

黎翎晴,曾齐,张盼盼,等.全蛋蛋糕预拌粉制备工艺优化及其制成蛋糕风味分析[J].食品工业科技,2023,44(21):180-189. doi:10.13386/j.issn1002-0306.2022110278

LI Lingqing, ZENG Qi, ZHANG Panpan, et al. Optimization on the Preparation Process of Whole Egg Cake Premixed Powder and Its Flavor Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 180-189. (in Chinese with English abstract). doi:10.13386/j.issn1002-0306.2022110278

· 工艺技术 ·

全蛋蛋糕预拌粉制备工艺优化及其制成蛋糕 风味分析

黎翎晴,曾齐,张盼盼,许格格,金永国*

(华中农业大学食品科技学院,湖北武汉 430070)

摘要:利用单因素实验评估了全蛋粉添加量、蛋糕油添加量和白砂糖添加量对蛋糕比容、质构特性、感官评分的影响。在单因素实验的基础上,采用响应面优化法以感官评分为响应值对全蛋蛋糕预拌粉的配方进行优化。结果表明,当蛋糕预拌粉配方为:全蛋粉添加量 65%,蛋糕油添加量 20%,白砂糖添加量 57.5% 时,蛋糕感官评分为 87.12 分。测定最优配方条件下蛋糕的比容和质构特性可得:比容为 3.69 mL/g、硬度为 438.54 ± 19.31 g、弹性为 0.91 ± 0.02 、黏聚性为 0.69 ± 0.01 , 均优于响应面优化前。烤制所得蛋糕色泽鲜黄,内部孔隙较小,口感柔软且富有弹性,具有蛋糕特有的香气,甜而不腻。利用电子鼻对最优配方制成的蛋糕进行风味分析,得到最优配方蛋糕中乙醇、胺类化合物、氟、碳氢化合物是较为主要的风味物质。进一步风味分析可得最优配方蛋糕中含有 9 种气味愉悦的风味物质,其中壬醛和反,反-2,4-癸二烯醛在最优配方蛋糕中的相对含量较高,蛋糕整体呈现愉悦的香气。

关键词:蛋糕预拌粉,全蛋粉,响应面法,质构特性,风味分析

中图分类号:TS213.2

文献标识码:B

文章编号:1002-0306(2023)21-0180-10

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2022110278](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110278)

本文网刊:



Optimization on the Preparation Process of Whole Egg Cake Premixed Powder and Its Flavor Analysis

LI Lingqing, ZENG Qi, ZHANG Panpan, XU Gege, JIN Yongguo*

(College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The effects of whole egg powder, cake oil and sugar additive amount on the specific volume, texture characteristics and sensory scores of the cake were evaluated using single factor experiment. Based on the single factor experiment, response surface methodology was used to optimize the formula of the cake premixed powder with the sensory score as the response value. The results showed that the cake had the highest sensory score of 87.12 when the formula of the premixed powder was 65% whole egg powder, 20% cake oil and 57.5% of white granulated sugar. The specific volume and texture characteristics of the cake under the optimal formula were determined as follows: Specific volume was 3.69 mL/g, hardness was 438.54 ± 19.31 g, elasticity was 0.91 ± 0.02 , and cohesiveness was 0.69 ± 0.01 , which were all better than those before response surface optimization. The cakes prepared with the optimal formula were bright yellow and had small internal pores, soft and elastic taste, and a unique cake aroma, sweet but not greasy. The electronic nose was used to analyze the flavor of the optimal cake, and the results found that ethanol, amine, fluorine and hydrocarbon were the main flavor substances in the cake. Further flavor analysis indicated that the optimal cake contained nine pleasant flavor substances, among which 1-nonanal and (E,E)-2,4-decadien-1-al were at relatively high levels in the optimal cake, thus presenting a pleasant aroma as a whole.

Key words: cake premixed powder; whole egg powder; response surface method; texture characteristics; flavor analysis

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-40-K24)。

作者简介: 黎翎晴 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 蛋制品加工, E-mail: 1499522854@qq.com。

* 通信作者: 金永国 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 蛋品科学与技术, E-mail: jinyongguo@mail.hzau.edu.cn。

全蛋粉是以全蛋液为原料, 经过干燥加工后制得的粉末状可食用蛋制品^[1]。全蛋粉有很高的营养价值, 含有蛋白质、脂肪、磷脂酸及多种维生素, 特别是其中还含有较多(高达 20%)的人脑和神经系统不可缺少的物质—磷脂^[2]。在食品中添加全蛋粉可以丰富食品的营养和味道, 这也使得全蛋粉成为食品加工工业中的一种重要原料^[3]。

烘焙预拌粉也称之为预混合粉, 通常是指将一定比例的原辅料(如白砂糖、小麦粉、淀粉、植脂末等)预先混合好, 再销售给商家或个人的一种方便烘焙原料^[4]。美国 AACC 将预拌粉定义为一种预先混合均匀的专用粉^[5]。预拌粉最大的特点和优势是简便, 非常适合连续式的工业生产, 既能提高企业的生产效率, 又能保证产品质量稳定在较高水准。预拌粉也同样降低了家庭烘焙的难度。预拌粉经过科学实验计算得出, 免除了配方参考与称量等步骤, 将制作蛋糕的流程变得更加方便简单, 使人们可以在家吃到现烤的烘焙产品。因此家庭预拌粉具有良好的市场前景^[6]。

近几年来, 蛋糕预拌粉的研究主要围绕着提高其营养价值、简化其加工工艺和丰富其口味的方向展开。Mokhtar^[7] 利用不同的添加剂(即羧甲基纤维素 CMC、麦芽糊精和乳化剂)研制成即食全麦蛋糕预拌粉, 生产出了脂肪含量和热值较低的蛋糕, 有效改善了蛋糕的体积和比容等特性; Bassinello 等^[8] 用米粉、玉米淀粉和四季豆粉代替小麦粉, 发明了无麸质的蛋糕预拌粉, 该蛋糕更为健康且过敏人群也可食用; Fernandes 等^[9] 则通过添加木犀胶浆研制出了一种脂肪含量更低, 适用于减肥的蛋糕预拌粉。国内学者同样围绕蛋糕预拌粉开展了多样的研究。宋玉等^[10] 通过向蛋糕预拌粉中添加维生素、乳酸锌等, 发明了一种具有钙锌强化功能的蛋糕预拌粉; 郭保平等^[11] 以海藻糖代替蔗糖, 以冻干橙子粉代替酸度调节剂, 以蛋黄粉、奶油粉和全脂乳粉代替植物油和粉末油脂, 发明了一款能够满足婴幼儿健康需求的微波蛋糕预拌粉; 朱莹莹等^[12] 发明了一款在体内消化慢且消化速率平稳, 适合糖尿病人和需要维持血糖水平稳定者食用的慢消化青稞蛋糕预拌粉; 李璇等^[13] 发明了藜麦蜂蜜口味的蛋糕预拌粉; 徐媛^[14] 发明了一种芸豆风味的蛋糕预拌粉; 吴顺均等^[15] 则发明了一种绿茶风味的蛋糕预拌粉。

现市售蛋糕预拌粉通常需要加入鲜蛋、水和油打发后才能烤制成蛋糕。目前有研究者提出可以利用全蛋粉代替鲜蛋制作海绵蛋糕^[16], 但对于全蛋粉的添加范围以及其在蛋糕预拌粉中的替代效果还没有明确的研究。本研究在蛋糕预拌粉中添加全蛋粉, 在单因素实验的基础上对蛋糕预拌粉配方进行优化, 利用电子鼻对最优配方制作的蛋糕进行气味分析, 并且利用气相色谱-质谱联用仪(Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS)分析最优配方制作的蛋

