

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240914001

戚风蛋糕复配抗老化剂的研发与应用

袁 辉¹, 李黄炜², 李思漫², 张书艳², 林卓填², 陈 旭^{2*}, 朱 杰^{2*}

(1. 东莞市丰熙食品有限公司, 东莞 523799; 2. 东莞理工学院生命健康与技术学院, 中国轻工业健康食品开发与营养调控重点实验室, 东莞市特色食品精准设计重点实验室, 东莞 523808)

摘 要: **目的** 探究食品添加剂对戚风蛋糕储藏品质的影响, 研发具有良好抗老化效果的复配抗老化剂, 用于抑制戚风蛋糕老化。**方法** 采用单因素实验探究黄原胶, 单双脂肪酸甘油酯, 磷脂, 丙二醇脂肪酸酯和蔗糖脂肪酸酯 5 种添加剂对戚风蛋糕硬度、回复性和水分含量的影响, 并通过正交实验获得复配抗老化剂的最优配比。**结果** 通过单因素实验与正交优化实验, 获得复配抗老化剂的最优质量比为黄原胶:单双甘油脂肪酸酯:磷脂:丙二醇脂肪酸酯=3:32:8:6。添加复配抗老化剂后, 戚风蛋糕的硬度为 510.43 g, 回复性为 43.67%, 与未添加抗老化剂的戚风蛋糕对比, 使用复配抗老化剂制备的戚风蛋糕, 硬度降低 48.77%, 回复性提高 1.75%。经过 4 °C 储藏 7 d 后, 添加复配抗老化剂的戚风蛋糕较未添加抗老化剂的样品组硬度增加幅度降低了 73.56% ($P<0.05$)。**结论** 正交实验所得的复配抗老化剂对戚风蛋糕具有良好的抗老化和品质改良效果。该研究结果将为复配抗老化剂在淀粉基食品中的抗老化及品质改良提供重要指导意义。

关键词: 戚风蛋糕; 食品添加剂; 抗老化; 配方优化

Development and application of compound anti-retrogradation agent for chiffon cake

YUAN Hui¹, LI Huang-Wei², LI Si-Man², ZHANG Shu-Yan², LIN Zhuo-Tian², CHEN Xu^{2*}, ZHU Jie^{2*}

(1. Dongguan Sunssi Group Food Co., Ltd., Dongguan 523799, China; 2. School of Life and Health Technology, Dongguan University of Technology, China National Light Industry Key Laboratory of Healthy Food Development and Nutrition Regulation, Dongguan Key Laboratory of Typical Food Precision Design, Dongguan 523808, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of food additives on the storage quality of chiffon cake, and develop a rated compound anti-aging agent with good anti-aging effect for inhibiting the aging of chiffon cake.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32202010)、广东省基础与应用基础研究基金地区培育项目(2023A1515140058)、东莞市企业技术服务项目(11001202310099)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32202010), the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation Regional Cultivation Project (2023A1515140058), and the Dongguan Enterprise Technical Service Project (11001202310099)

***通信作者:** 陈旭, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能碳水化合物及淀粉功能化修饰与调控、食物组分互作与品质调控和升糖指数食品研发。E-mail: chenxu@dgut.edu.cn

朱杰, 博士, 教授, 主要研究方向为食品组分相互作用与品质调控和碳水化合物功能材料。E-mail: zhujie@dgut.edu.cn

***Corresponding author:** CHEN Xu, Ph.D, Associate Professor, School of Life and Health Technology, Dongguan University of Technology, Key Laboratory of Health Food Development and Nutrition Regulation of China National Light Industry, Dongguan Key Laboratory of Typical Food Precision Design, Dongguan 523808, China. E-mail: chenxu@dgut.edu.cn

ZHU Jie, Ph.D, Professor, School of Life and Health Technology, Dongguan University of Technology, Key Laboratory of Health Food Development and Nutrition Regulation of China National Light Industry, Dongguan Key Laboratory of Typical Food Precision Design, Dongguan 523808, China. E-mail: zhujie@dgut.edu.cn

