

酱油渣不溶性膳食纤维饼干配方的优化及品质分析

陈如扬¹, 张猛猛², 闵甜¹, 赖富饶¹, 吴晖^{1*}, 贺萍^{3*}

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 仲恺农业工程学院化学化工学院, 广东广州 510225) (3. 广东海洋大学食品科学与工程学院, 广东阳江 529500)

摘要: 以低筋面粉、酱油渣不溶性膳食纤维、麦芽糖醇、黄油等为主要原料, 通过单因素试验和响应面试验优化酱油渣不溶性膳食纤维饼干配方。当低筋面粉添加量为 96 wt.%、酱油渣不溶性膳食纤维添加量为 4 wt.%、水添加量为 35.89 wt.%、麦芽糖醇添加量为 35 wt.%、黄油添加量为 11.39 wt.%、蛋液添加量为 15 wt.%、奶粉添加量为 15 wt.%、小苏打添加量为 1 wt.%、食盐添加量为 0.25 wt.%时, 酱油渣不溶性膳食纤维的感官评价得分可达 81.7, 相比优化前提升了 17.55%。品质分析结果表明, 与对照组相比, 酱油渣不溶性膳食纤维饼干的 L^* 、 a^* 、 b^* 及硬度更低, 更加酥脆, 但电子鼻及电子舌检测结果无明显差异。此外, 酱油渣不溶性膳食纤维饼干具有更低的预测升糖指数。因此酱油渣不溶性膳食纤维饼干具有更好的品质特性, 符合大众对健康的追求, 有较好的市场前景。

关键词: 酱油渣; 不溶性膳食纤维; 饼干

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0575

Optimization and Quality Analysis of Soy sauce Residue Insoluble Dietary Fiber Biscuit

CHEN Ruyang¹, ZHANG Mengmeng², MIN Tian¹, LAI Furao¹, WU Hui^{1*}, HE Ping^{3*}

(1.College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(2.College of Chemistry and Chemical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China) (3.College of Food Science and Engineering, Guangdong Ocean University, Yangjiang 529500, China)

Abstract: Using low-gluten flour, soy sauce residue insoluble dietary fiber, maltitol, and butter as the main raw materials, the formula of soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuits was optimized through single-factor and response surface methodology. When the addition amount of low-gluten flour was 96 wt.%, the addition amount of soy sauce residue insoluble dietary fiber was 4 wt.%, the addition amount of water was 35.89 wt.%, the addition amount of maltitol was 35 wt.%, the addition amount of butter was 11.39 wt.%, the addition amount of egg liquid was 15 wt.%, the addition amount of milk powder was 15 wt.%, the addition amount of baking soda was 1 wt.% and the addition amount of salt was 0.25 wt.%, the sensory evaluation score of soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuits could reach 81.7, which was 17.55% higher than that before optimization. Quality analysis results showed that compared to the control group, the soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuits exhibited lower L^* , a^* , and b^* values along with reduced hardness, while demonstrating improved crispness. However, there was no significant difference in the test results of electronic nose and electronic tongue. In addition, soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuits had a lower predicted glycemic index. Therefore, soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuits have better quality characteristics, meet the public's pursuit of health, and have a promising market prospect.

Key words: soy sauce residue; insoluble dietary fiber; biscuit

收稿日期: 2025-01-22; 修回日期: 2025-03-14; 接受日期: 2025-03-18

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2022B0202020003)

作者简介: 陈如扬 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然产物的开发与应用, E-mail: 452838701@qq.com

通讯作者: 吴晖 (1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 天然产物的开发与应用, E-mail: fehwu@scut.edu.cn; 共同通讯作者: 贺萍 (1994-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: hepingscut@163.com

随着社会经济的发展, 人们的饮食习惯发生很大的变化, 表现为摄入的高糖、高油、低膳食纤维的不健康食品增多。这些行为的改变导致了高血糖、高血脂等症状的快速增长。已有研究表明, 饮食的干预, 特别是富含膳食纤维的饮食可以有效改善机体糖脂代谢紊乱, 降低肥胖、2 型糖尿病及心血管疾病等代谢相关疾病的发生风险^[1]。膳食纤维是指在小肠中不易消化和吸收, 而在大肠中完全或部分发酵的植物可食用部分^[2], 包括非淀粉多糖、抗性淀粉、抗性低聚糖等物质^[3]。根据溶解度不同, 膳食纤维分为可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维。其中, 不溶性膳食纤维已被报道具有促进肠道蠕动、增加粪便体积、调节肠道微生物、促进肠道健康、改善胰岛素抵抗、改善糖脂代谢等作用, 对人体健康十分有利^[4-7]。

饼干是一种深受消费者喜爱的烘焙类食品, 但传统饼干产品的制作过程中往往添加了大量的糖和油, 且部分饼干产品属于高升糖指数食品, 限制了高血糖、高血脂等消费群体的选择^[8,9]。近年来, 有学者开始利用食品加工副产物开发一系列高膳食纤维饼干, 如蔗渣纤维饼干^[10]、玉米渣纤维饼干^[11]、茶渣纤维饼干^[12]。这不仅能够扩大食品加工副产物的应用, 增加其附加值, 也更加顺应当前消费者对于营养和健康的需求。

酱油是一款以大豆和/或脱脂大豆、小麦和/或小麦粉和/或麦麸为主要原料, 经微生物发酵制成的具有特殊色、香、味的液体调味品^[13]。酱油渣为酱油生产过程中所产生的副产物, 每生产 1 kg 的酱油, 会产生 0.67 kg 的酱油渣^[14]。2020 年我国酱油产量达 700.8 万 t^[15], 因此, 我国每年都会产生大量的酱油渣。酱油渣营养含量十分丰富, 具有较高的潜在利用价值。然而, 目前酱油渣主要被用作饲料、肥料或直接废弃^[16], 资源利用率较低。膳食纤维是酱油渣的主要组成成分之一^[17], 且以不溶性膳食纤维为主。相比于其他富含膳食纤维的食品加工副产物(如蔗渣、玉米渣、茶渣等), 其丰富的不溶性膳食纤维成分在食品领域的应用潜力尚未充分发掘。

