DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250924001
引用格式: 汤舒婧, 杨梦昕, 顾鑫, 等. 山药燕麦饼干的研制及其体外消化特性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 108–115.
TANG SJ, YANG MX, GU X, *et al*. Development of *Dioscorea opposita* Thunb. and *Avena sativa* L. biscuits and investigation of their digestive properties *in vitro* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 108–115. (in Chinese with English abstract).

山药燕麦饼干的研制及其体外消化特性研究

汤舒婧[1], 杨梦昕[1], 顾　鑫[2], 谭子悦[1], 刘欣悦[1], 黄柳芳[1], 徐晓飞[1,3*]

(1. 广东海洋大学食品科学与工程学院, 阳江　529500; 2. 广东海洋大学机械能源与工程学院, 阳江　529500; 3. 广东海洋大学阳江研究院, 阳江　529500)

摘　要: 目的　以新鲜山药、燕麦和椰子油替代部分传统饼干原料开发健康酥性饼干并对其消化特性进行评价。**方法**　以燕麦粉、新鲜山药匀浆、椰子油和糖的添加量为考察因素, 以感官评分和质构硬度为指标通过单因素试验确定各原料添加量范围并用 Box-Behnken 响应面法优化配方, 然后采用体外消化模型评价优化配方饼干的淀粉水解率。**结果**　单因素法确定各原料的添加范围, 随后以感官综合评分为响应值, 响应面法得到二次多元回归方程, 显示山药匀浆、燕麦、椰子油和糖的添加量对感官评分具有极显著影响(P<0.001), 确定最佳配方为面粉与燕麦粉质量比 73:27, 山药匀浆添加量 14.9%、椰子油添加量 37.5%、糖粉添加量 40.9%, 综合感官评分为 86.79。体外模拟消化表明, 与对照饼干相比, 优化配方的淀粉水解率显著降低, 在 180 min 时水解率为 80%, 低于对照组饼干(85%、87%)。**结论**　添加燕麦粉、新鲜山药匀浆和椰子油的饼干口感良好, 体外消化淀粉水解率降低。本研究为新鲜山药的加工应用和创新抗消化饼干的配方开发提供了参考。

关键词: 山药; 燕麦; 椰子油; 酥性饼干; Box-Behnken 响应面法; 消化特性

Development of *Dioscorea opposita* Thunb. and *Avena sativa* L. biscuits and investigation of their digestive properties *in vitro*

TANG Shu-Jing[1], YANG Meng-Xin[1], GU Xin[2], TAN Zi-Yue[1], LIU Xin-Yue[1], HUANG Liu-Fang[1], XU Xiao-Fei[1,3*]

(1. *College of Food Science and Engineering*, *Guangdong Ocean University*, *Yangjiang* 529500, *China*; 2. *College of Mechanical Energy and Engineering*, *Guangdong Ocean University*, *Yangjiang* 529500, *China*; 3. *Yangjiang Institute of Guangdong Ocean University*, *Yangjiang* 529500, *China*)

ABSTRACT: Objective　To develop healthy shortening biscuits by replacing traditional ingredients with fresh *Dioscorea opposita* Thunb., *Avena sativa* L. and coconut oil and evaluate their digestion properties. **Methods**　Using the quantities of the ingredients of *Avena sativa* L. powder, fresh *Dioscorea opposita* Thunb. homogenate, coconut oil and sugar as variable factors, sensory scores and textural hardness were used as indicators to determine the ranges of

收稿日期: 2025-09-24
基金项目: 广东省 2022 省科技专项资金("大专项+任务清单")项目(SDZX2022036); 广东省大学生创新创业训练计划项目(S202510566081)
第一作者: 汤舒婧(2004—), 女, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: tang.shujing@outlook.com
***通信作者:** 徐晓飞(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能食品。E-mail: xfxufe@gdou.edu.cn

additives for each ingredient in a one-way experiment, and then the formulation was optimized by Box-Behnken response surface methodology. Subsequently, an *in vitro* digestion model was applied to evaluate the starch hydrolysis rate of optimized formulated biscuits. **Results** The ranges of addition for each ingredient were defined using the single-factor method. Subsequently, a quadratic multiple regression equation was obtained using sensory scores as response values, exhibiting that the addition of quantities of fresh homogenate of *Dioscorea opposite* Thunb., *Avena sativa* L., coconut oil and sugar had highly significant effects on sensory scores (P<0.001). As a result, the optimal formula was obtained to be a wheat flour-to-*Avena sativa* L. flour mass ratio of 73:27, with 14.9% fresh homogenate of *Dioscorea opposite* Thunb., 37.5% coconut oil and 40.9% sugar in quantity, yielding a corresponding sensory score of 86.79. The *in vitro* simulated digestion results showed that the starch hydrolysis rate of the optimized formulation was significantly lower compared to the control biscuits, with a hydrolysis rate of 80% at 180 min, which was considerably lower than those of the control ones (85% and 87%). **Conclusion** Biscuits formulated with *Avena sativa* L. powder, fresh *Dioscorea opposita* Thunb. homogenate and coconut oil exhibit favorable taste and texture, while exhibiting reduced *in vitro* starch hydrolysis rates. This study provides a reference for the application of fresh *Dioscorea opposita* Thunb. in foods and the development of innovative anti-digestive biscuits.