糕中具体含有的风味物质, 旨在获得一款无需添加鲜蛋的蛋糕预拌粉, 简化蛋糕预拌粉制作蛋糕的流程, 方便家庭式蛋糕的制作。

1 材料与方法

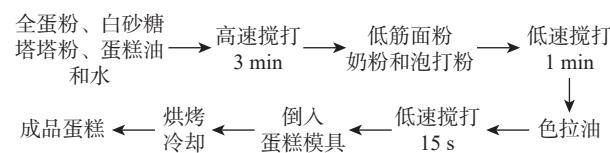
1.1 材料与仪器

低筋面粉(品牌: 展艺)、烘焙用调制奶粉(品牌: 展艺) 上海枫未实业有限公司; 全蛋粉 湖北神地农业科贸有限公司; 白砂糖(品牌: 大卫贝克) 佛山市层层高食品有限公司; 泡打粉(品牌: 新良)、塔塔粉(品牌: 新良) 良润全谷物食品有限公司; 色拉油(品牌: 芝培) 广州金益食品有限公司; Sp 蛋糕油(品牌: 食博士) 广州市宝桃食品有限公司。

BSA124S 分析天平 德国 sartorius 公司; JYL-F901 手持式搅拌机 九阳股份有限公司; T3-L326B 型烤箱 广东美的生活电器制造有限公司; 4 寸蛋糕模具 上海枫未实业有限公司; A.XT.PLUS 物性测定仪 英国 STABLE MICRO.SY 公司; FOX400z0 电子鼻 法国 Alpha M.O.S 公司; 7000D 气相色谱质谱联用仪 新加坡安捷伦仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蛋糕制作工艺流程 将全蛋粉、塔塔粉、白砂糖、蛋糕油、水放入搅拌机中高速搅打 3 min, 加入面粉、奶粉、泡打粉, 低速搅打 1 min, 加入色拉油后搅拌 15 s, 即可得到蛋糕糊。随后, 将蛋糕糊倒入蛋糕模具中轻轻震出气泡, 放入上火 110 °C、下火 150 °C 的烤箱中烘烤 60 min, 最后将烤好的蛋糕冷却、脱模即可得到成品蛋糕。加工工艺流程如下:



1.2.2 单因素实验 按照 1.2.1 蛋糕制作工艺流程烤制蛋糕, 以低筋面粉质量(100%)计, 采用单因素轮换法探完全蛋粉添加量、蛋糕油添加量和白砂糖添加量对蛋糕比容、质构特性以及感官评分的影响。固定面粉添加量为 40 g、塔塔粉添加量 2.5%、水添加量 225%、奶粉添加量 10%、泡打粉添加量 1%、色拉油添加量 5%。进行全蛋粉添加量(30%、45%、60%、75%、90%)优化时, 蛋糕油添加量和白砂糖添加量为 12.5% 和 50%; 进行蛋糕油添加量(5%、10%、15%、20%、25%)优化时, 全蛋粉添加量和白砂糖添加量为 60% 和 50%; 进行白砂糖添加量(40%、50%、60%、70%、80%)优化时, 全蛋粉添加量和蛋糕油添加量为 60% 和 20%。

1.2.3 配方优化响应面试验 根据单因素实验结果, 以感官评分(Y)为响应值, 对全蛋粉添加量(A)、蛋糕油添加量(B)和白砂糖添加量(C)三个因素进行三因素三水平中心组合试验, 试验因素及水平见表 1。

表 1 Box-Behnken 响应面试验设计因素和水平表

Table 1 Factors and levels table of Box-Behnken response surface test design

因素	水平		
	-1	0	1
A全蛋粉添加量(%)	45	60	75
B蛋糕油添加量(%)	15	20	25
C糖添加量(%)	50	60	70

使用 Design-Expert 13 软件进行响应面试验设计、构建模型及结果分析, 得到全蛋蛋糕预拌粉的最优配方, 并对最优配方进行验证实验。

1.2.4 蛋糕品质特性测定

1.2.4.1 比容测定 将烤制好的蛋糕在室温下冷却 1 h, 用电子天平称量蛋糕的重量并记为 $M(g)$, 采用油菜籽替代法^[17] 测量蛋糕的体积记为 $V(mL)$, 平行测定三次。蛋糕的比容 $R(mL/g)$ 根据公式(1)进行计算。

$$R = \frac{V}{M} \quad \text{式 (1)}$$

1.2.4.2 质构特性测定 参考汪磊等^[18] 的方法并稍作修改。将蛋糕切割成 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ 大小均匀的块状, 采用 TA.XT.PLUS 物性测定仪测定蛋糕的全质构, 探头选用 P/36R, 试验参数设定为: 测试前速 2.0 mm/s, 测试速率 1.0 mm/s, 测试后速 1.0 mm/s, 压缩水平 50%, 使用二次压缩, 时间间隔为 5 s, 每组样品平行测定五次, 取平均值, 用硬度、弹性、黏聚性进行表征。

1.2.4.3 感官评分 参考谢镇声^[19] 的方法并稍作修改。由 10 位参加过感官评定培训的食品专业研究生进行感官评定, 男女比例为 1:1, 测试前对冷却的蛋糕进行编号, 将编号后的蛋糕分给感官评定人员进行品尝, 并从外观、内部结构、香气滋味、口感四个方面进行评分, 感官评定结果的平均值为最终结果。感官评分标准见表 2。

1.2.4.4 电子鼻分析 参考贾洪锋等^[20] 的方法并稍作修改。

样品处理: 将冷却的蛋糕样品切碎, 精确称取 1 g 样品, 置于 10 mL 顶空瓶中, 加盖密封, 室温下放

表 2 蛋糕感官评分标准

Table 2 Sensory scoring standard of cake

项目	评价标准
外观(20分)	外观正常, 不开裂和塌陷, 色泽均匀无斑点(16~20分) 外观正常, 少量变形, 较少斑点(10~15分) 表面粗糙, 严重变形, 色泽很不均匀, 具有较多斑点(10分以下)
内部结构(30分)	淡黄有光泽, 组织均匀细腻, 气孔较均匀, 无硬块, 无大气孔(21~30分) 淡黄无光泽, 气孔略大较为粗糙, 略有不均匀(10~20分) 气孔大且粗糙, 很不均匀, 有坚实部分(10分以下)
香气滋味(30分)	香味纯正, 甜度适中, 具有蛋糕特有风味(21~30分) 香味较淡, 偏甜或偏淡(10~20分) 香味很淡, 滋味很甜或很淡, 粗糙松散发干(10分以下)
口感(20分)	绵软细腻有弹性, 无粗糙感(16~20分) 较为绵软, 但略有坚韧感或粗糙感(10~15分) 绵软性较差, 有明显坚实、坚韧感或有柔软和松散感(10分以下)

置 1 h。

电子鼻参数设置: 采用顶空抽样方法, 冲洗时间 2 min, 调零时间 5 s, 进样测定时间 2.5 min, 加热温度 70 °C, 加热时间 300 s, 进样流量 150 mL/min, 平行测定三次。

电子鼻各传感器的响应特性如表 3。

1.2.4.5 GC-MS 分析 参考张仲柏等^[21] 的方法并稍作修改。

样品处理: 称取切碎的蛋糕样品 1 g, 置于 10 mL 顶空瓶中, 插入萃取头进行 SPME 萃取 30 min, 萃取头型号为: DVB/CAR/PDMS-50/30 μm。萃取前先将萃取头置于 GC-MS 进样口处 240 °C 老化 60 min。