因此, 本研究将以低筋面粉、酱油渣不溶性膳食纤维、黄油、麦芽糖醇等为主要原料, 通过单因素和响应面试验确定酱油渣不溶性膳食纤维饼干最优配方, 并对其色差、质构、风味及预测升糖指数(pGI)进行分析, 以期研制出一款健康美味的饼干, 扩大酱油渣不溶性膳食纤维在食品领域的应用, 为酱油渣高值化利用提供新途径。

1 材料与方法

1.1 原料

酱油渣不溶性膳食纤维, 实验室自制; 低筋面粉, 山东展艺食品有限公司; 水, 农夫山泉股份有限公司; 黄油、脱脂奶粉, 新西兰乳品牌有限公司; 鸡蛋, 购于广州市美团小象超市; 麦芽糖醇, 冠赢生物科技有限公司; 食盐, 中国盐业股份有限公司; 小苏打, 河北古松农副产品有限公司。

1.2 主要仪器设备

T1-108B 烤箱, 广东美的环境电器制造有限公司; JJ500 电子天平, 美国双杰(兄弟)集团有限公司; Ci60 色差仪, 爱色丽上海色彩科技有限公司; TA-new plus 质构仪, 美国 ISENSO 公司; Pen3 电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司; SA402B 电子舌, 日本 INSENT 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 酱油渣不溶性膳食纤维饼干的基本配方

酱油渣不溶性膳食纤维饼干的基本配方如表 1 所示。

表 1 饼干基本配方 (wt. %)
Table 1 Biscuit basic recipe (wt.%)

低筋面粉	酱油渣不溶性膳食纤维	水	麦芽糖醇	油	奶粉	蛋液	小苏打	食盐
92	8	35	35	20	15	15	1	0.25

1.3.2 酱油渣不溶性膳食纤维饼干的工艺流程及操作要点

1.3.2.1 工艺流程

原辅料预处理→面团调制→静置→辊压→切分、定型→烘烤→常温冷却→酱油渣不溶性膳食纤维饼干

1.3.2.2 操作要点

- (1) 原辅料预处理：黄油加热软化后备用；鸡蛋液搅打至均匀；按照表 1 称取原辅料所需用量。
- (2) 面团调制：将低筋面粉、酱油渣不溶性膳食纤维混匀后，加入黄油、小苏打、麦芽糖醇、脱脂奶粉、蛋液、食用盐，揉成面团后，在室温下静置 20 min；
- (3) 辊压：将面团压成光滑及厚度均匀的面片；
- (4) 切分与定型：用模具按压成型得到厚度、大小均一的饼干胚，饼干胚直径为 3 cm，后将饼干坯平放在烤盘上，用牙签在饼干胚上扎小孔；
- (5) 焙烤：将烤箱提前在 170 ℃下预热 10 min 后，将切分定型好的饼干胚在底火面火均为 170 ℃的条件下烘烤 15 min。烘烤后于室温下冷却至室温后装袋储存，便于后续感官评价。

1.3.3 酱油渣不溶性膳食纤维饼干感官评价

参考国标 GB7100-2015^[18]和文献^[19]制定酱油渣不溶性膳食纤维饼干感官评价表，如表 2 所示。选取 10 名具有食品专业知识背景的学生对不同配方的酱油渣不溶性膳食纤维进行感官评价。

表 2 酱油渣不溶性膳食纤维饼干感官评价表

Table 2 Soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuit sensory evaluation table		
评价指标	描述	分值
形态	外形完整，无气泡和裂痕产生，厚薄均匀，不变形，凹底少	15~20
	外形较完整，有变形、裂痕、气泡和凹底产生，厚薄基本均匀	8~14
	外形不完整，变形、裂痕、气泡和凹底现象多，厚薄不均匀	1~7
色泽	金黄色，有光泽，色泽均匀，无过焦、过白现象产生	15~20
	黄褐色，较有光泽，色泽较为均匀，过焦、过白现象很少	8~14
	无光泽，色泽不均匀，有大量过焦、过白现象产生	1~7
组织状态	断面结构呈多孔状，细密，无孔洞、杂质	15~20
	断面结构呈多孔状，较细密，孔洞小，杂质少	8~14
	断面结构呈多孔状，不细密，孔洞大，杂质多	1~7
风味	香味纯正，略带甜味，无异味	15~20
	香味略淡，甜味不明显，有轻微的异味	8~14
	香味淡，无甜味，有异味	1~7
滋味与口感	甜度适中，不油腻，硬度适中，酥脆，不粘牙，适口性好	15~20
	甜度偏淡或偏甜，偏油，硬度偏硬，较酥脆，略粘牙，适口性一般	8~14
	过甜或过淡，油腻，质地坚硬，无酥脆性，粘牙，适口性差	1~7

1.3.4 酱油渣不溶性膳食纤维饼干配方的优化试验

1.3.4.1 单因素试验

在酱油渣不溶性膳食纤维饼干基本配方的基础上，探究不同的因素，即酱油渣不溶性膳食纤维添加量（4 wt.%、6 wt.%、8 wt.%、10 wt.%、12 wt.%）、水添加量（25 wt.%、30 wt.%、35 wt.%、40 wt.%、45 wt.%）、麦芽糖醇添加量（25 wt.%、30 wt.%、35 wt.%、40 wt.%、45 wt.%）、黄油添加量（10 wt.%、15 wt.%、20 wt.%、25 wt.%、30 wt.%）对酱油渣不溶性膳食纤维饼干感官品质的影响。