KEY WORDS: *Dioscorea opposita* Thunb.; *Avena sativa* L.; coconut oil; shortening biscuits; Box-Behnken response surface methodology; digestive properties

0 引　言

饼干是一种代表性的烘焙产品, 通常含有 3 种主要成分(面粉、糖和油脂)以及低含水量[1], 因其具有较长的保质期、便捷性、多种口味和质地等吸引消费者的特点而在食品市场占据重要的地位[2]。目前, 饼干可作为主食、奢侈礼品、休闲零食、婴儿食品、功能食品、宠物食品以及添加巧克力、奶油、坚果和其他口味的装饰品[2], 因而具有广泛的消费市场。从全球范围看, 所有年龄段的超重/肥胖人数都在增加[3], 但营养不良现象依然存在, 与肥胖和饮食相关疾病的负担共存[4]。健康饮食对于疾病的预防有重要的意义[5]。因此, 许多卫生组织都鼓励开发和消费配方改进食品, 如富含功能成分的食品[6–8]。饼干因其消费友好特性和市场领先地位, 成为应对营养缺乏、糖尿病、肥胖症、心血管疾病和癌症等多种慢性病和营养相关疾病不可忽视的角色[9]。因而, 不断改进饼干的营养质量以满足消费者对含有更健康成分的饼干的巨大需求, 并使其更营养和美味, 成为食品研发人员的重要目标。

配料对饼干的营养、质地和物理特性有很大的影响。近年来, 选用富含营养素和具有健康益处的配料替代部分传统的面粉、油脂成为配方创新研究的热点。比如用蘑菇粉取代部分面粉提高了饼干的营养、质地、风味和接受度[10]; 用特级初榨橄榄油替代起酥油改善了意大利 Cantuccini 饼干的水活性、相对湿度、硬度、清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基活性和酸度; 感官分析表明, 使用 70%的特级初榨橄榄油制作的 Cantuccini 饼干质量虽有所下降但可接受性良好, 表明特级初榨橄榄油可用于制作功能性 Cantuccini 饼干[11]; 用发芽苍白藜(*Chenopodium pallidicaule* Aellen)和藜麦(*Chenopodi quinoa* Willd.)代替面粉提高了饼干中 γ-氨基丁酸、总可溶性酚类化合物含量和抗氧化活性, 并且与面粉对照组相比, 改良饼干的淀粉消化率和血糖指数降低, 这些结果表明, 在饼干生产中加入发芽的谷物使得营养和健康益处显著提升[12]。此外, 研究发现添加低升糖玉米淀粉可以提高胃肠道消化中饼干食糜的表观黏度, 减少酶和淀粉的接触机会, 从而降低饼干的消化释糖量[13]。薯蓣科植物山药(*Dioscorea opposita* Thunb.), 又称怀山药、淮山药等, 具有悠久的药食两用历史, 山药富含淀粉和蛋白质[14], 此外还发现皂苷、多糖、多酚、甾醇等多种化学成分, 动物试验表明具有抗氧化、降血糖、降血脂、抗肿瘤以及调节肠胃功能等多种生理药理活性[15]。山药产量稳定、生态适应性广, 具有良好的加工特性, 在功能食品中应用广泛[16]。燕麦(*Avena sativa* L.)含有丰富的 β-葡聚糖、酚酸类、脂质、蛋白质和多肽等营养成分, 具有调控血糖、降压、降脂、降低肠癌患病率和增强免疫功能等作用[17]。椰子油富含中链饱和脂肪和多酚类成分[18], 具有抗氧化、抗炎、抗菌和抗病毒等生物功能, 对许多慢性退行性疾病也有潜在的治疗作用[19], 应用在食品中口感好、稳定性高且不易发生氧化变质等优点[20]。目前已有报道将山药、燕麦加入饼干中, 赋予产品特殊风味、质地和良好的外观颜色[21–22], 并且使得产品具有一定的保健功能[23]。

为丰富饼干品类并提高饼干的健康特性, 本研究以新鲜山药、燕麦和椰子油替代部分饼干传统配料, 开发具有健康营养特性的特色饼干。首先通过单因素试验以感官评价和质构硬度确定关键原料用量的范围, 包括面粉与燕

麦粉比例、新鲜山药匀浆、糖和椰子油的添加量; 随后采用响应面法(Box-Behnken)优化各原料配方比例; 最后, 采用体外模拟肠道消化模型, 分析优化后饼干的淀粉水解率(hydrolysis rate, HR), 旨在开发一款采用新鲜山药、燕麦和椰子油为原料的健康特色饼干, 为抗消化饼干创新配方开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜山药, 采收于广东阳江阜面镇; 燕麦粉(80目)(东莞市日隆食品有限公司); 低筋小麦粉(上海枫未实业有限公司); 冷榨椰子油(海南恒诚旭光食品有限公司); 白砂糖粉(成都太古糖业有限公司); 饼干专用复配膨松剂(河南奥尼斯特食品有限公司); 全脂奶粉(新西兰恒天然集团)。

无水葡萄糖(广东光华科技股份有限公司); 胃蛋白酶(酶活力 30000 U/g)(上海源叶生物科技有限公司); 胰酶(酶活力≥4000 U/g)(山东科源生化有限公司); α-淀粉酶(酶活力 3000~5000 U/g)(天津市华盛化学试剂有限公司); 无水乙醇、氢氧化钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 3,5-二硝基水杨酸(分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司); 总淀粉检测试剂盒 K-TSTA(爱尔兰 Megazyme 公司)。

1.2 仪器与设备

WBL2501B 榨汁机(广东美的生活电器制造有限公司); LA204E 分析天平(精度 0.0001 g)、FE28 pH 计[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; X100-FTA 质构仪(潍坊德兆机械科技有限公司); THZ-103B 恒温培养摇床(上海一恒科学仪器有限公司); TU-1901 双光束紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); MA600R 离心机(上海丰博生物科技有限公司)。