气相色谱条件: 色谱柱: HP-5MS(5% 苯基)甲基硅氧烷毛细管柱($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$, I.D. $\times 0.25 \mu\text{m}$; Restek; Bellefonte, PA); 载气: 高纯氦气 (99.999%); 流速: 1 mL/min; 不分流进样, 进样口温度 250 °C, 解析时间 5 min; 升温条件: 柱箱初始温度 40 °C, 保持 2 min, 以 2 °C/min 升至 50 °C, 再以 5 °C/min 升至 110 °C, 最后以 3 °C/min 升至 250 °C。

质谱条件: 电离方式为电子轰击离子源, 传输线温度为 280 °C, 离子源温度为 230 °C, 电压为 70 eV, 质谱扫描幅度为 25~550 am, 扫描速率为 0.2 s/scan。

表 3 电子鼻传感器列阵及其主要特征

Table 3 Electronic nose sensor array and its main feature

序号	传感器名称	敏感物质类型	序号	传感器名称	敏感物质类型
1	LY2/LG	氯、氟、氮氧化合物、硫化物	10	T70/2	甲苯、二甲苯、一氧化碳
2	LY2/G	氨、胺类化合物、碳氧化合物	11	PA/2	乙醇、氨水、胺类化合物
3	LY2/AA	乙醇、丙酮、氨	12	P30/1	碳氢化合物、氨、乙醇
4	LY2/GH	氨、胺类化合物	13	P40/2	氯、硫化氢、氟化物
5	LY2/gCTL	硫化氢	14	P30/2	硫化氢、酮
6	LY2/gCT	丙烷、丁烷	15	T40/2	氯
7	T30/1	极性化合物、氯化氢	16	T40/1	氟
8	P10/1	非极性化合物、碳氢化合物、氨、氯	17	TA/2	乙醇
9	P40/1	氟、氯			

定性定量方法: 比较样品与 NIST11 标准质谱库的质谱数据匹配对样品中的未知风味物质进行定性分析, 以匹配度大于 80 作为定性依据。结合文献去除硅氧烷类杂峰后, 采用峰面积归一化法计算各挥发性成分的相对含量。

1.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行数据的显著性分析; 采用 Design-Expert 13 软件进行响应面试验设计、结果处理及模型建立, 对所得结果进行方差分析及 3D 曲面分析最佳变量水平; 采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果与分析

2.1.1 全蛋粉添加量对蛋糕品质的影响 全蛋粉添加量对蛋糕比容及感官品质影响见图 1。由图 1 可知, 随着全蛋粉添加量由 30% 增加到 60%, 比容与感官评分也逐渐增大。当全蛋粉添加量为 60% 时, 比容达到最大值 2.69 mL/g, 与此同时感官评分也达到最大值, 为 82.43 分。此时蛋糕软硬适中, 较为柔软蓬松, 内里孔隙较小, 且香味较浓, 具有添加鸡蛋的烘焙产品的特有香气。分析其原因可能是随着全蛋粉添加量增加, 面糊中鸡蛋蛋白含量随之增加, 全蛋粉中的蛋白质是良好的发泡剂和乳化剂^[22], 在烘烤过程中会变性凝结成蛋白质网络^[23], 赋予蛋糕蓬松的结构和柔软的口感。蛋黄中的胡萝卜素成分还能够赋予蛋糕鲜黄靓丽的色泽^[24]。当全蛋粉添加量继续增大时, 比容和感官评分则逐渐减小。全蛋粉添加量达到 90% 时, 蛋糕感官评分最小, 此时蛋糕质地较硬, 内里孔隙较小且表面容易开裂, 蛋腥味变重。分析其原因可能是当全蛋粉添加量过多, 会造成蛋糕中蛋白质含量过高, 此时蛋糕原料中强性和弱性原料平衡被打破^[25], 蛋白质的凝胶性所带来的影响超过其起泡性, 使得蛋糕质地变硬、弹性变差。

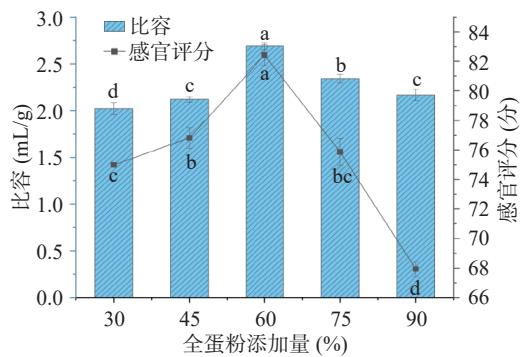


图 1 全蛋粉添加量对蛋糕比容、感官评分的影响

Fig.1 Effect of total egg powder addition on cake specific volume and sensory score

注: 不同字母代表数据间有显著性差异($P<0.05$); 图 2~图 3 同。

全蛋粉添加量对蛋糕质构特性影响见表 4。全蛋粉的添加能有效加强蛋糕的结构, 增添蛋糕的色泽与风味^[26]。由表 4 可知, 随着全蛋粉添加量的增加,

蛋糕硬度呈不断增大的趋势, 这可能是由于鸡蛋蛋白过多, 导致蛋糕气孔的形成变少, 从而导致蛋糕硬度增加。而弹性和黏聚性则呈先减小后增大的趋势, 且都在全蛋粉添加量为 45% 时达到最小。综合上述分析, 选择全蛋粉添加量为 45%、60% 和 75% 三个水平进行后续响应面试验。

表 4 不同全蛋粉添加量的蛋糕质构特性变化
Table 4 Changes of cake texture characteristics with different amounts of whole egg powder

全蛋粉添加量(%)	硬度(g)	弹性	黏聚性
30	707.91±67.29 ^e	0.66±0.03 ^{bcd}	0.61±0.01 ^b
45	819.02±87.87 ^{de}	0.65±0.02 ^c	0.53±0.01 ^d
60	1154.27±197.56 ^{cde}	0.73±0.05 ^{abc}	0.59±0.01 ^c
75	1426.22±64.63 ^{bc}	0.73±0.04 ^{ab}	0.59±0.02 ^c
90	2779.64±314.41 ^a	0.80±0.02 ^a	0.70±0.01 ^a

注: 同一列数据中不同字母代表数据间存在显著性差异($P<0.05$); 表 5~表 6 同。

2.1.2 蛋糕油添加量对蛋糕品质的影响 蛋糕油添加量对蛋糕比容及感官品质影响见图 2。由图 2 可知, 蛋糕油添加量逐渐增加, 蛋糕的比容也随之增大。当蛋糕油添加量为 25% 时, 蛋糕比容达到最大, 为 3.17 mL/g。此时蛋糕体积较大, 结构蓬松, 口感柔软有弹性。蛋糕油本质上是一种食品乳化剂, 乳化剂的添加可以使蛋糊在搅打过程中形成较多稳定的泡沫。在烘烤过程中乳化剂的存在增加了面糊的黏度, 使得面糊更加稳定, 有利于蛋糕形成更多细腻的气孔^[27]。所以随着蛋糕油的增加, 蛋糕的体积也逐渐变大。同时, 蛋糕感官评分呈先增大后减小的趋势。当蛋糕油添加量为 20% 时, 蛋糕感官评分值最大, 为 90.91 分。其原因可能是在蛋糕油添加量为 5%~20% 时, 随着蛋糕油添加量的增加, 蛋糕的体积胀大, 口感越来越蓬松和柔软, 感官评分则逐渐增大。但当蛋糕油添加量达到 25% 时, 蛋糕会散发出油脂的气味, 掩盖了蛋糕本身的香气, 因此感官评分会稍微下降。