1.3.4.2 响应面试验

表 3 酱油渣不溶性膳食纤维饼干响应面试验因素水平编码表

Table 3 Response surface test factor level coding table of soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuit				
水平	A 酱油渣不溶性膳食纤维添加量/wt.%	B 水添加量/wt.%	C 麦芽糖醇添加量/wt.%	D 黄油添加量/wt.%
-1	4	30	25	10
0	6	35	30	15
1	8	40	35	20

本研究在单因素试验结果的基础上,采用 Design Expert 13.0 软件设计响应面试验,以酱油渣不溶性膳食纤维添加量、水添加量、麦芽糖醇添加量和黄油添加量作为自变量,以感官评价得分作为响应值,各试验因素的水平编码见表 3。

1.3.5 色差

采用色差仪测定饼干的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.3.6 饼干全质构分析

使用质构仪测定饼干的硬度、脆性、咀嚼性、内聚性、胶着性、回复性、弹性。质构测试条件:测前速度 2.0 mm/s;测定速度 1.0 mm/s;测后速度 2.0 mm/s,探头 P/36R,压缩比 30%,触发力 5.0 g,停留时间 5 s。

1.3.7 饼干电子鼻分析

利用电子鼻检测饼干样品的挥发性风味物质。称取 1.3 g 研磨粉碎后的样品,在 25 °C 恒温箱中静置 30 min 后再进行测定。测定条件:样品准备时间 5 s,检测时间 60 s,数据采集间隔 1 s/组,传感器自清洗时间 60 s,传感器归零时间 5 s,进样流量为 400 mL/min。

1.3.8 饼干电子舌分析

采用电子舌检测饼干样品的苦味、甜味、咸味、涩味回味、苦味回味、涩味。称取 6 g 研磨粉碎后的样品,加入 120 mL 水,进行充分搅拌处理后于 4 800 r/min 条件下离心 10 min,收集上清液用于后续测定。参比溶液由 KCl 与酒石酸溶液配制而成。负极清洗液由水、乙醇和盐酸配制而成,正极清洗液由氯化钾、水、乙醇和氢氧化钾配制而成。测试前,将传感器浸入参比溶液中进行 30 s 基线校准后再开始测定。检测时间为 30 s,检测完成后用参比溶液进行 3 s 快速清洗后,再进行测定。由于在饼干制作过程中添加了少量的小苏打使得饼干的 pH 值为 7.6,无法达到酸味(pH 值 2~5)、鲜味(pH 值 2~7)的检测条件,因此只检测出了甜味、苦味、涩味、苦味回味、涩味回味、咸味等 6 个味觉指标。

1.3.9 体外淀粉消化和预测升糖指数的计算

参照文献^[9,20]。称取饼干样品(0.5 g),加入 10 mL 乙酸钠缓冲液(0.2 mol·L⁻¹, pH 值 5.2),再加入 10 mL 胰酶(300 U/mL)和 40 μL 糖化酶(10 000 U/mL)。混合均匀后,将其置于 37 °C 恒温振荡水浴中以 150 r/min 孵育 120 min,每 30 min 取一次等分试样(0.5 mL),再加入 2 mL 无水乙醇混合以停止酶反应。使用 3,5-二硝基水杨酸比色法检测样品的葡萄糖含量,绘制消化过程中葡萄糖释放量与时间的关系图,计算曲线下面积(AUC)。并根据下列公式计算水解指数(HI)和 pGI。

$$HI = \frac{AUC_1}{AUC_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

HI——水解指数, %

AUC_1 ——体外淀粉消化过程中,饼干样品水解曲线的曲线下面积;

AUC_2 ——体外淀粉消化过程中,白面包水解曲线的曲线下面积。

$$pGI = 39.71 + 0.549 \times HI \quad (2)$$

式中:

pGI——预测升糖指数;

HI——水解指数, %。

1.3.10 数据分析

上述试验均设置 3 个平行,试验结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 27.0 软件进行显著性分析($P < 0.05$)。使用 Origin 2021 软件进行图形绘制。响应面试验数据采用 Design Expert 13 软件进行处理。

2 结果与讨论

2.1 饼干配方的单因素试验结果分析

2.1.1 不同酱油渣不溶性膳食纤维添加量对饼干感官评价的影响

如图 1 所示, 酱油渣不溶性膳食纤维的添加量在 4 wt.%~8 wt.%范围内时, 饼干的感官评价总得分随着酱油渣不溶性膳食纤维添加量的增加而升高, 并在酱油渣不溶性膳食纤维添加量为 8 wt.%时达到最高值, 此时饼干口感酥脆, 色泽均匀且裂痕较少。此后, 随着酱油渣不溶性膳食纤维添加量的增加, 饼干的感官评价总得分显著降低 ($P<0.05$), 此时的饼干表面色泽过深、无光泽, 裂痕增多, 质地坚硬, 口感粗糙。造成这一现象的原因可能包括以下两点: 一是酱油渣不溶性膳食纤维呈现浅棕色, 添加量过多会显著加深饼干色泽; 二是过高的不溶性膳食纤维添加量可能会严重减少面筋网络结构的形成, 从而使饼干产生裂痕, 质地坚硬^[21]。因此, 后续选择酱油渣不溶性膳食纤维添加量 4 wt.%、6 wt.%、8 wt.%进行优化。