1.3 饼干制作工艺

1.3.1 基本配方

以酥性饼干为基础配方[19]结合预试验情况, 拟定基本配方如下: 以混合粉(低筋面粉 60%和燕麦粉 40%)为基准, 山药匀浆 15%、糖粉 30%、椰子油 40%、奶粉 5%、鸡蛋液 10%、复配膨松剂 3%。

1.3.2 工艺流程

山药燕麦饼干工艺流程图如图 1 所示。

1.4 试验方法

1.4.1 单因素试验

根据山药燕麦饼干的基础配方和关键原料用量范围的预试验结果, 进行单因素试验, 如表 1 所示, 每组中混合粉(低筋粉和燕麦粉)总质量固定为 200 g, 各因素的添加量以混合粉为基准, 固定因素的添加量按照 1.3.1 拟定的基本配方用量, 探究考察因素对饼干感官评分及质构的影响。

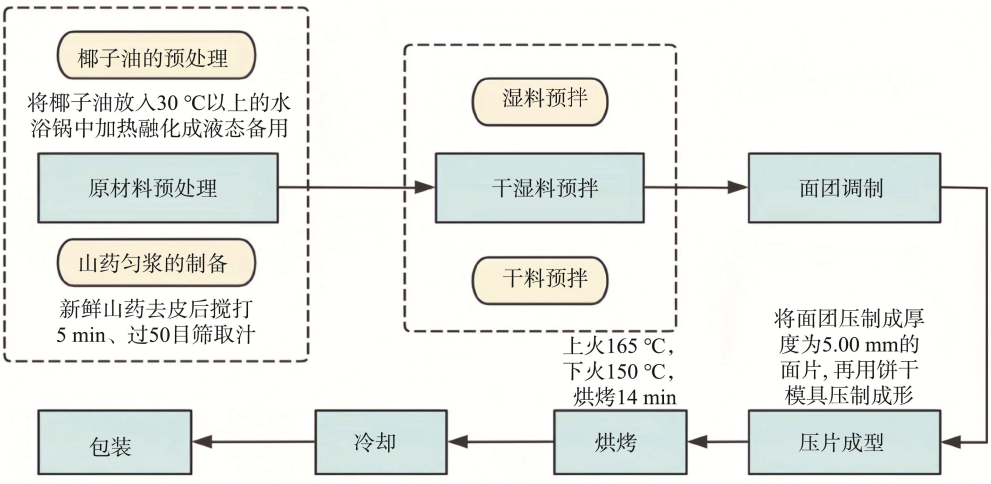


图 1 山药燕麦饼干工艺流程图

Fig.1 Process flow chart of *Dioscorea opposita* Thunb. and *Avena sativa* L. biscuits

表 1 单因素设置(%)

Table 1 Single-factor settings (%)

单因素	水平
山药匀浆添加量	10、15、20、25、30
燕麦粉添加量	10、20、30、40、50
椰子油添加量	30、35、40、45、50
糖粉添加量	30、35、40、45、50

1.4.2 响应面试验优化试验

以单因素试验为基础, 拟定山药匀浆、燕麦粉、椰子油、糖粉添加量为自变量, 感官综合评分作为响应值, 根据 Box-Benhnken 中心组合原理设计 4 因素 3 水平的试验, 筛选山药燕麦饼干的最佳工艺配方, 具体如表 2 所示。

1.4.3 感官评定标准

测评小组由 12 位食品专业学生组成, 在山药燕麦饼

干烤制完成冷却后, 从形态、色泽、滋味与口感、组织结构 4 个方面对品质进行评价, 总分为 100 分。通过每个人对各项的评分来进行统计, 取其平均值。参考 GB/T 20980—2021《饼干质量通则》, 制定的感官评分标准见表 3。

表 2　考察因素与水平设计
Table 2　Design of examination factor and level

水平	*A*(山药匀浆添加量)/%	*B*(椰子油添加量)/%	*C*(糖粉添加量)/%	*D*(燕麦粉添加量)/%
–1	10	35	35	20
0	15	40	40	30
1	20	45	45	40

表 3　山药燕麦饼干感官评价标准
Table 3　Sensory evaluation criteria for *Dioscorea opposita* Thunb. and *Avena sativa* L. biscuits

指标	评价标准	评分
形态	外形完整, 花纹清晰, 厚薄基本均匀, 无起泡, 没有较大或较多的凹底	16~20
	大小基本均匀, 外形较完整, 厚薄基本均匀, 起泡少	12~15
	大小不一, 外形不完整, 厚薄不均匀, 起泡多	8~11
色泽	表面金黄色, 底部棕黄色, 无焦边, 有油润感	16~20
	色泽较太均匀, 光泽感较差, 表面有焦糊	12~15
	色泽不均匀, 光泽感差, 表面过焦	8~11
滋味与口感	具有浓郁椰子香味, 无异味, 口感酥松或松脆	25~30
	香味过轻或过重, 油腻感较为明显	19~24
	油味过重, 香味不明显	12~18
组织结构	断面结构呈多孔状, 细密, 无大孔洞	25~30
	断面结构呈多孔状, 组织较细腻	19~24
	断面结构无多孔状	12~18

1.4.4　饼干质构的测定

将冷却 30 min 的饼干用 X100-FTA 质构仪, 在质构分析(texture profile analysis, TPA)模式下 P/2 探头对饼干的硬度进行测定。测试参数为: 测前速度 2.0 mm/s, 测中速度 1.0 mm/s, 测后速度 2.0 mm/s, 测试位移为 2 mm, 触发力 5.0 *g*[24]。