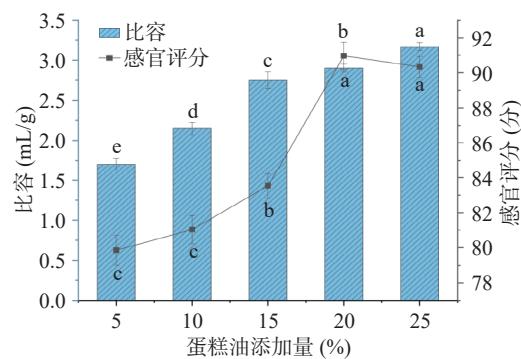


图 2 蛋糕油添加量对蛋糕比容、感官评分的影响

Fig.2 Effect of cake oil addition on cake specific volume and sensory score

蛋糕油添加量对蛋糕质构特性影响如表 5。由表 5 可以看出, 随着蛋糕油添加量的增加, 硬度呈现先减小后增加的趋势, 这与蛋糕比容的变化趋势相吻

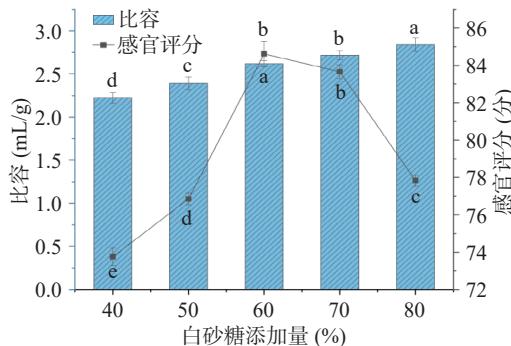
合。当蛋糕油添加量为20%时,硬度最小,为 $628.24\pm84.27\text{ g}$,且此时弹性较大,黏聚性较小,烤制出的蛋糕质地柔软并富有弹性。综合上述分析,选择蛋糕油添加量为15%、20%和25%的三个水平进行后续响应面试验。

表5 不同蛋糕油添加量的蛋糕质构特性变化

Table 5 Changes of cake texture characteristics with different cake oil addition

蛋糕油添加量(%)	硬度(g)	弹性	黏聚性
5	1724.73 ± 184.09^a	0.72 ± 0.07^d	0.55 ± 0.02^d
10	1305.99 ± 369.72^{abcd}	0.86 ± 0.09^{abcd}	0.68 ± 0.01^a
15	704.15 ± 86.29^d	0.91 ± 0.02^a	0.68 ± 0.01^a
20	628.24 ± 84.27^d	0.83 ± 0.02^{bcd}	0.62 ± 0.01^{bc}
25	753.11 ± 56.73^{bcd}	0.79 ± 0.01^{cd}	0.60 ± 0.00^c

2.1.3 白砂糖添加量对蛋糕品质的影响 白砂糖添加量对蛋糕比容及感官品质影响如图3。由图3可知,随着白砂糖添加量的增加,蛋糕比容也逐渐增大。当白砂糖添加量为80%时,蛋糕的比容最大,为 2.84 mL/g 。此时蛋糕质地蓬松、外表金黄、口感细腻柔软且气味香甜。这是由于糖与面糊流变特性密切相关,且糖的添加有利于面糊中泡沫的稳定性,使蛋糕更加蓬松^[28]。糖还能软化面糊中的面筋与鸡蛋中的蛋白质,使蛋糕更加柔软。在蛋糕烘烤时,糖会发生美拉德反应和焦糖化反应,赋予蛋糕烘焙产品特有的风味与金黄的色泽^[29]。在白砂糖添加量为40%~60%时,感官评分随着白砂糖添加量的增加而增加。在白砂糖添加量为60%~80%时,感官评分则随着白砂糖添加量的增加而减少,这是由于白砂糖添加过量导致蛋糕滋味过于甜腻。当白砂糖添加量为60%时感官评分最高,为84.62分,此时蛋糕甜味适中、具有蛋糕特有香气。

图3 白砂糖添加量对蛋糕比容、感官评分的影响
Fig.3 Effect of white granulated sugar addition on cake specific volume and sensory score

白砂糖添加量对蛋糕质构特性影响如表6。由表6可以看出,随着白砂糖添加量的增加,蛋糕硬度整体呈现逐渐减小的趋势,蛋糕质地逐渐柔软。这可能是因为糖在面糊搅打过程中虽然不会增加面糊的发泡性,但会增加面糊的稳定性^[30],提高淀粉糊化及蛋白质变性的温度,使蛋糕的体积变大,从而使硬度

减小。弹性和黏聚性则并未随着白砂糖添加量的增加呈现较规律性的变化。综合上述分析,选择白砂糖添加量为50%、60%和70%的三个水平进行后续响应面试验。

表6 不同白砂糖添加量的蛋糕质构特性变化

Table 6 Changes of cake texture characteristics with different white granulated sugar content

白砂糖添加量(%)	硬度(g)	弹性	黏聚性
40	1243.87 ± 240.82^a	0.89 ± 0.02^a	0.70 ± 0.01^a
50	546.18 ± 106.15^{de}	0.73 ± 0.06^b	0.62 ± 0.01^c
60	554.07 ± 74.27^{bcd}	0.90 ± 0.02^a	0.68 ± 0.02^{ab}
70	547.50 ± 68.08^{cd}	0.81 ± 0.04^{ab}	0.64 ± 0.02^{bc}
80	357.31 ± 34.16^e	0.88 ± 0.02^a	0.69 ± 0.01^a

2.2 响应面试验结果与分析

2.2.1 响应面试验设计及结果 使用Design-Expert 13软件进行响应面试验设计,试验方案及结果见表7。

表7 响应面试验设计及结果

Table 7 Design and results of response surface test

实验号	A全蛋粉添加量	B蛋糕油添加量	C糖添加量	Y感官评分(分)
1	0	0	0	87.3
2	1	0	1	79.0
3	-1	0	1	76.3
4	0	-1	1	80.6
5	0	1	1	75.2
6	-1	0	-1	71.8
7	1	1	0	77.4
8	-1	-1	0	72.2
9	0	0	0	86.4
10	1	-1	0	78.7
11	0	0	0	85.7
12	0	1	-1	79.5
13	-1	1	0	67.8
14	1	0	-1	82.2
15	0	0	0	85.8
16	0	0	0	86.3
17	0	-1	-1	78.6

部分感官评分较高的蛋糕照片如图4。

2.2.2 模型建立及拟合分析 利用Design-Expert 13对表7中数据进行回归拟合,取得最佳二次回归方程($P<0.05$): $Y=-271.90+4.39A+9.92B+4.10C+0.01AB-0.01AC-0.03BC-0.03A^2-0.22B^2-0.02C^2$ 对回归模型作显著性分析及方差分析,结果见表8。

由表8可以看出,模型 P 值小于0.0001,说明该模型极显著,且失拟项 P 值为0.2077,大于0.5,表明该模型失拟项不显著,说明取得的回归方程十分良好。由 $R^2=0.9914$ 、Adeq.Precision=29.09>4、 R^2_{adj} 和 R^2_{pred} 差值小于0.2可见,回归方程拟合度和可信度均较高,可以很好地对蛋糕的感官评价分数进行预测。