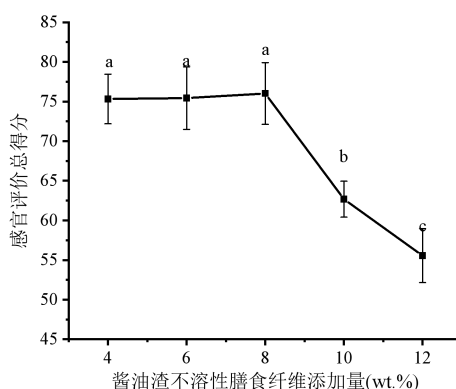


图 1 不同酱油渣不溶性膳食纤维添加量对感官评价总得分的影响

Fig.1 Effects of different soy sauce residue insoluble dietary fiber additions on sensory evaluation scores

注: 不同字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$), 下图同。

2.1.2 不同水添加量对饼干感官评价的影响

如图 2 所示, 当水的添加量为 25 wt.%~45 wt.%时, 饼干感官评价总得分随着水添加量的增加呈现先上升后趋于稳定的趋势。这可能是因为不溶性膳食纤维具有吸水性, 当在面团制作过程中水添加量过少, 会导致面团无法形成。而当水添加量过多时则会导致面筋蛋白过度吸水, 形成较多的面筋结构, 导致饼干质地变硬^[22]。因此, 后续选择水添加量 30 wt.%、35 wt.%、40 wt.%进行优化。

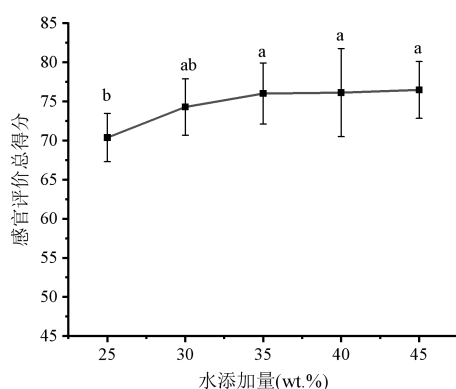


图 2 不同水添加量对感官评价总得分的影响

Fig.2 Effects of different water additions on sensory evaluation scores

2.1.3 不同麦芽糖醇添加量对饼干感官评价的影响

麦芽糖醇是一类较为常见的代糖, 具有低热量、对牙齿健康、与蔗糖特性相近等优点。与其他糖醇类代糖 (如山梨糖醇、木糖醇) 相比, 添加麦芽糖醇所制备的饼干的特性与添加蔗糖所制备的饼干的特性最为相似^[23]。如图 3 所示, 当麦芽糖醇的添加量为 25 wt.%~35 wt.%时, 饼干的感官评价总得分保持稳定。此时饼干甜度适中, 色泽金黄且均匀, 无过焦现象产生。当麦芽糖醇添加量超过 35 wt.%后, 饼干感官评价总得分显著降低, 此时饼干甜度过高, 表面色泽过焦, 无光泽。此外, 麦芽糖醇具有吸水性, 会与面筋竞争水分^[24]。因此, 当添加量过高时会导致面筋水分明显减少, 影响面筋网络结构的形成, 使饼干质地坚硬。因此, 后续选择麦芽糖醇添加量 25 wt.%、30 wt.%、35 wt.%进行优化。

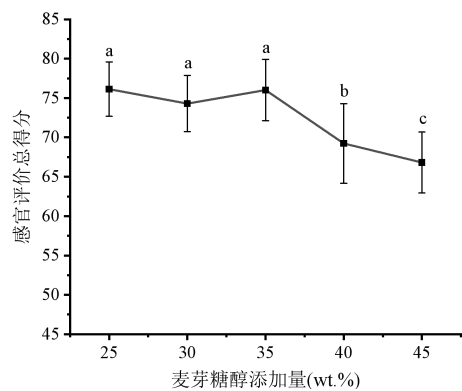


图 3 不同麦芽糖醇添加量对感官评价总得分的影响

Fig.3 Effects of different maltitol additions on sensory evaluation scores

2.1.4 不同黄油添加量对饼干感官评价的影响

如图 4 所示，当黄油添加量在 10 wt.%~30 wt.%范围内时，饼干的感官评价总得分总体上随着黄油添加量增加而降低。当黄油添加量为 10 wt.%和 20 wt.%时，饼干的感官评价总得分无显著差异。当黄油添加量为 30 wt.%时，饼干的感官评价总得分显著低于其他试验组。这可能是因为适当地添加黄油有助于改善面筋网络结构形成，且无油腻感，而当黄油添加量过多时会使饼干口感油腻，溢油性严重^[10]。且黄油添加量过高也不符合消费者对于健康的追求。因此，后续选择黄油添加量 10 wt.%、15 wt.%、20 wt.%进行优化。

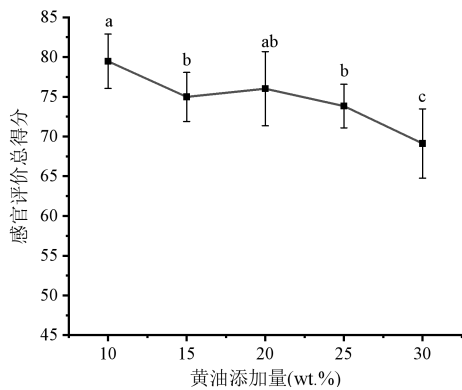


图 4 不同黄油添加量对感官评价总得分的影响

Fig.4 Effect of different butter additions on sensory evaluation score

2.2 饼干配方响应面试验结果分析

2.2.1 响应面优化试验结果

在单因素试验的基础上，选取四因素三水平进行 29 组响应面试验优化酱油渣不溶性膳食纤维饼干配方，结果如表 4 所示。

表 4 酱油渣不溶性膳食纤维饼干 Box-Behnken 试验设计与结果

Table4 Box-Behnken experimental design and results of soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuit					
序号	A 酱油渣不溶性膳食纤维添加量/wt.%	B 水添加量 /wt.%	C 麦芽糖醇添加量 /wt.%	D 黄油添加量 /wt.%	感官评价总得分
1	4	35	25	15	78.20
2	8	40	30	15	72.4
3	6	35	25	10	74.4
4	4	35	30	20	77.20
5	6	35	30	15	77.90