1.4.5　体外模拟消化的测定

参照按《中华人民共和国药典》[25]和文献[26]配制人工唾液(650 U/mL)、人工胃液和人工小肠液, 冷藏备用。优化配方饼干: 按照响应面最优配方制作。对照组 1(饼干): 不添加燕麦粉但添加山药匀浆; 对照组 2(饼干): 燕麦粉和山药匀浆均不添加。

体外模拟消化参考相关文献并稍作修改[26−27], 取 3 块饼干用研钵研磨至粒径到 0.5~2.0 mm 左右, 过 20 目筛网, 称取样品 5 g 与 5 mL 人工唾液(37 ℃预热)混合 2 min, 取上述混合液 4 g, 加入 40 mL 模拟胃液于 37 ℃恒温振荡摇床中以 120 r/min 转速振荡 2 h, 模拟胃消化后立即使用 1 moL/L 的氢氧化钠调至 pH 6.9, 然后加入 40 mL 肠液, 混匀后放入 37 ℃、120 r/min 的恒温摇床中进行酶解, 分别于 0、15、30、60、90、120、150、180 min, 取上清液 2 mL 于离心管中, 加入 2 mL 无水乙醇灭酶。8000 r/min 离心 5 min, 用 3,5-二硝基水杨酸法测定产生的还原糖量[28]。饼干中总淀粉含量按照试剂盒说明书步骤测定。饼干中淀粉 HR 计算如公式(1)所示:

$$\mathrm{HR}/\% = \frac{G}{W} \times 100\% \tag{1}$$

式中: G 为不同时间水解后的还原糖含量, mg; W 为样品中的淀粉质量, mg;

1.5　数据处理

数值以平均值±标准偏差表示, 每组样品平行测定至少 3 次, 采用 OriginPro 2024 进行数据处理和作图。

2　结果与分析

2.1　单因素试验结果

2.1.1　燕麦粉添加量对品质的影响

适量添加燕麦粉能够显著提升饼干的酥脆度与风味。由图 2(a)可见, 从 10%开始, 随着添加量增加, 燕麦香气愈发浓郁, 饼干结构变得酥松多孔, 使得感官评分逐步升高; 当添加量超过 40%后, 面团的面筋网络形成将受到抑制, 饼干成型困难, 同时烘焙后口感变差, 其硬度值和感官评分均下降, 因此当燕麦粉添加量为 30%时, 饼干的感官评分达到最高值且硬度适中。

2.1.2　山药匀浆添加量对品质的影响

新鲜山药水分高(约 75%~80%水分含量), 在配方中添加山药匀浆, 可为面团体系提供适度水分, 有利于烘烤时淀粉糊化和大分子间交联, 从而改善产品硬度和咀嚼性。由图 2(b)可见, 当山药匀浆添加量为 15%时, 饼干的感官评分达到最高值, 继续增加山药匀浆添加量会导致面团过湿、成型困难, 烤制出来的饼干内部塌陷、口感黏牙, 硬度和感官评分急剧降低。因此, 山药匀浆添加量为 15%时口感和硬度较合适。

2.1.3　椰子油添加量对品质的影响

酥性饼干是 W/O 型体系, 油脂在面团中伸展为薄膜状态覆盖于颗粒表面, 一方面可携带空气进入面团, 同时可阻断淀粉颗粒通过水分子氢键的链接, 使得在烘烤过程中因空气受热膨胀而饼干疏松。由图 2(c)可见, 当添加量为 40%时, 椰子油与混合粉可形成均匀的油脂包裹体系, 最终为饼干提供良好的酥脆感。而添加量超过 40%, 油脂过多导致面团的黏性降低、出油, 出现饼干松散、难以成型和抗裂能力差, 形态评分与其他组别的相差较大; 而低于 35%时, 产品干硬、酥脆降低, 感官评分下降。因此, 椰子油添加量为 40%时饼干口感较好。

2.1.4 糖粉添加量对品质的影响

糖粉除提供甜味外，在烘焙过程中，糖粉通过美拉德反应和焦糖化反应赋予饼干金黄色泽和焦香风味[29]。在测试范围内，当糖粉添加量达 50%时，饼干的山药和椰子油的天然风味不明显，甚至因甜度过高引发腻感；添加量为30%时则导致甜味不足，感官评分下降；添加 40%的糖粉，能实现均匀、外观诱人的褐变反应，并产生良好的风味物质；随后添加量继续增加，口感甜腻且硬度增加，接受度下降[图 2(d)]。因此，糖粉添加量为 40%时饼干口感、风味和色泽最适宜。