Methods In the study, single factor experiments were used to investigate the effects of 5 kinds of additives (xanthan gum, mono- and diglycerides of fatty acids, phospholipids, propylene glycol esters of fatty acids, and sucrose esters of fatty acids) on the hardness, resilience, and moisture content of chiffon cakes. The optimal ratio for the composite anti-retrogradation agent was obtained through orthogonal experiments. **Results** Based on the results of single factor experiments and orthogonal optimization experiments, the optimal ratio for the composite anti-retrogradation agent was xanthan gum:mono- and diglycerides of fatty acids:phospholipids:propylene glycol esters of fatty acids=3:32:8:6. With the addition of the composite anti-retrogradation agent, the hardness of the chiffon cake was 510.43 g, and the resilience was 43.67%. Compared to chiffon cakes without the composite anti-retrogradation agent, the hardness was reduced by 48.77%, and the resilience was increased by 1.75%. After storage at 4 °C for 7 days, the increase in hardness of chiffon cakes with the addition of the composite anti-retrogradation agent was 73.56% lower than that of the sample group without the composite retrogradation agent ($P<0.05$). **Conclusion** The compound anti-retrogradation agent obtained from the orthogonal test has an effective anti-retrogradation and quality improvement on chiffon cake. The findings from the study provide important guidance for anti- retrogradation and quality improvement of compounded anti-retrogradation agents in starch-based foods.

KEY WORDS: chiffon cake; food additives; anti-retrogradation; formulation optimization

0 引 言

戚风蛋糕是以小麦淀粉为主, 辅以鸡蛋、植物油、牛奶等烘焙而成的食品, 具有质地松软、组织均匀、口感细腻等优点, 深受消费者的喜爱^[1]。然而, 在长期货架保存过程中, 戚风蛋糕容易发生老化现象产生质地硬化、品质劣变等^[2-4]。因此, 戚风蛋糕的老化是目前烘焙类食品研发应用领域亟待解决的重要问题。

戚风蛋糕的老化与淀粉、蛋白质和脂质有关。在制作过程中, 蛋白质经打发形成气泡, 小麦面粉中的面筋蛋白经机械搅拌会形成面筋蛋白网络结构。在烘焙过程中, 淀粉发生糊化, 蛋白质和淀粉在该过程中凝固, 形成气孔结构, 油脂在该过程中均匀地分布于蛋糕中。储藏降温过程有利于淀粉发生老化; 同时, 储藏过程伴随水分损失, 导致戚风蛋糕质地变硬^[2,5-6]。研究表明, 乳化剂、亲水胶体等食品添加剂能与淀粉、蛋白质和脂质等食品大分子发生相互作用具有延缓戚风蛋糕老化的作用^[7-9]。如乳化剂可以与糊化后的直链淀粉分子形成 V 型复合物延缓淀粉老化^[10-11]。乳化剂还可以与蛋白质/脂质发生相互作用, 从而改善蛋糕糊中气泡的界面稳定性。亲水胶体具有较强的持水能力, 可以有效减慢水分迁移速度, 减缓面筋蛋白网状结构, 从而减慢戚风蛋糕的老化速度^[12-14]。此外有研究表明, 乳化剂复配对戚风蛋糕的抗老化具有协同效果^[7]。因此, 在实际生产中, 常将不同类型乳化剂按照一定配比制备得到复配抗老化剂, 并用于实际生产中。目前市面上采用的复配抗老化剂虽然对戚风蛋糕的品质具有一定的改良作用, 但是其抗老化效果有限, 且其成本相对昂贵, 对于中小型企业容易增加其生产成本。为了更好地改善戚风蛋糕的品质及降低生产成本, 需要摸索出确切配方的复配

抗老化剂。

本研究以戚风蛋糕为研究对象, 通过加速老化试验, 测定硬度、回复性和水分含量变化, 通过单因素和正交试验分析黄原胶、单双甘油脂肪酸酯、磷脂、丙二醇脂肪酸酯和蔗糖脂肪酸酯 5 种食品添加及复配抗老化剂抑制戚风蛋糕老化效果, 并探究讨论相互之间的作用机制。研究结果将为复配抗老化剂对淀粉基食品中的抗老化及品质改良提供重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

低筋小麦粉(青岛星华粮油食品有限公司); 玉米油(广州市金晨油脂有限公司); 糖霜、黄油、无铝泡打粉(上海枫未实业有限公司); 纯牛奶(内蒙古伊利实业集团股份有限公司); 柠檬汁(意大利 Eurofood S.r.l 公司); 黄原胶(新疆梅花氨基酸有限责任公司); 单双甘油脂肪酸酯[江苏佳力士添加剂(海安)有限公司]; 磷脂(河南四维生物科技有限公司); 丙二醇脂肪酸酯(河南奥尼斯特食品有限公司); 蔗糖脂肪酸酯(柳州爱格富食品科技股份有限公司); 菱友™ LS03 复配糕点乳化剂(日本三菱化学公司)。

1.2 仪器与设备

KX-35WJ11 型烤箱(杭州九阳生活电器有限公司); TCBJ-0387 拜杰电子秤(精度 0.01 g, 湖州德清拜杰电器有限公司); EGK100D 电动打蛋器(合肥荣事达小家电有限公司); C21-Simple101 电磁炉(佛山美的生活电器制造有限公司); BCD-618WG 型冰箱(青岛海尔智家股份有限公司); TA.XA.PLUSC 型质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司); 6 寸蛋糕坯模具(山东展艺食品有限公司); MA35M-