现代食品科技	Modern Food Science and Technology				2025, Vol.41, No.10
6	4	35	35	15	81.50
7	6	35	30	15	78.30
8	6	35	30	15	78.80
9	6	35	35	10	78.50
10	6	30	30	10	74.20
11	6	40	25	15	73.30
12	4	40	30	15	77.30
13	6	35	30	15	79.20
14	6	40	35	15	77.50
15	6	30	25	15	75.10
16	8	35	25	15	74.90
17	4	30	30	15	76.00
18	6	30	35	15	77.70
19	6	35	35	20	77.00
20	6	40	30	20	74.90
21	6	40	30	10	72.7
22	8	30	30	15	76.10
23	6	30	30	20	74.7
24	8	35	30	10	69.50
25	4	35	30	10	78.70
26	6	35	25	20	79.20
27	8	35	30	20	76.00
28	6	35	30	15	78.60
29	8	35	35	15	74.20

2.2.2.2 回归模型的建立

利用 Design-Expert 13 软件对试验数据进行二次多项式回归拟合，得到感官评价总得分与 A、B、C、D 的回归方程为：

$$R=-93.500 \quad 83+6.79A+6.712 \quad 33B+1.115 \quad 33C+2.424 \quad 33D-0.125AB-0.1AC+0.2AD+0.016BC+0.017BD-0.063CD-0.290 \quad 833A^2-0.097 \quad 033B^2+0.000 \quad 967C^2-0.071 \quad 533D^2$$

由表 5 可以看出，模型的 *P* 值<0.000 1，极显著。模型的 *R*² 为 0.927 2，模型合理。模型失拟项 *P* 值为 0.063 7>0.05，不显著。这些结果表明所建立的回归方程在试验范围内拟合良好，可用于预测酱油渣不溶性膳食纤维饼干的感官评价总得分，以筛选确定酱油渣不溶性膳食纤维饼干的最优配方。

具体来看各因素对感官评价得分的影响可知，A、C、D、AB、AD、CD、A²、B²、D²对酱油渣不溶性膳食纤维饼干的感官评价得分具有极显著/显著影响。而 B、AC、BC、BD、C²等因素对酱油渣不溶性膳食纤维饼干的感官评价总得分无显著影响。由各因素的 *F* 值可知，各因素影响程度依次为酱油渣不溶性膳食纤维添加量>麦芽糖醇添加量>黄油添加量>水添加量。

表 5 酱油渣不溶性膳食纤维饼干响应面方差分析结果

Table 5 Response surface variance analysis of soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuit						
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	172.26	14	12.30	12.73	< 0.000 1	**
A-酱油渣不溶性膳食纤维添加量/wt. %	55.47	1	55.47	57.39	< 0.000 1	**
B-水添加量/wt. %	2.71	1	2.71	2.80	0.116 4	ns
C-麦芽糖醇添加量/wt. %	10.64	1	10.64	11.01	0.005 1	**

D-黄油添加量/wt.%	10.08	1	10.08	10.43	0.006 0	**
AB	6.25	1	6.25	6.47	0.023 4	*
AC	4.00	1	4.00	4.14	0.061 3	ns
AD	16.00	1	16.00	16.55	0.001 2	**
BC	0.640 0	1	0.640 0	0.662 2	0.429 4	ns
BD	0.722 5	1	0.722 5	0.747 5	0.401 8	ns
CD	9.92	1	9.92	10.27	0.006 4	**
A ²	8.78	1	8.78	9.08	0.009 3	**
B ²	38.17	1	38.17	39.49	<0.000 1	**
C ²	0.003 8	1	0.003 8	0.003 9	0.951 0	ns
D ²	20.74	1	20.74	21.46	0.000 4	**
残差	13.53	14	0.966 5			
失拟项	12.56	10	1.26	5.17	0.063 7	ns
净误差	0.972 0	4	0.243 0			
总和	185.79	28				