由表8可知,A和B对蛋糕感官评分均有极显著影响($P<0.01$)。此外,A、B和C还以指数形式影响感官评价得分($P<0.01$)。而C在50%~70%的范

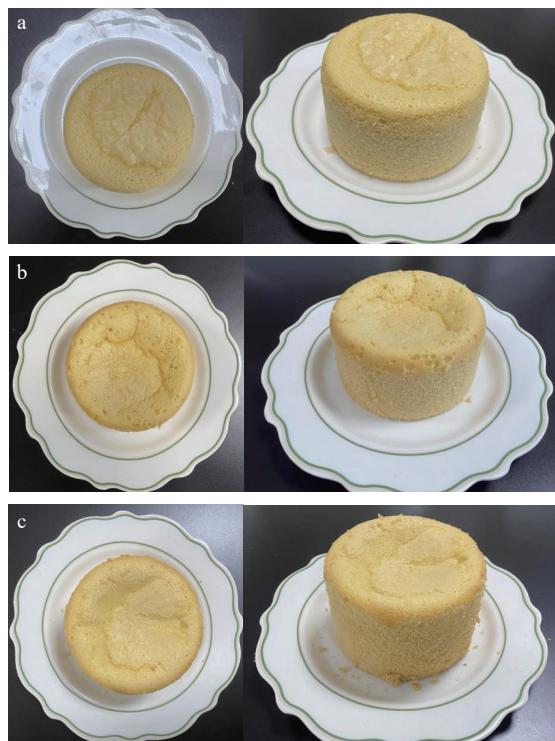


图 4 响应面试验第 1 组(a)、第 9 组(b)及第 16 组(c)蛋糕的俯视及斜视图

Fig.4 Top view and oblique view of the cake in group 1 (a), group 9 (b) and group 16 (c) of the response surface experiment

表 8 配方优化响应曲面二次回归模型方差分析结果

Table 8 Variance analysis results of quadratic regression model for formula optimization response surface

方差源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	521.06	9	57.90	89.17	<0.0001	**
A	106.58	1	106.58	164.15	<0.0001	**
B	13.00	1	13.00	20.03	0.0029	**
C	0.1250	1	0.1250	0.1925	0.6741	
AB	2.40	1	2.40	3.70	0.0958	
AC	14.82	1	14.82	22.83	0.0020	**
BC	9.92	1	9.92	15.28	0.0058	**
A ²	189.72	1	189.72	292.19	<0.0001	**
B ²	130.28	1	130.28	200.65	<0.0001	**
C ²	21.55	1	21.55	33.20	0.0007	**
残差	4.55	7	0.6493			
失拟方差	2.93	3	0.9750	2.41	0.2077	不显著
误差	1.62	4	0.4050			
总和	525.60	16				
$R^2=0.9914$		$R^2_{adj}=0.9802$	$R^2_{pred}=0.9061$	Adeq.Precision=29.09		

注: “*”表示对结果影响显著($P<0.05$); “**”表示对结果影响极显著($P<0.01$)。

围内对蛋糕的感官评分没有显著影响。A 与 C 之间、B 与 C 之间均存在极显著的交互作用($P<0.01$), 而 A 与 B 相互之间则存在一定的交互作用($P=0.0958$)。在所取的各因素的水平范围内, 三个因素对于蛋糕感官评分的影响程度为: 全蛋粉添加量 A>蛋糕油添加量 B>白砂糖添加量 C。

2.2.3 响应面图分析 全蛋粉添加量、蛋糕油添加量与白砂糖添加量之间交互作用, 以及其对蛋糕感官评分影响的等高线图及响应曲面图见图 5。响应曲

面图坡度大小, 可以说明响应值随着因素变化而变化的程度^[31-33]。

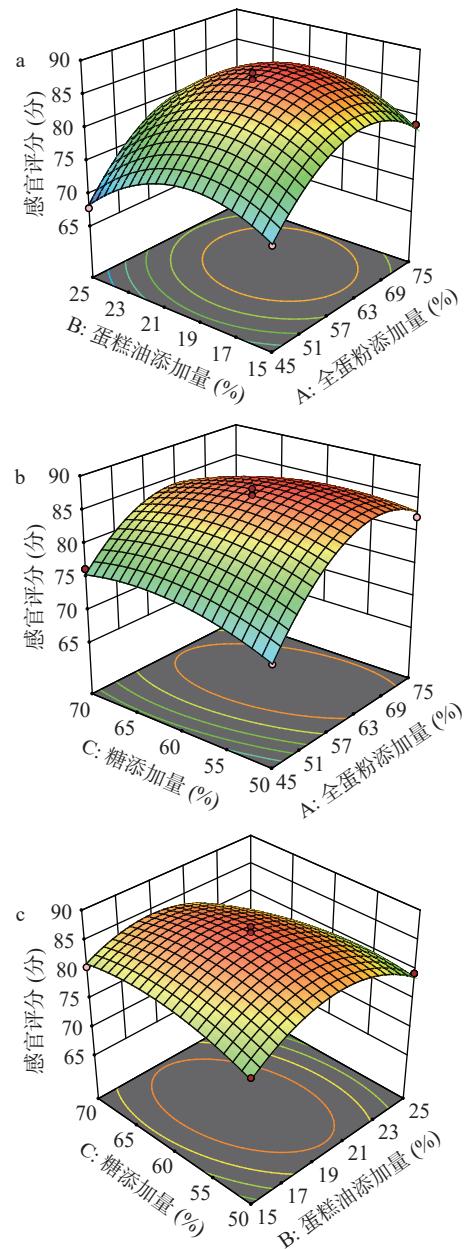


图 5 三种交互作用对全蛋蛋糕预拌粉感官品质影响的等高线及响应面图

Fig.5 Contour line and response surface diagram of the three interactions on the sensory quality of whole egg cake premixed powder

注: 全蛋粉与蛋糕油添加量的交互作用(a)、全蛋粉与白砂糖添加量的交互作用(b)及蛋糕油与白砂糖添加量的交互作用(c)。

从图 5 中可以看出, 全蛋粉添加量与蛋糕油添加量对蛋糕感官评分的影响较大, 而白砂糖添加量对蛋糕感官评分的影响则较小些。随着全蛋粉添加量、蛋糕油添加量与白砂糖添加量的增加, 蛋糕感官评分均呈现先增大后减小的趋势, 在全蛋粉和蛋糕油添加量增加的过程中, 这种趋势较为明显。

当固定白砂糖添加量时, 感官评分随着全蛋粉和蛋糕油添加量的增加, 均呈现先增加后降低的变化趋势, 而此时等高线呈闭合的圆形, 说明全蛋粉添加

量与蛋糕油添加量之间没有较强的交互作用；当固定蛋糕油的添加量时，随着全蛋粉添加量的增加，感官评分呈先增加后降低的趋势。当全蛋粉添加量为低于 63% 的一个固定数值时，蛋糕的感官评分随着白砂糖添加量的增加而增加，当全蛋粉添加量为高于 63% 的一个固定数值时，蛋糕的感官评分随着白砂糖添加量的增加而减小；当固定全蛋粉的添加量时，随着蛋糕油添加量的增加感官评分呈先增加后减小的趋势，随着白砂糖添加量的增加，蛋糕油添加量对感官评分的影响变强，白砂糖添加量小于 55% 时，蛋糕油添加量对蛋糕感官评价得分影响较小。观察图 5b 和图 5c 可知，等高线图均呈椭圆形且响应面均呈凸面，说明全蛋粉添加量与白砂糖添加量之间、蛋糕油添加量和白砂糖添加量之间存在较强的交互作用且存在最大值。