2.2 各因素的响应面优化

在单因素试验结果的基础上，采用 4 因素为自变量，感官评价分(*Y*)为响应值，共进行 29 个试验点，响应面设计及评价结果见表 4。

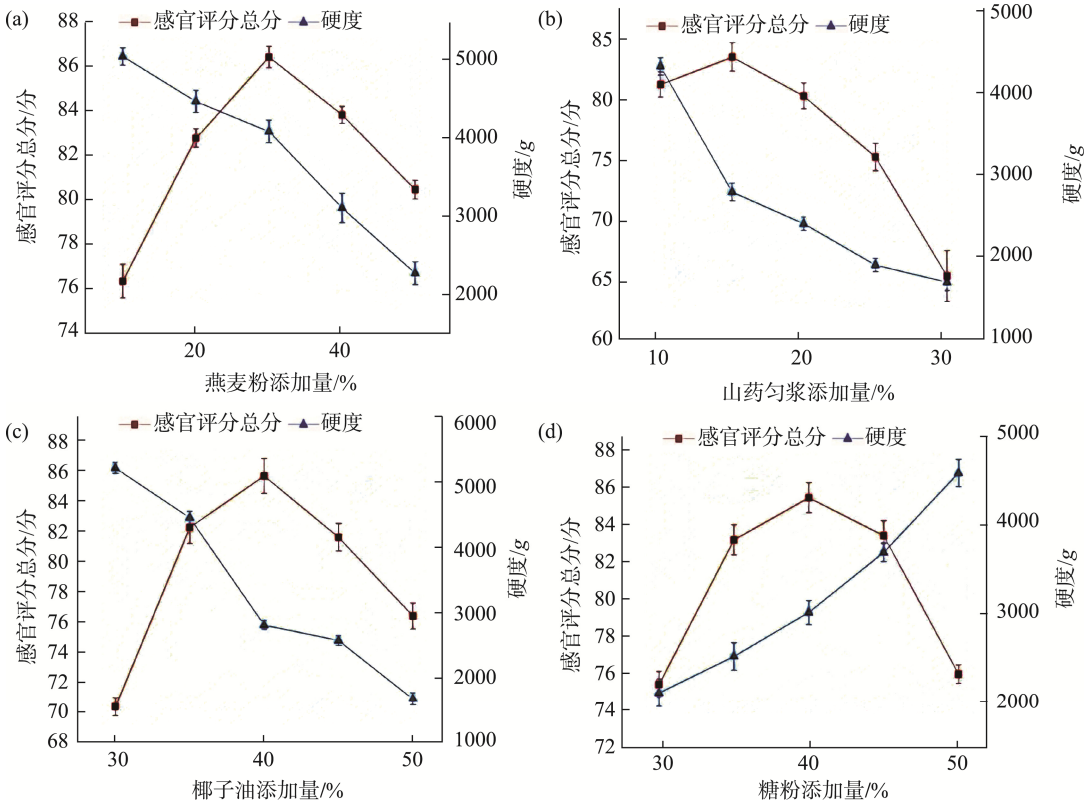


图 2 各考察因素对饼干品质的影响(*n*=3)

Fig.2 Effects of the factors examined on the quality of biscuits (*n*=3)

表 4 响应面设计及结果

Table 4 Design and results of response surface

试验号	*A*(山药匀浆添加量)/%	*B*(椰子油添加量)/%	*C*(糖粉添加量)/%	*D*(燕麦粉添加量)/%	*Y*(感官评价分数)/分	试验号	*A*(山药匀浆添加量)/%	*B*(椰子油添加量)/%	*C*(糖粉添加量)/%	*D*(燕麦粉添加量)/%	*Y*(感官评价分数)/分
1	10	35	40	30	79.985	16	15	45	45	30	76.375
2	20	35	40	30	74.327	17	10	40	35	30	79.125
3	10	45	40	30	80.600	18	20	40	35	30	57.255
4	20	45	40	30	66.600	19	10	40	45	30	70.673
5	15	40	35	20	74.375	20	20	40	45	30	73.000
6	15	40	45	20	76.500	21	15	35	40	20	82.309
7	15	40	35	40	69.000	22	15	45	40	20	77.500
8	15	40	45	40	74.750	23	15	35	40	40	77.625
9	10	40	40	20	79.976	24	15	45	40	40	76.575
10	20	40	40	20	68.000	25	15	40	40	30	85.600
11	10	40	40	40	75.250	26	15	40	40	30	86.300
12	20	40	40	40	65.579	27	15	40	40	30	85.900
13	15	35	35	30	74.955	28	15	40	40	30	86.500
14	15	45	35	30	74.000	29	15	40	40	30	86.655
15	15	35	45	30	81.053						

对表 4 试验数据进行二次多项式回归拟合, 得到二次多元回归方程: Y=86.19–5.07A–1.55B+1.97C–1.66D–2.09AB+6.05AC+0.5762AD–0.9307BC+0.9398BD+0.9062CD–8.69A^2–2.25B^2–7.35C^2–5.31D^2。对试验结果拟合的模型进行方差分析, 结果见表 5。

由表 5 可以看出, 山药燕麦饼干的感官评价回归模型 P<0.01, 失拟项 P=0.5587>0.05, 表明二次回归方程可用。由于模型达到极显著水平, 拟合度为 0.9981, 校正拟合度为 0.9913, 说明该模型对饼干感官优化试验的情况拟合较好, 自变量与响应值之间的线性关系显著, 可用于确定饼干的最佳配方。一次项 A、B、C、D 的 P<0.01, 说明山药匀浆、椰子油、糖粉和燕麦粉添加量对感官评分影响极显著; 交互项 AB、AC、BC、BD、CD 的 P<0.01, 说明各因素之间的相互作用影响极显著。由 F 可知, 各因素对饼干的感官评分影响顺序依次为: 山药匀浆添加量(A)>糖粉添加量(C)>燕麦粉添加量(D)>椰子油添加量(B)。

各因素交互影响的感官评分响应面图及等高线图见图 3。由图 3 所示, 各因素交互的响应曲面均呈现凸起的开口向下形态, 说明感官评分(Y)存在极大值, 最优工艺参数处于试验设计范围。其中, 山药匀浆与椰子油添加量(AB)[图 3(a)]、山药匀浆与糖粉添加量(AC)[图 3(b)]的交互作用最为显著, 表现为响应曲面坡度陡峭、等高线呈明显椭圆形。