2.2.3 两因素交互作用分析

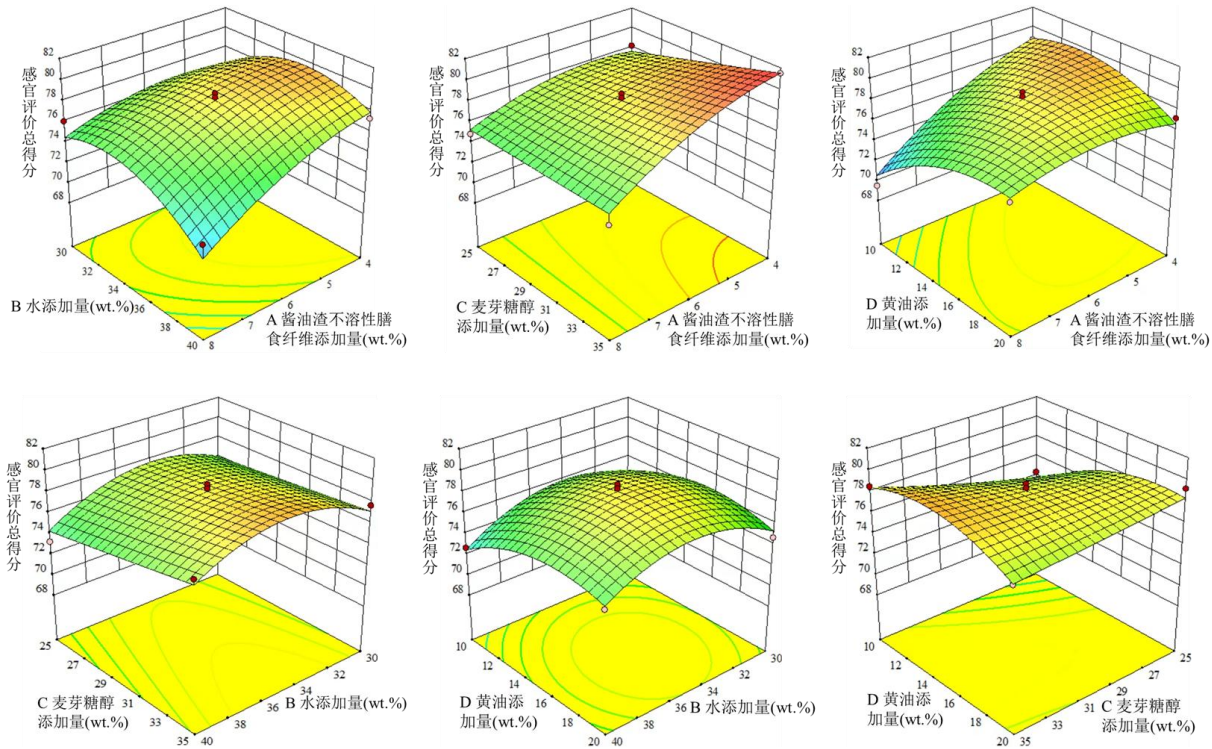


图 5 任意 2 个因素交互作用对感官评价总得分影响的响应面图

Fig.5 Response surface diagram of the impact of interaction of any two factors on the total score of sensory evaluation

响应面图是反映感官评价总得分与各试验因素关系的三维曲面图，可直观呈现最佳配方参数及各因素间的交互作用。如图 5 所示，在任意 2 个因素交互作用对感官评价总得分影响的响应面图中，响应面坡度越陡峭，表明两因素交互作用变化越明显。可明显观察到 A 酱油渣不溶性膳食纤维添加量（wt.%）和 B 水添加量（wt.%）、A 酱油渣不溶性膳食纤维添加量（wt.%）和 D 黄油添加量（wt.%）、C 麦芽糖醇添加量（wt.%）和 D 黄油添加量（wt.%）的响应曲面坡度均较大，这与表 5 中，AB、AD、CD 的交互作用为显著/极显著一致。

2.2.4 最优配方的确定

通过 Design Expert13 软件分析，酱油渣不溶性膳食纤维饼干的最优配方为：酱油渣不溶性膳食纤维添加

量为 4 wt.%、水添加量为 35.89 wt.%、麦芽糖醇添加量为 35 wt.%、黄油添加量为 11.39 wt.%。在此条件下，制作出来的酱油渣不溶性膳食纤维饼干感官评价得分为 81.7，与试验预测得分 82.58 相似。可见该响应面试验得到的回归模型准确性高，具有良好的实用价值。

2.3 饼干感官评价及色差比较

由表 6 可知，对照组饼干的感官评价总得分优于酱油渣不溶性膳食纤维饼干，但不存在显著性差异。这可能是因为不溶性膳食纤维的添加会导致饼干口感变得粗糙。此外，酱油渣不溶性膳食纤维饼干的 L^* 、 a^* 、 b^* 值均小于对照组饼干，表明其色泽较暗，红黄色调较浅。这种颜色的差异主要归因于酱油渣不溶性膳食纤维本身的浅棕色特性，其在添加后会显著影响饼干的色泽。

表 6 饼干的感官评价总得分、色差及 pGI 值比较

Table 6 Comparison of total sensory evaluation score, color difference and pGI value of biscuits					
组别	感官评价总得分	L^*	a^*	b^*	pGI
对照组饼干	84.4±3.69 ^a	71.05±1.20 ^a	8.93±0.48 ^a	27.04±0.36 ^a	93.82
酱油渣不溶性膳食纤维饼干	81.7±2.67 ^a	60.72±0.69 ^b	8.39±0.47 ^a	21.05±0.97 ^b	87.83

注：同一列不同字母表示具有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

2.4 饼干全质构结果分析

饼干的质构特性是评价饼干质量的关键指标。如表 7 所示，酱油渣不溶性膳食纤维饼干的硬度、脆性、弹性、咀嚼性、胶着性、内聚性、回复性均低于对照组饼干。硬度越低表明饼干越酥脆^[25]。这可能是因为不溶性膳食纤维具有吸附性，能够吸附面筋网络结构中的水及淀粉颗粒，阻碍蛋白质分子的相互作用（如谷蛋白、麦醇溶蛋白等）^[9]。也可能是因为酱油渣不溶性膳食纤维的添加稀释了面筋蛋白，影响了面筋网络结构的形成，导致饼干内部的结构变得疏松^[26]。Jia 等^[9]研究发现添加脱脂米糠膳食纤维会降低饼干的硬度、弹性、内聚性、胶着性、咀嚼性和回复性，与本研究结果相似。

表 7 酱油渣不溶性膳食纤维饼干的全质构分析

Table 7 Total texture analysis of soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuits		
指标	空白对照组饼干	酱油渣不溶性膳食纤维饼干
硬度（N）	240.49±31.56 ^a	216.28±18.68 ^a
脆性（N）	171.95±30.1 ^a	136.50±29.9 ^a
弹性	0.75±0.07 ^a	0.64±0.04 ^b
咀嚼性（N）	137.74±26.88 ^a	84.80±16.41 ^b
胶着性	181.81±27.65 ^a	132.73±19.74 ^b
内聚性	0.75±0.03 ^a	0.61±0.05 ^b
回复性	0.38±0.03 ^a	0.29±0.02 ^b