2.2.4 验证试验 利用 Design-Expert 13 对所得方程进行回归分析, 可得到全蛋蛋糕预拌粉的最优配方为: 全蛋粉添加量 64.28%, 蛋糕油添加量 19.61%, 白砂糖添加量 58.78%, 在此优化配方的条件下制作的蛋糕感官评分预测值为 86.88 分。为了方便实际操作, 调整全蛋粉添加量至 65%、蛋糕油添加量至 20%。对于白砂糖添加量, 以面粉 40 g 为基准需添加 23.51 g, 考虑到现代人对低糖饮食的追求及实际生产中降低成本的需求, 所以取白砂糖添加量为 23 g, 即 57.5%。对调整后的配方进行验证实验, 取三次试验的平均值, 所得感官评分为 87.12 分, 与模型预测值相近, 说明该模型拟合良好, 验证了利用响应面法优化蛋糕预拌粉配方较为可靠。测定最优配方条件下蛋糕的比容和质构特性可得: 比容为 3.69 mL/g 、硬度为 $438.54 \pm 19.31 \text{ g}$ 、弹性为 0.91 ± 0.02 、黏聚性为 0.69 ± 0.01 。与响应面优化前蛋糕的比容和质构特性比较发现, 响应面优化后的蛋糕硬度小于优化前, 而比容、弹性和黏聚性则均大于优化前, 说明优化后的蛋糕体积更大, 口感更好, 更加柔软且富有弹性。因此, 优化效果良好。

2.3 最优配方条件下的蛋糕风味分析

2.3.1 电子鼻分析 电子鼻是一种利用不同传感器对样品中气体成分进行分析和气味检测的智能系统^[20]。由电子鼻特征气味雷达指纹图(图6)可以看出,17个传感器对于最优配方蛋糕风味物质的响应值不同。其中传感器TA/2、PA/2、P40/1、P10/1响应值较高,说明最优配方蛋糕中乙醇、胺类化合物、氟、碳氢化合物是较为主要的风味物质。而传感器LY2/AA、LY2/LG、LY2/G、LY2/GH、LY2/gCTL及LY2/gCT的响应值较低,说明蛋糕中的氮氧化合

表9 最优配方蛋糕的风味分析

Table 9 Flavor analysis of the best recipe cake

物、硫化物、碳氧化合物等风味物质的含量较少。

有研究者利用电子鼻对低脂蛋糕进行风味分析后,发现添加液体油的含丙二醇酯低脂蛋糕与添加固体油的低脂蛋糕相比吡嗪类化合物显著降低,说明丙二醇酯可以有效缓解脂肪氧化和 Strecker 反应,延缓蛋糕风味的劣变,对蛋糕储藏起到积极作用^[34]。本研究所得最优配方蛋糕中硫化物含量较少,而蛋糕中的硫化物主要通过 Strecker 反应和硫胺素降解产生^[21],同样也可说明本蛋糕风味劣变过程较慢。

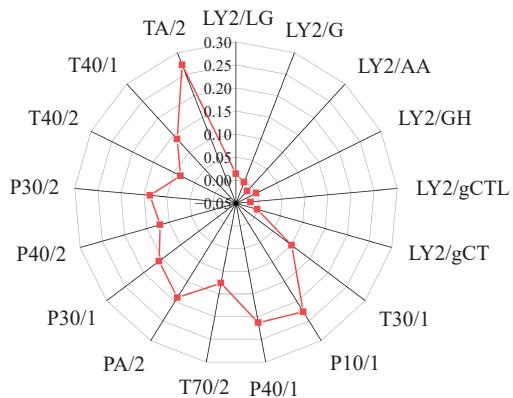


图 6 最优配方蛋糕的电子鼻雷达图

Fig.6 Radar image of the electronic nose of the best recipe cake

2.3.2 最优配方蛋糕挥发性风味物质分析 利用GC-MS技术分析可得最优配方蛋糕中所含有的有效风味物质共35种(表9),其中醛类物质9种,醇类物质1种,酯类物质3种,烯类物质1种,烃类物质18种,含氮化合物2种,杂环类化合物1种。面糊中的脂质、糖和蛋白质,通过烘烤,发生美拉德反应和焦糖化反应,赋予了蛋糕独特的烘焙香气^[35]。醛类物质和酯类物质是影响最优配方蛋糕风味的主要物质,其中壬醛(相对含量11.691%)和反,反-2,4-癸二烯醛(相对含量38.011%)在蛋糕中的相对含量较高。壬醛呈花香、油脂香和坚果香^[36],反,反-2,4-癸二烯醛则呈桔子和新鲜的甜橙香气,带有脂肪气息,天然存在于草莓、橙皮、烤鸡的挥发性成分中^[37]。醛类物质的阈值很低,对风味影响显著^[38],蛋糕冷却过程中所发生的脂质氧化作用,可能是醛类物质形成的重要原因^[39]。其余对蛋糕风味产生正面影响的物质主要有反-2-顺-6-壬二烯醛(花果香)、(E,E)-2,4-壬二烯醛(花果香、油脂香)、2-十一烯醛(果香、肉香)、甲酸辛酯(玫瑰-橙子的花果香)^[40]、壬酸甲酯(果酒及椰子样香气)、(+)-柠檬烯(柑橘香气)和苯并噻唑(李子香)^[41],具有中性风味的物质主要为4-乙基苯甲醛

续表 9

序号	化合物名称	化学式	CAS号	相对含量(%)
4	4-乙基苯甲醛	C ₉ H ₁₀ O	4748-78-1	7.94
5	(E,E)-2,4-壬二烯醛	C ₉ H ₁₄ O	5910-87-2	0.71
6	反式-2-癸烯醛	C ₁₀ H ₁₈ O	3913-81-3	2.058
7	反,反-2,4-癸二烯醛	C ₁₀ H ₁₆ O	25152-84-5	38.011
8	2-十一烯醛	C ₁₁ H ₂₀ O	2463-77-6	1.917
9	2-丁基-2-辛烯醛	C ₁₂ H ₂₂ O	13019-16-4	3.16
10	1,3-二氯丙醇	C ₃ H ₆ Cl ₂ O	96-23-1	4.916
11	甲酸辛酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	112-32-3	2.096
12	壬酸甲酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	1731-84-6	0.705
13	2,4-葵二烯酸甲酯	C ₁₁ H ₁₈ O ₂	4493-42-9	5.224
14	(+)-柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆	5989-27-5	0.773
15	3,3-二甲基辛烷	C ₁₀ H ₂₂	4110-44-5	0.645
16	2,6-二甲基壬烷	C ₁₁ H ₂₄	17302-23-7	4.528
17	1,1-二甲氧基辛烷	C ₁₀ H ₂₂ O ₂	10022-28-3	2.148
18	5-(2-甲基丙基)壬烷	C ₁₃ H ₂₈	62185-53-9	0.19
19	4,6-二甲基十一烷	C ₁₃ H ₂₈	17312-82-2	0.518
20	4-甲基十二烷	C ₁₃ H ₂₈	6117-97-1	0.569
21	2,7-二甲基十一烷	C ₁₃ H ₂₈	17301-24-5	0.582
22	4,7-二甲基十一烷	C ₁₃ H ₂₈	17301-32-5	0.597
23	5-甲基-5-丙基壬烷	C ₁₃ H ₂₈	17312-75-3	0.254
24	2,3,6-三甲基癸烷	C ₁₃ H ₂₈	62238-12-4	1.156
25	4,6-二甲基十二烷	C ₁₄ H ₃₀	61141-72-8	4.069
26	3-甲基-5-丙基壬烷	C ₁₃ H ₂₈	31081-18-2	0.423
27	2,3,7-三甲基癸烷	C ₁₃ H ₂₈	62238-13-5	0.224
28	4,4-二甲基十一烷	C ₁₃ H ₂₈	17312-68-4	0.254
29	5,7-二甲基十一烷	C ₁₁ H ₁₄ O ₃	17312-83-3	0.133
30	正十五烷	C ₉ H ₁₈ O	629-62-9	1.105
31	4,8-二甲基十一烷	C ₁₄ H ₃₀	17301-33-6	0.267
32	3,3-二甲基己烷	C ₁₀ H ₂₂	563-16-6	0.266
33	5-氨基四氮唑	CH ₃ N ₅	4418-61-5	0.337
34	1-苯基-5-甲基-1-己酮	C ₁₃ H ₁₈ O	25552-17-4	0.038
35	苯并噻唑	C ₇ H ₅ NS	95-16-9	0.203