2.3　配方优化验证

根据响应面模型得到饼干的最佳配方参数: 低筋面粉与燕麦粉质量比为 73:27 为基数, 山药匀浆为 14.94%、椰子油为 37.52%, 糖粉为 40.89%, 最终感官评分为 86.75。基于实际操作可行性, 将最佳条件修正为面粉与燕麦粉质量比 73:27, 山药匀浆添加量 14.9%、椰子油添加量 37.5%、糖粉添加量 40.9%。进行 3 次验证试验, 所得到山药饼干的感官评分均值为 86.79 分, 实际值与理论值相吻合, 表明响应面试验得到的数学模型可靠, 具有实用价值。

2.4　优化配方饼干的消化特性

由图 4 可见, 在模拟消化的前 20 min, 饼干中淀粉 HR 迅速攀升, 随后增加程度下降, 到 60 min 后, 淀粉 HR 明显放缓; 在整个模拟肠道消化阶段, 优化配方饼干的 HR 均低于 2 个对照饼干, 并且对照组 1(仅加山药匀浆)低于对照组 2(无燕麦和山药匀浆), 到 180 min 时, 优化

表 5　二次多元回归方程方差分析

Table 5　Analysis of variance for bivariate multiple regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	1357.11	14	96.94	520.73	<0.0001	**
A	308.54	1	308.54	1657.43	<0.0001	**
B	28.84	1	28.84	154.94	<0.0001	**
C	46.57	1	46.57	250.19	<0.0001	**
D	36.94	1	36.94	176.94	<0.0001	**
AB	17.40	1	17.40	93.46	<0.0001	**
AC	146.37	1	146.37	786.30	<0.0001	**
AD	1.33	1	1.33	7.14	0.0183	**
BC	3.47	1	3.47	18.61	0.0007	**
BD	3.53	1	3.53	18.98	0.0007	**
CD	3.29	1	3.29	17.65	0.0009	**
A^2	489.88	1	489.88	2631.55	<0.0001	**
B^2	32.80	1	32.80	176.18	<0.0001	**
C^2	350.80	1	350.80	1884.44	<0.0001	**
D^2	182.67	1	182.67	981.28	<0.0001	**
残差	2.61	14	0.1862			
失拟项	1.85	10	0.1850	0.9778	0.5587	
纯误差	0.7566	4	0.1892			
总和	1359.71	28				
标准差	0.4315		拟合度	0.9981		
预测拟合度	0.9962		校正拟合度	0.9913		
变异系数/%	0.5645					

注: **表示差异极显著(P<0.01)。

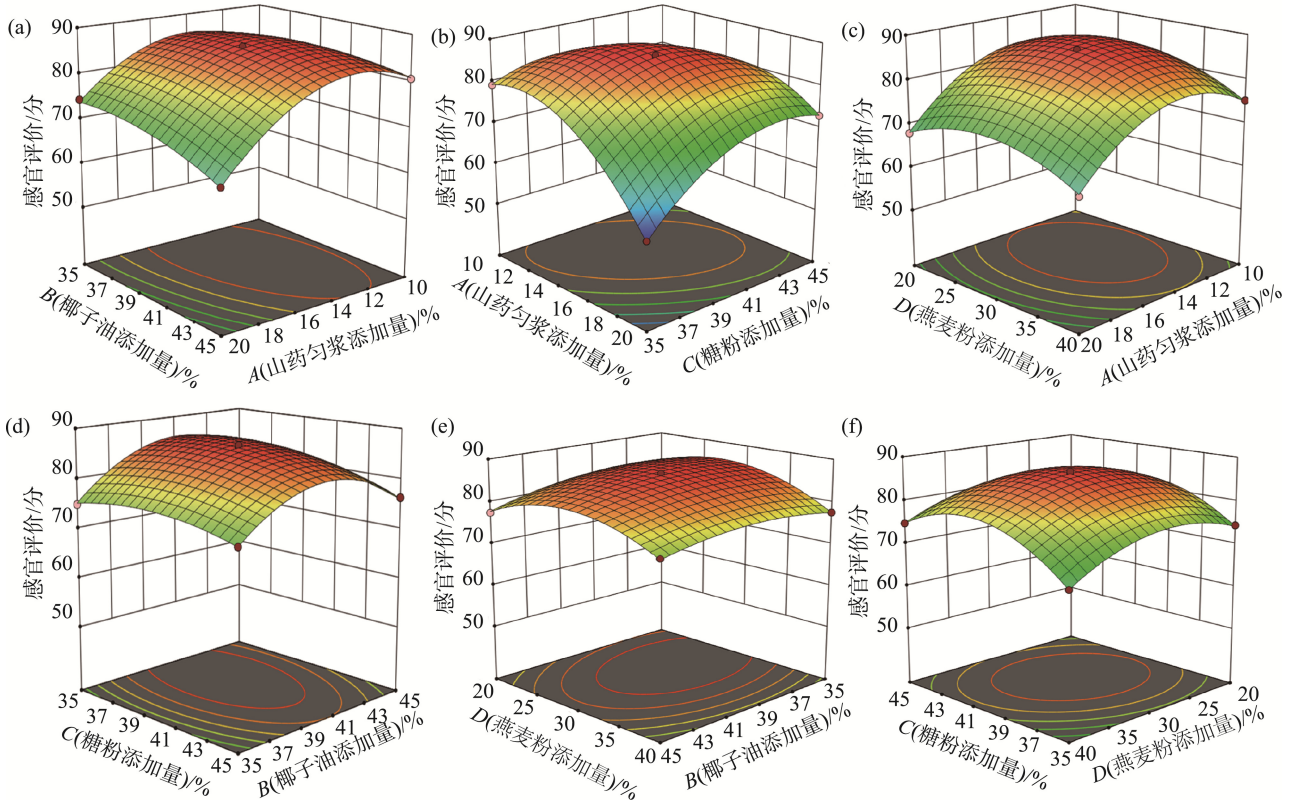


图 3 各因素交互影响对感官评分的响应面分析图

Fig.3 Response surface analysis chart of the interaction of factors on sensory scores