注：同一行不同字母表示具有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

2.5 饼干电子鼻结果分析

2.5.1 电子鼻传感器响应值分析

利用电子鼻技术可初步判断不同样品间挥发性成分的差异。如图 6 所示，酱油渣不溶性膳食纤维饼干和对照组饼干的挥发性成分电子鼻雷达图整体出峰情况较为相似，表明这两种饼干的挥发性风味物质相似。这一结果说明，当酱油渣不溶性膳食纤维添加量为 4 wt.% 时，对饼干挥发性风味成分无明显影响。两组饼干在 10 个不同的传感器中响应值最大的为 W1W，其次为 W2W、W5S、WiS。其余 6 个传感器响应值均较小。根据 PEN3 电子鼻传感器类型可知两种饼干中含有较多的硫化物、芳香成分、有机硫化物、氮氧化物和甲基类化合物。

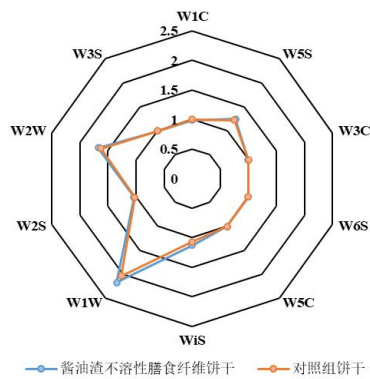


图 6 饼干挥发性成分电子鼻雷达图

Fig.6 Electronic nose radar diagram of volatile components of biscuits

2.5.2 主成分分析（PCA）

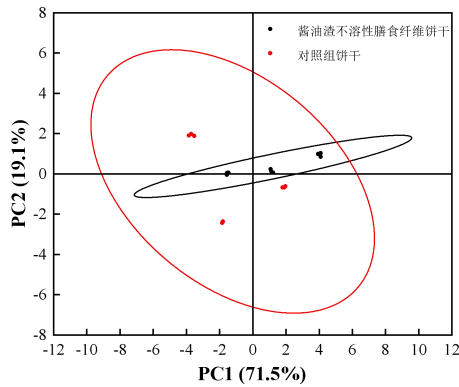


图 7 对照组饼干和酱油渣不溶性膳食纤维饼干挥发性成分 PCA 图

Fig.7 PCA analysis of volatile components of control group biscuits and soy sauce residue insoluble dietary fiber biscuits

图 7 为两组饼干样品的 PCA 图，PC1 贡献率为 71.5%，PC2 贡献率为 19.1%，总贡献率为 90.6%，表明这两个主成分可以反映原始数据的大部分信息。从图 7 中可以明显观察到，酱油渣不溶性膳食纤维饼干和对照组饼干分布的区域，有极大一部分重叠，这表明酱油渣不溶性膳食纤维饼干的挥发性成分与对照组饼干的挥发性成分较为相似。上述结果进一步表明添加酱油渣不溶性膳食纤维（添加量为 4 wt.%）对饼干挥发性成分没有显著影响。

2.6 饼干电子舌结果分析

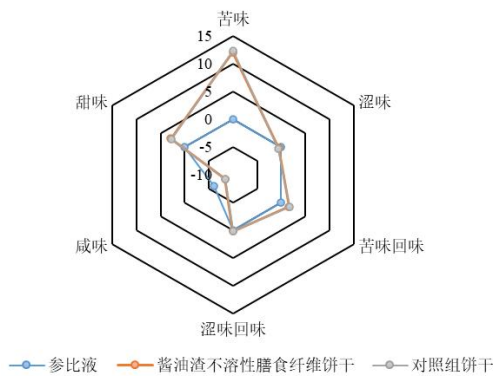


图 8 饼干电子舌雷达图

Fig.8 Biscuit electronic tongue radar map

利用电子舌技术可以客观地量化样品的味觉特征。图 8 为两组饼干的电子舌雷达图。根据电子舌检测原

理可知,当样品的味觉响应值低于参比液时表明样品没有该味觉特征^[27]。由图 8 可知,两组饼干均未检测出涩味、咸味,且涩味回味响应值接近于无味点。此外,从整体上来看,两组饼干在甜味、苦味回味、苦味等味觉指标上的趋势基本上一致。这一结果表明酱油渣不溶性膳食纤维的添加(添加量为 4 wt.%)不会引起饼干的味道发生显著改变。

2.7 饼干体外淀粉消化和预测升糖指数

如图 9 所示,随着消化时间的延长,三个试验组的葡萄糖释放量均逐渐升高。与其他两组相比,酱油渣不溶性膳食纤维饼干在体外消化过程中葡萄糖释放量最低。对照组饼干在经过 120 min 的消化后,葡萄糖释放量与白面包试验组相近。造成这一现象的原因可能有如下三点:一是不溶性膳食纤维能够阻止 α -淀粉酶与底物淀粉结合,延缓淀粉消化^[28];二是不溶性膳食纤维表面的酶抑制剂能够直接作用于 α -淀粉酶,降低 α -淀粉酶活性^[29];三是不溶性膳食纤维能够吸附葡萄糖^[30],从而有效减少葡萄糖的释放量。由表 6 可知,与对照组饼干相比,酱油渣不溶性膳食纤维饼干具有更低的 pGI 值,这表明其可能具有延缓餐后血糖升高的潜在功能,更符合现代消费者对健康食品的需求。