000230V1 红外水分测定仪(德国 Sartorius 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 戚风蛋糕制作工艺

分离蛋清与蛋黄, 蛋清于 4 ℃冷藏 10 min 后, 用打蛋器搅打蛋清至干性发泡状态, 在搅打蛋清过程中分 3 次加入糖霜并搅打均匀, 直至形成稳定的蛋白霜。将玉米油与牛奶混合均匀, 搅拌混匀, 然后以过筛的方式逐步加入低筋小麦粉、泡打粉和山梨酸钾, 用硅胶铲轻轻搅拌混合物, 直至混匀成面糊, 随后加入蛋黄, 以“Z”字型轻轻搅拌至均匀, 形成面糊。将蛋白霜分 3 次加入液态混合物中, 用翻拌的方式轻轻搅拌, 直至蛋白霜与面糊完全混匀, 得到蛋糕糊。

将蛋糕糊倒入 6 寸模具中, 每个模具准确称取 250 g 蛋糕糊。将装有蛋糕糊的模具在桌上轻摔几下, 以去除蛋糕糊内较大的气泡。将烤箱调节至上下火 140 ℃, 预热 10 min 后, 将模具放入烤箱中, 烘焙 40 min。烘焙结束后, 将戚风蛋糕取出, 倒扣冷却至室温后脱模。

在单因素试验和正交试验中, 食品添加剂按照设定的浓度梯度进行添加。添加步骤为在将玉米油与牛奶混合均匀后加入食品添加剂, 并按照上述流程继续操作。具体配料表如表 1。

表 1 戚风蛋糕配料表
Table 1 Ingredients list of chiffon cake

项目	用量
鸡蛋/个	6
玉米油/g	58.00
牛奶/g	70.00
低筋小麦面粉/g	93.00
糖粉/g	70.00
柠檬汁/mL	0.60
无铝泡打粉/g	4.60
山梨酸钾/g	0.50

1.3.2 乳化剂单因素试验

参考 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中规定的各乳化剂最大添加量, 以低筋小麦面粉的质量为标准, 根据表 2 将乳化剂加入到玉米油中分散均匀。

表 2 乳化剂单因素试验设计表(g/kg)
Table 2 Table of one-factor experimental design for emulsifiers (g/kg)

乳化剂	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5
黄原胶	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
单双甘油脂肪酸酯	4.00	8.00	12.00	16.00	20.00
磷脂	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
丙二醇脂肪酸酯	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
蔗糖脂肪酸酯	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00

1.3.3 正交试验

根据单因素试验结果, 设计 $L_9(3^4)$ 正交试验(表 3), 确定复配抗老化剂的最佳比例, 并进行试验加以验证。将选出的乳化剂按最佳比例充分混匀, 获得复配抗老化剂, 同时以菱友™ LS03 复配糕点乳化剂作为市售抗老化剂。根据 1.3.1 的制备工艺将两种乳化剂分别加入到戚风蛋糕中。

表 3 正交试验设计表(g/kg)
Table 3 Orthogonal experimental design table (g/kg)

编号	黄原胶	单双甘油脂肪酸酯	磷脂	丙二醇脂肪酸酯
1	0.75	6.00	1.50	1.25
2	1.00	8.00	2.00	1.50
3	1.25	10.00	2.50	1.75

1.3.4 水分含量

将蛋糕撕成小块并分散, 准确称量 1.00 g 于仪器托盘中, 将快速水分测定仪温度设定为 105 ℃, 进行自动测定得到水分含量测试结果, 重复试验 3 次, 取平均值^[15]。

1.3.5 质构性质

参考唐梦琦^[16]的测试方法。取蛋糕芯, 切成直径为 6 cm 的圆柱体。质构仪探头选择 P36/R, 测试模式选择全质构模式(texture profile analysis, TPA), 测试参数设定如下: 测试前速度为 2.00 mm/s, 测试中速度为 2.00 mm/s, 测试后速度为 2.00 mm/s, 压缩程度设置为 50%, 触发力为 15 g, 重复测试 15 次, 以硬度、回复性为指标。将蛋糕置于 4 ℃加速老化, 并于第 0、3、7 d 时取出样品进行上述质构测试。

1.4 数据分析

试验数据采用均值±标准偏差的方式进行表示。数据处理采用 Excel 2019 进行数据筛选, 利用 SPSS 27 进行标准偏差计算和显著性误差分析, 使用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