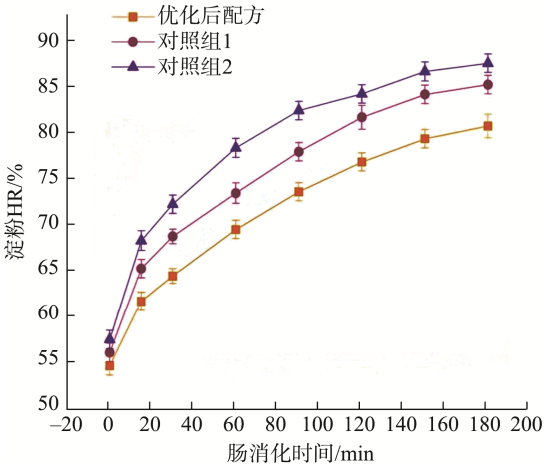


图 4 不同配方饼干的淀粉 HR 比较

Fig.4 Comparison of starch HR of biscuits with different formulations

配方饼干淀粉 HR 为 80%，而两组对照饼干淀粉 HR 分别达到 85%和 87%。显然，在整个消化过程中，优化配方的 HR 低于对照配方，说明添加了山药匀浆和燕麦后能部分抑制消化酶对淀粉的水解作用，其原因可能是燕麦粉和山药中大分子多糖如 *β*-葡聚糖、山药多糖，通过下述机制影响淀粉的水解：减少扩散和传质、阻碍消化后成分的混合、阻塞酶的活性位点、引起大分子构象变化并形成聚集体和形成分子间作用来固定淀粉底物[30]。此外，周婧琦等[31]的研究也发现，燕麦 *β*-葡聚糖与山药淀粉共混后，由于燕麦 *β*-葡聚糖的加入，降低了共混体系的消化性，提高了抗性淀粉含量。

3 结 论

本研究考察了燕麦粉、新鲜山药匀浆、椰子油和糖的添加量对酥性饼干品质的影响，并通过单因素试验和响应面法优化了饼干配方。响应面分析显示，山药匀浆添加量对感官评分影响最大，且与椰子油、糖粉添加量的交互作用极为显著($P<0.01$)，得到优化配方为面粉与燕麦粉质量比 73:27，山药匀浆添加量 14.9%、椰子油添加量 37.5%、糖粉添加量 40.9%。体外消化试验表明，相对对照配方，优化配方饼干的淀粉 HR 明显降低，表现出一定的抗消化特性。本研究为新鲜山药的加工应用和创新抗消化饼干的配方开发提供了参考依据。

参考文献

[1] DI-CAIRANO M, GALGANO F, TOLVE R, *et al*. Focus on gluten free biscuits: Ingredients and issues [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 81: 203–212.

[2] AREPALLY D, REDDY RS, GOSWAMI TK, *et al*. Biscuit baking: A review [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109726.

[3] ZHANG X, LIU J, NI Y, *et al*. Global prevalence of overweight and obesity in children and adolescents: A systematic review and meta-analysis [J]. JAMA Pediatrics, 2024, 178(8): 800–813.

