bavaro, A.R., Amenta, M., Bizzini, M., *et al*. (2024) Technological Properties of Inulin-Enriched Doughs and Breads, Influence on Short-Term Storage and Glycemic Response. *Foods*, **13**, Article 2711. https://doi.org/10.3390/foods13172711

[8] 于晴, 李雪琴. 菊粉对冷冻熟面冻藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(15): 214-221.

[9] 任长忠, 闫金婷, 董锐, 等. 燕麦营养成分、功能特性及其产品的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 438-446.

[10] Joyce, S.A., Kamil, A., Fleige, L. and Gahan, C.G.M. (2019) The Cholesterol-Lowering Effect of Oats and Oat β Glucan: Modes of Action and Potential Role of Bile Acids and the Microbiome. *Frontiers in Nutrition*, **6**, Article 171. https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00171

[11] McGorrin, R.J. (2019) Key Aroma Compounds in Oats and Oat Cereals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **67**, 13778-13789. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00994

[12] Yue, J., Gu, Z., Zhu, Z., Yi, J., Ohm, J., Chen, B., *et al*. (2021) Impact of Defatting Treatment and Oat Varieties on Structural, Functional Properties, and Aromatic Profile of Oat Protein. *Food Hydrocolloids*, **112**, Article ID: 106368. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106368

[13] 刘会省, 王彦明, 任文秀. 燕麦营养成分研究进展[J]. 现代食品, 2021(6): 127-130, 141.

[14] 袁贵英, 王彦平, 姬长新, 等. 紫淮山与燕麦粉对酥性饼干品质及营养特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(17): 100-106.

[15] 吴杨林, 上官玲玲, 王浩明, 等. 红茶燕麦饼干加工工艺研究[J]. 农产品加工, 2025(5): 56-62.

[16] 冯文婕, 阙斐. 低糖菊粉绿豆糕的制备及其品质分析[J]. 食品工业, 2025, 46(2): 20-23.

[17] 夏南, 李飞, 刘晓媛. 低糖韧性饼干配方优化及其消化特性和内部结构特征评价[C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第十八届年会摘要集. 信阳: 信阳农林学院食品学院; 2022: 186.

[18] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 7100—2015 食品安全国家标准 饼干[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

[19] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.5—2025 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[20] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.6—2025 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[21] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.227—2023 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.

[22] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.229—2025 食品安全国家标准 食品中酸价的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[23] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.88—2014 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[24] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 4789.2-2022 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, 2022.

[25] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 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[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[26] 杨佳雨, 孙雪婷, 娄雨龙, 等. 脂肪替代物对吐司面包感官及质构特性的影响[J]. 农业科技与装备, 2025(2): 45-48.

[27] 毛红艳, 王佳敏, 岳丽, 等. 菊粉对面团加工特性及馕质构特性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(4): 93-100.

[28] 马成章, 刘杨, 刘腾霄, 等. 响应面法优化菊粉粗粮饼干配方及其通便功效研究[J]. 保鲜与加工,2024, 24(8): 66-73.

[29] 贾丽娇, 王菁, 姜旭, 等. 菊粉对发酵乳品质的影响及功能性研究[J]. 中外食品工业, 2024(16): 24-26.

[30] 姜洒洒, 胡新中. 超高压预处理对高含量燕麦面包的加工特性影响[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(5): 43-52.

[31] 李娜, 陈前, 李海峰, 等. 燕麦粉对小麦面团特性及饼干品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021,42(1): 134-140.

[32] 孙芝杨, 田其英, 汪菊萍, 等. 鹰嘴豆燕麦饼干的研制[J]. 食品工业, 2023, 44(9): 94-98.