(苦杏仁味)和 1,1-二甲氧基辛烷(木香)。在抑真菌乳酸菌蒸蛋糕中^[42], 醇类物质和醛类物质是其主要的风味物质, 与此同时乳酸菌的发酵作用也使其拥有更多的酸类化合物。质构优化后的蛋酪蛋胚中, 愉悦风味的贡献物质主要是醛类、醇类和酯类, 与本最优配方蛋糕中愉悦风味的贡献物质接近。

3 结论

本研究在单因素实验的基础上, 利用响应面优化法, 对全蛋蛋糕预拌粉的配方进行了优化。分析试验结果可知各因素对蛋糕感官的影响程度为: 全蛋粉添加量 A>蛋糕油添加量 B>白砂糖添加量 C, 且因素之间互相存在较为显著的交互作用。通过模型分析及调整得到全蛋蛋糕预拌粉的最优配方为: 全蛋粉添加量 65%, 蛋糕油添加量 20%, 白砂糖添加量 57.5%。测定最优配方条件下蛋糕的比容和质构特性可得: 比容为 3.69 mL/g、硬度为 438.54±19.31 g、弹性为 0.91±0.02、黏聚性为 0.69±0.01。与响应面优化前蛋糕的比容和质构特性比较发现, 响应面优化后的蛋糕硬度小于优化前, 而比容、弹性和黏聚性则

均大于优化前, 说明优化后的蛋糕体积更大, 口感更好, 更加柔软且富有弹性。因此, 优化效果良好。根据最优配方所制的蛋糕色泽鲜黄、口感柔软而不失弹性、味道甜而不腻且具有蛋糕特有香气, 感官评分为 87.12 分, 极大地方便了家庭式蛋糕的制作。

利用电子鼻对最优配方进行风味分析, 得到最优配方蛋糕中乙醇、胺类化合物、氟、碳氢化合物是较为主要的风味物质, 同时蛋糕中的硫化物含量较少, 说明最优配方蛋糕的风味劣变过程较为缓慢。利用 GC-MS 技术进一步分析可得最优配方蛋糕中含有 9 种气味愉悦的风味物质, 其中壬醛和反, 反-2,4-癸二烯醛在最优配方蛋糕中的相对含量较高, 蛋糕整体呈现愉悦的香气。

参考文献

- [1] 刘静波, 马爽, 刘博群, 等. 不同干燥方式对全蛋粉冲调性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 383-388. [LIU Jingbo, MA Shuang, LIU Boqun, et al. Effect of different drying methods on solubility of whole egg powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (12): 383-388.]
- [2] 王菊侠, 晁芳芳, 杨玲引, 等. 干蛋粉在国内外食品中的开发

- [与应用 [J]. 西部粮油科技, 2002(5): 39–42. [WANG Juxia, CHAO Fangfang, YANG Lingyin, et al. Development and application of dried egg powder in domestic and foreign food products [J]. *Grain Processing*, 2002 (5): 39–42.]]
- [3] 马爽, 刘静波, 王二雷. 蛋粉加工及应用的研究现状分析 [J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 393–397. [MA Shuang, LIU Jingbo, WANG Erlei. Exisiting conditon analysis of processing and application of egg powder [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32 (2): 393–397.]]
- [4] 楚炎沛. 蛋糕预拌粉的开发思路和发展前景 [J]. 现代面粉工业, 2015, 29(5): 19–23. [CHU Yanpei. The development thought and prospect of premixed cake powder [J]. *Modern Flour Milling Industry*, 2015, 29 (5): 19–23.]]
- [5] 周磊, 陈志成. 全谷物家庭预拌粉研究进展与前景 [J]. 粮食加工, 2015, 40(3): 23–25. [ZHOU Lei, CHEN Zhicheng. Research progress and prospect of whole grain home ready mixed flour [J]. *Grain Processing*, 2015, 40 (3): 23–25.]]
- [6] 顾尧臣. 开发预混合粉 [J]. 面粉通讯, 2007(3): 10–13. [GU Yaochen. Develop premixed powder [J]. *Flour Communications*, 2007(3): 10–13.]]
- [7] MOKHTAR H A E K. Production of ready-to-bake whole grain barley cake mix with improved quality [J]. *Asian Food Science Journal*, 2020(3): 24–33.
- [8] BASSINELLO P Z, BENTO J A C, GOMES L D O F, et al. Nutritional value of gluten-free rice and bean based cake mix [J]. *Ciência Rural*, 2020, 50(6): 1–11.
- [9] FERNANDES S S, FILIPINI G, SALAS-MELLADO M D L M. Development of cake mix with reduced fat and high practicality by adding chia mucilage [J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101–148.
- [10] 宋玉, 曹磊, 陶余保, 等. 一种钙锌强化型蛋糕预拌粉及其加工方法: CN109006918A[P]. 2018-12-18. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN109006918A&DbName=SCPD2018>. [SONG Yu, CAO Lei, TAO Yubao, et al. A kind of calcium and zinc fortified cake premixed powder and its processing method: CN109006918A[P]. 2018-12-18. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN109006918A&DbName=SCPD2018>.]
- [11] 郭保平, 李超, 邱镪. 一种适用于婴幼儿的微波蛋糕预拌粉及微波蛋糕制备方法: CN114027341A[P]. 2022-02-11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN114027341A&DbName=SCPD2022>. [GUO Baoping, LI Chao, QIU Jie. A microwave cake mix suitable for infants and young children and its preparation method: CN114027341A[P]. 2022-02-11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN114027341A&DbName=SCPD2022>.]
- [12] 朱莹莹, 申瑞玲, 董吉林, 等. 慢消化青稞全粉及其制备方法、马芬蛋糕预拌粉: CN114027346A[P]. 2022-02-11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN114027346A&DbName=SCPD2022>. [ZHU Yingying, SHEN Ruiling, DONG Jilin, et al. Slowly digestible barley whole flour and its preparation method, muffin cake premixed powder: CN114027346A[P]. 2022-02-11. [http://kns.cnki.net/kcms/details/detail.aspx?FileName=CN114027346A&DbName=SCPD2022](https://kns.cnki.net/kcms/details/detail.aspx?FileName=CN114027346A&DbName=SCPD2022).]
- [13] 李璇, 薛峰, 王身艳, 等. 一种藜麦蜂蜜蛋糕预拌粉配方研究方法: CN107484795A[P]. 2017-12-19. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN107484795A&DbName=SCPD2017>. [LI Xuan, XUE Feng, WANG Shengyan, et al. A method for the formulation of quinoa honey cake premixed powder: CN107484795A[P]. 2017-12-19. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN107484795A&DbName=SCPD2017>.]
- [14] 徐媛. 一种芸豆蛋糕预拌粉、芸豆微波蛋糕及其制备方法: CN112586538A[P]. 2021-04-02. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN112586538A&DbName=SCPD2021>. [XU Yuan. A kidney bean cake mix, kidney bean microwave cake and its preparation method: CN112586538A[P]. 2021-04-02. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN112586538A&DbName=SCPD2021>.]
- [15] 吴顺均, 徐振华, 任家勇, 等. 一种绿茶蛋糕预拌粉及其制备方法: CN112155030A[P]. 2021-01-01. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN112155030A&DbName=SCPD2021>. [WU Shunjun, XU Zhenhua, REN Jiayong, et al. A green tea cake mix and its preparation method: CN112155030A[P]. 2021-01-01. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CN112155030A&DbName=SCPD2021>.]
- [16] 王革新, 孙定红, 梅中非. 全蛋粉代替新鲜鸡蛋制作海绵蛋糕的工艺研究 [J]. 食品工业科技, 2008(6): 245–247. [WANG Gexin, SUN Dinghong, MEI Zhongfei. Study on preparation of sponge cake using whole egg powder [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2008(6): 245–247.]
- [17] 郝月慧, 贾春利, 王凤, 等. 三种糖醇对海绵蛋糕面糊流变学、热力学及烘焙学特性影响的比较研究 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(6): 298–302. [HAO Yuehui, JIA Chunli, WANG Feng, et al. A comparative research of the influences of maltitol, xylitol and erythritol on the rheological, thermal and baking properties of sponge-cake batter [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35 (6): 298–302.]
- [18] 汪磊, 周坚, 于巍. 蛋糕预混合粉淀粉添加的研究 [J]. 粮食与饲料工业, 2009(6): 9–10. [WANG Lei, ZHOU Jian, YU Wei. Research on adding starch to premixed flour for cake [J]. *Cereal & Feed Industry*, 2009 (6): 9–10.]
- [19] 谢镇声. 核桃粉蛋糕加工工艺及其品质研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2018. [XIE Zhensheng. Study on processing technology and quality of walnut powder cake [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.]
- [20] 贾洪峰, 钟志惠, 孙俊秀, 等. 不同加工方式对绿壳鸡蛋和普通鸡蛋海绵蛋糕品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(13): 172–176. [JIA Hongfeng, ZHONG Zhihui, SUN Junxiu, et al. Effect of processing methods on the quality of sponge cake produced by green-eggshell egg and normal egg [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38 (13): 172–176.]
- [21] 张仲柏, 牛黎莉, 魏晋梅, 等. 马铃薯蛋糕常温贮藏期间香气成分动态变化 [J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(5): 21–29. [ZHANG Zhongbai, NIU Lili, WEI Jinmei, et al. Dynamic change in aroma composition of potato cake during storage at ambient temperature [J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2017, 53(5): 21–29.]
- [22] ABU-GHOUSH M, HERALD T J, ARAMOUNI F M. Comparative study of egg white protein and egg alternatives used in an angel food cake system [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2010, 34: 411–425.
- [23] CAMPBELL L, RAIKOS V, EUSTON S R. Modification of functional properties of egg-white proteins [J]. *Nahrung-Food*, 2003, 47(6): 369–376.
- [24] WU J P. Eggs and egg products processing [M]. New York: John Wiley & Sons, 2014: 437–455.
- [25] 段红玉. 蛋糕粉原辅料对蛋糕品质的影响研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2013. [DUAN Yuhong. Study on effects of cake powder materials on quality of produced cake [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2013.]
- [26] CONFORTI F D. Fundamentals of cakes: Ingredients and