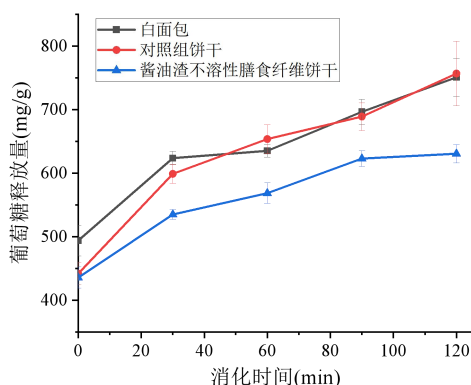


图 9 淀粉体外消化葡萄糖释放曲线

Fig.9 Glucose release curve of starch digestion *in vitro*

3 结论

本文通过单因素和响应面试验优化,得到了酱油渣不溶性膳食纤维饼干的最佳配方,其感官评价总得分较优化前提升了 17.55%。并对酱油渣不溶性膳食纤维饼干的最优配方进行验证试验,发现验证试验结果与回归模型预测结果相近。此外,与对照组饼干相比,酱油渣不溶性膳食纤维饼干外观颜色更暗,感官评价总得分略低,但不存在显著性差异,电子鼻及电子舌检测结果也无明显差异。但相比于对照组饼干,酱油渣不溶性膳食纤维饼干具有更好的质构特性及相对较低的 pGI 值。因此,在饼干中添加酱油渣不溶性膳食纤维不仅能够改善产品质构特性,降低 pGI 值,也能够实现酱油渣的高值化利用,提高资源利用效率。

参考文献

- [1] MUDGIL D, BARAK S. Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 61: 1-6.
- [2] HE Y, WANG B X, WEN L K, et al. Effects of dietary fiber on human health [J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(1): 1-10.
- [3] CRONIN P, JOYCE S A, O'TOOLE P W, et al. Dietary fibre modulates the gut microbiota [J]. Nutrients, 2021, 13(5): 1655.
- [4] MAKKI K, DEEHAN E C, WALTER J, et al. The impact of dietary fiber on gut microbiota in host health and disease [J]. Cell host & microbe, 2018, 23(6): 705-715.
- [5] SINGH V, SAN Y B, WALKER R E, et al. Microbiota fermentation-NLRP3 axis shapes the impact of dietary fibres on intestinal inflammation [J]. Gut, 2019, 68(10): 1801-1812.
- [6] WEICKERT M O, PFEIFFER A F H. Impact of dietary fiber consumption on insulin resistance and the prevention of type 2

- diabetes [J]. The Journal of Nutrition, 2018, 148(1): 7-12.
- [7] 赵曼曼. 亚麻籽粕膳食纤维对肥胖小鼠糖脂代谢的影响及其机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [8] MA Y J, CHAI X Y, BAO H L, et al. Study on nanocellulose isolated from waste chilli stems processing as dietary fiber in biscuits [J]. Plos One, 2023, 18(1): e0281142.
- [9] JIA M Y, YU Q, Chen J J, et al. Physical quality and in vitro starch digestibility of biscuits as affected by addition of soluble dietary fiber from defatted rice bran [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105349.
- [10] 罗梦颖. 蔗渣膳食纤维的改性及其在饼干中的应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
- [11] PARASKEVOPOULOU A, RIZOU T, KIOSSEOGLOU V. Biscuits enriched with dietary fibre powder obtained from the water-extraction residue of maize milling by-product [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2019, 74: 391-398.
- [12] MA Y J, HUANG H R, ZHANG Y, et al. Soluble dietary fiber from tea residues with inhibitory effects against acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation in biscuits: the role of bound polyphenols [J]. Food Research International, 2022, 159: 111595.
- [13] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2717-2018, 酱油[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [14] 张海静, 姜丽君, 张敏等. 多菌发酵挤压酱油渣生产蛋白饲料的工艺研究[J]. 饲料工业, 2022, 43(4): 35-40.
- [15] 吴昌正, 关梓杰, 童星. 酱油渣微生物高效转化研究进展[J]. 广东化工, 2022, 49(21): 111-113+121.
- [16] 张宗卫. 酱油渣无害化处理及其在曲奇中的应用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [17] LIU J B, ZANG L T, XU Q, et al. Drying of soy sauce residue in superheated steam at atmospheric pressure [J]. Drying Technology, 2017, 35(13): 1655-1662.
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 7100-2015, 饼干[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [19] 胡晖宇. 猴头菇饼干制作工艺优化及其贮藏时间对质构的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [20] DI CAIRANO M, CONDELLI N, CELA N, Et al. Formulation of gluten-free biscuits with reduced glycaemic index: focus on in vitro glucose release, physical and sensory properties [J]. Lwt, 2022, 154: 112654.
- [21] HOANG N H, DO H H, DANG T H Y, et al. Fiber-enriched biscuits prepared with enzyme-treated corncob powder: nutritional composition, physical properties, and sensory acceptability [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(8): e16784.
- [22] 高翠银. 豆渣膳食纤维提取及豆渣饼干工艺研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.
- [23] ZOULIAS E I, PIKNIS S, OREOPOULOU V. Effect of sugar replacement by polyols and acesulfame-K on properties of low-fat cookies [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(14): 2049-2056.
- [24] SAHIN A W, AXEL C, ZANNINI E, et al. Xylitol, mannitol and maltitol as potential sucrose replacers in burger buns [J]. Food & Function, 2018, 9(4): 2201-2212.
- [25] 任梅君. 大豆膳食纤维的结构化及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- [26] 高琦, 曹丹, 王迪, 等. 马铃薯全粉对酥性饼干理化性质和结构的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(4): 40-48.
- [27] 林长青. 青稞曲奇饼干配方优化及货架期质量稳定性研究[D]. 海口: 海南大学, 2021.
- [28] 祁静. 高吸附性米糠纤维的制备及其吸附特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [29] NIE C Z P, ZHU P L, WANG M C, et al. Optimization of water-soluble polysaccharides from stem lettuce by response surface methodology and study on its characterization and bioactivities [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105: 912-923.
- [30] OU S Y, KWOK K, LI Y, et al. In vitro study of possible role of dietary fiber in lowering postprandial serum glucose [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(2): 1026-1029.