[4] AZOMAHOU TT, DIEBE B, GOSSELIN-PALI A. Transition and persistence in the double burden of malnutrition and overweight or obesity: Evidence from South Africa [J]. Food Policy, 2022, 113: 102303.
[5] GRANG WB. Diet, inflammation, and infectious diseases [J]. Nutrients, 2023, 15: 2891.
[6] 崔竞雯, 王丹阳, 范蓓, 等. 日本保健功能食品健康声称监管体系研究及启示[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 116–125.
CUI JW, WANG DY, FAN B, *et al.* Research on the regulatory system of health claims for functional foods in Japan and its implications [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 116–125.
[7] 李京虎, 张逸璇, 高飞, 等. 功能性食品在我国食品分类中的定位及思考[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(12): 7–17.
LI JH, ZHANG YX, GAO F, *et al.* The positioning and reflections of functional foods in China's food classification system [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(12): 7–17.
[8] 司原琦, 戎卫华, 林子君, 等. 国内外食品及保健食品类似产品功能声称管理制度比较研究[J]. 中国食物与营养, 2025, 31(3): 40–49.
SI YQ, RONG WH, LIN ZJ, *et al*. Comparative study on the management system of functional claims for similar food and health food products at home and abroad [J]. Food and Nutrition in China, 2025, 31(3): 40–49.
[9] GOUBGOU M, SONGRE-OUATTARA LT, BATIONO F, *et al.* Biscuits: A systematic review and meta-analysis of improving the nutritional quality and health benefits [J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2021, 3: 26.
[10] BIAO Y, CHEN X, WANG S, *et al*. Impact of mushroom (*Pleurotus eryngii*) flour upon quality attributes of wheat dough and functional cookies-baked products [J]. Food Science and Nutrition, 2020, 8(1): 361–370.
[11] GIUFFRE AM, CARACCIOLO M, CAPOCASALE M, *et al*. Effects of shortening replacement with extra virgin olive oil on the physical-chemical-sensory properties of *Italian Cantuccini* biscuits [J]. Foods, 2022, 11(3): 299.
[12] PAUCAR-MENACHO LM, SIMPALO-LOPEZ WD, CASTILLO-MARTINEZ WE, *et al.* Improving nutritional and health benefits of biscuits by optimizing formulations based on sprouted pseudocereal grains [J]. Foods, 2022, 11(11): 1533.
[13] 黄延莉, 张焕新, 吕民琪, 等. 低血糖生成指数玉米淀粉添加量对饼干品质及其体外淀粉消化率的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(3): 249–257.
HUANG YL, ZHANG HX, LV MQ, *et al*. Effects of low glycemic index corn starch addition levels on biscuit quality and *in vitro* starch digestibility [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(3): 249–257.
[14] 钟嘉豪, 曾介玉, 陈家欢, 等. 不同产地山药的营养成分、质构特性及挥发性风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 242–251.
ZHONG JH, ZENG JY, CHEN JH, *et al*. Analysis of nutritional components, texture characteristics, and volatile flavor compounds of yam from different regions [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 242–251.
[15] 黄新雨, 苗明三, 王灿. 山药的现代研究及其质量标志物预测分析[J/OL]. 中华中医药学刊, 1–21. [2025-07-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.R.20250704.1603.022.html
HUANG XY, MIAO MS, WANG C. Modern research on yam and prediction analysis of its quality markers [J/OL]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 1–21. [2025-07-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.R.20250704.1603.022.html
[16] 林晓丽, 郎凯曈, 郑宝东, 等. 山药营养功能特性及其产品开发现状[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(6): 339–346.
LIN XL, LANG KT, ZHENG BD, *et al.* Nutritional functional characteristics and product development status of yam [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(6): 339–346.
[17] 金梦圆, 李想, 王铭翠, 等. 燕麦的活性成分与功能研究进展[J]. 植物学研究, 2020, 9(5): 461–470.
JIN MY, LI X, WANG MC, *et al*. Research progress on active ingredients and functions of oats [J]. Plant Science Journal, 2020, 9(5): 461–470.
[18] NARAYANANKUTTY A, ILLAM SP, RAGHAVAMENON AC. Health impacts of different edible oils prepared from coconut (*Cocos nucifera*): A comprehensive review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 80: 1–7.
[19] ZENG YQ, HE JT, HU BY, *et al*. Virgin coconut oil: A comprehensive review of antioxidant activity and mechanisms contributed by phenolic compounds [J]. Critical Review in Food Science and Nutrition, 2024, 64(4): 1052–1075.
[20] 韩冰, 张天琪, 郑野, 等. 椰子油的功能应用及掺假检测研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(9): 1–3.
HAN B, ZHANG TQ, ZHENG Y, *et al*. Research progress on functional applications and adulteration detection of coconut oil [J]. Cereals & Oils, 2022, 35(9): 1–3.
[21] 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.
WU YL, SHANGGUAN LL, WANG HM, *et al.* Research on processing technology of red tea oat cookies [J]. Agricultural Products Processing, 2025, 5: 56–62.
[22] 靳羽慧, 胡文静. 花菇燕麦饼干配方优化及品质分析[J]. 食品安全导刊, 2025, 17: 116–119.
JIN YH, HU WJ. Optimization of formula and quality analysis of shiitake mushroom oats biscuits [J]. China Food Safety Magazine, 2025, 17: 116–119.
[23] 闫文慧, 李欣, 宋意亭, 等. 基于模糊数学感官评价对中药饼干的配方优化及减肥作用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(22): 264–273.
YAN WH, LI X, SONG YT, *et al.* Study on formula optimization and weight loss effect of traditional Chinese medicine slimming biscuits based on fuzzy mathematical sensory evaluation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(22): 264–273.
[24] 何泽东, 冯慧, 王灵艳, 等. 白参菌粉添加量对饼干品质及其淀粉消化性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 85–92.
HE ZD, FENG H, WANG LY, *et al*. The effect of white ginseng mushroom powder addition on biscuit quality and starch digestibility [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 85–92.
[25] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典. 三部: 0921 崩解时限检查法[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
National Pharmacopoeia Committee. Committee pharmacopoeia of the People's Republic of China. Part three: 0921 disintegration time limit inspection method [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020.
[26] 何瑞琪, 徐晓飞. 一种低 GI 杂粮面条研制[J]. 农产品加工, 2023(11): 1–4, 8.
HE RQ, XU XF. Development of a low GI miscellaneous grain noodle [J]. Agricultural Products Processing, 2023(11): 1–4, 8
[27] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, *et al*. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus [J]. Food & Function, 2014, 5(6): 1113–1124.
[28] 邓凯波, 黄雅萍, 屠颖晶, 等. 银耳酥性饼干的工艺优化及消化特性评价[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(19): 79–85.
DENG KB, HUANG YP, TU YJ, *et al*. Process optimization and digestive characteristics evaluation of *Tremella* crispy biscuits [J]. Food Research and Development, 2018, 39(19): 79–85.
[29] SVENJA K, SÉVERINE K, ANAHITA H, *et al*. From flours to cakes: Reactivity potential of pulse ingredients to generate volatile compounds impacting the quality of processed foods [J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131379.
[30] KARIM A, MOHAMMADI L, OSSE EF, *et al*. Effect of polysaccharide-induced viscosity on the digestion of proteins, fats, and carbohydrates in food: A comprehensive review and future perspectives [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 153: 104757.
[31] 周婧琦, 黄琴, 秦令祥, 等. 山药淀粉与燕麦 β-葡聚糖共混体系理化及消化性能研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 114–121.
ZHOU JQ, HUANG Q, QIN LX, *et al*. Study on the physicochemical and digestive properties of yam starch and oat β-glucan blend system [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 114–121.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)