- production [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007: 307-325.
- [27] 汪磊. 蛋糕预混合粉的研制 [D]. 武汉: 武汉工业学院, 2009.
- [WANG Lei. A study on the cake premixed flour [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2009.]
- [28] SHELKE K, FAUBION J M, HOSENEY R C. The dynamics of cake baking as studied by a combination of viscometry and electrical-resistance oven heating [J]. Cereal Chemistry, 1990, 67 (6): 575-580.
- [29] EMMANUEL P. Browning development in bakery products-A review [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(3): 239-249.
- [30] ZHU H, DAMODARAN S. Proteose peptones and physical factors affect foaming properties of whey protein isolate [J]. Journal of Food Science, 1994, 59(3): 554-560.
- [31] 梁晓娟, 陈静, 张文哲, 等. 响应面法优化百合果冻配方 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(1): 221-226. [LIANG Xiaojuan, CHEN Jing, ZHANG Wenzhe, et al. Optimization of lily jelly formulation by response surface methodology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39 (1): 221-226.]
- [32] 张晨, 龚晓源, 胡海洋, 等. 响应面法优化藜麦松露酒糟曲奇饼干工艺 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42(24): 86-91. [ZHANG Chen, GONG Xiaoyuan, HU Haiyang, et al. Optimization of quinoa truffle distiller's grains cookies by response surface methodology [J]. Food Research and Development, 2021, 42 (24): 86-91.]
- [33] 雷文平, 吴诗敏, 李彩虹, 等. 响应面法优化凝固型发酵椰奶工艺 [J]. 中国酿造, 2019, 38(2): 212-216. [LEI Weping, WU Shimin, LI Caihong, et al. Process optimization of set-style fermented coconut milk by response [J]. China Brewing, 2019, 38 (2): 212-216.]
- [34] 王家宝. 含丙二醇酯的低脂蛋糕烘焙特性与品质改良研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2019. [WANG Jiaobao. Study on baking characteristics and quality improvement of low-fat cake containing propylene glycol esters [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.]
- [35] 李里特. 馒头生产的沿革和工业化 [J]. 粮食加工, 2006(6): 13-15. [LI Lite. Evolution and industrialization of steamed bread production [J]. Grain Processing, 2006(6): 13-15.]
- [36] 曹巧娜, 白云起, 全其根. 基于均匀设计的蛋酪蛋坯质构优化方案及风味分析 [J]. 中国食品学报, 2020, 20(10): 169-179. [CAO Qiaona, BAI Yunqi, TONG Qigen. Texture optimization and flavor analysis of egg cheese billet based on uniform design [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20 (10): 169-179.]
- [37] 梁立冬, 王之建, 贾卫民. 反, 反-2,4-癸二烯醛的合成 [J]. 化学试剂, 2014, 36(10): 958-960. [LIANG Lidong, WANG Zhijian, JIA Weimin. Synthesis of trans,trans-2,4-decadienal [J]. Chemical Reagents, 2014, 36(10): 958-960.]
- [38] 贾丽娜, 焦爱权, 赵建伟, 等. 回锅肉加工及冻藏过程中风味物质的变化 [J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(12): 1269-1277. [JIA Lina, JIAO Aiquan, ZHAO Jianwei, et al. Study on the changes of volatile flavor components in double-fried pork during the processing and frozen storage [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2015, 34(12): 1269-1277.]
- [39] 郁延军, 周光宏, 赵改名, 等. 金华火腿生产过程中风味成分的变化 [J]. 食品与生物技术学报, 2005(4): 1-12. [XUN Yanjun, ZHOU Guanghong, ZHAO Gaiming, et al. Time related changes in flavor compounds of Jinhua dry-cured ham during processing [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2005(4): 1-12.]
- [40] 王树清, 高崇. 强酸性阳离子交换树脂催化合成甲酸辛酯的研究 [J]. 应用化工, 2004(4): 41-43. [WANG Shuqing, GAO Chong. Studies on catalytic synthesis of octyl formate by strong acid positive ion exchange resin [J]. Applied Chemical Industry, 2004(4): 41-43.]
- [41] 赵大云, 汤坚, 丁霄霖. 雪里蕻腌菜特征风味物质的分离和鉴定 [J]. 无锡轻工大学学报, 2001(3): 291-298. [ZHAO Dayun, TANG Jian, DING Xiaolin. Isolation and identification of typical flavor components of poth erb mustard pickles [J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2001(3): 291-298.]
- [42] 何艳霞. 抑真菌乳酸菌的筛选及其在蒸蛋糕中的应用 [D]. 无锡: 江南大学, 2017. [HE Yanxia. Screening of antifungal lactic acid bacteria and its application in the steamed cake [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]