戚风蛋糕的老化主要表现为其质构和物理性质的变化, 具体表现为其硬度的增加, 回复性的降低以及水分含量的变化。基于此, 本研究将以硬度、回复性和水分含量作为戚风蛋糕老化程度的评价指标^[17]。所有的单因素试验戚风蛋糕样品实物如图 1 所示。

2.1 单因素试验结果

2.1.1 黄原胶对戚风蛋糕的影响

如图 2 所示, 添加黄原胶的戚风蛋糕初始硬度、回复性均优于未添加黄原胶的戚风蛋糕, 黄原胶有效改善了戚风蛋糕的品质。黄原胶添加量为 3.00 g/kg 时初始硬度最低(603.99 g), 添加量为 2.50 g/kg 时回复性最高(51.11%)。除黄原胶添加量为 1.50 g/kg 外, 其余的戚风蛋糕储存 7 d 时



图 1 戚风蛋糕样品

Fig.1 Samples of chiffon cake

硬度显著低于空白戚风蛋糕。在 1.00~3.00 g/kg 添加量范围内, 戚风蛋糕的水分含量整体上随黄原胶添加量的增加而降低。黄原胶是一种亲水胶体, 容易与水分子结合, 从而导致戚风蛋糕水分含量降低。因此黄原胶的添加量选择 1.00 g/kg 作为正交试验中间水平添加量。

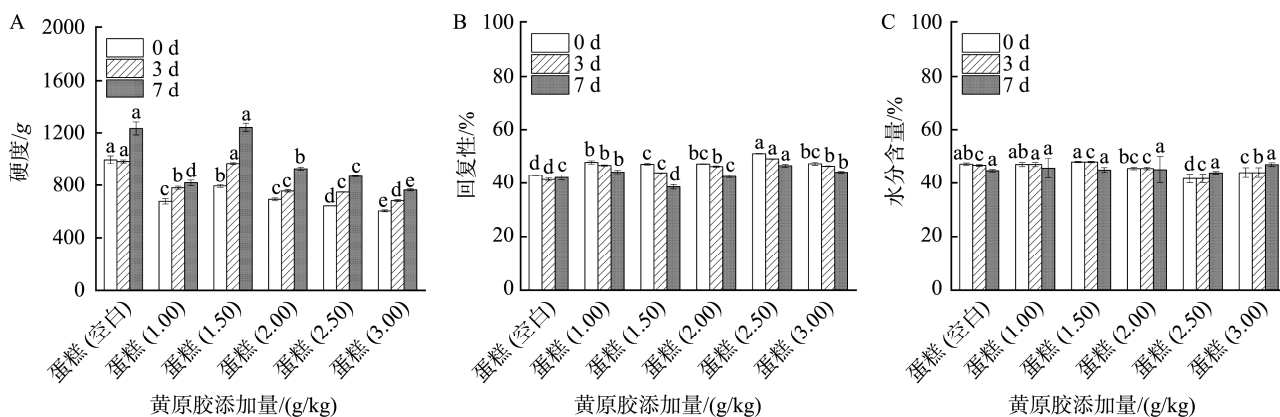
2.1.2 单双甘油脂肪酸酯对戚风蛋糕的影响

如图 3 所示, 在添加量 4.00~20.00 g/kg 范围内, 单双

甘油脂肪酸酯对戚风蛋糕硬度的影响未表现出明显的规律性。添加量为 4.00、8.00、20.00 g/kg 时, 戚风蛋糕硬度显著低于空白组($P<0.05$)。添加量为 8.00 g/kg 时, 戚风蛋糕的初始硬度与储存 7 d 时硬度最小(671.54 g 和 715.30 g), 回复性最大(48.48%)。此外, 单双甘油脂肪酸酯的加入导致戚风蛋糕的水分降低, 但不同添加量之间水分含量没有明显差异。因此单双甘油脂肪酸酯添加量选择 8.00 g/kg 作为正交试验中间水平添加量。

2.1.3 磷脂对戚风蛋糕的影响

如图 4 所示。当磷脂添加量小于等于 4.00 g/kg 时, 磷脂能改善戚风蛋糕的品质和抗老化性, 硬度和回复性优于未添加磷脂的空白组。添加量为 2.00 g/kg 时, 戚风蛋糕的起始硬度最小(554.59 g), 经过 4 °C 7 d 老化后戚风蛋糕的硬度仍是最低。而磷脂添加量为 5.00 g/kg 时, 戚风蛋糕的品质明显下降, 硬度和硬度变化则大于空白组, 回复性也小于空白组。与单双甘油脂肪酸酯类似, 磷脂的加入整体上使戚风蛋糕的水分含量下降, 在添加量 1.00~5.00 g/kg 范围内, 这种下降不受磷脂添加量的影响。因此磷脂添加量选择 2.00 g/kg 作为正交试验中间水平添加量。



注: 图中不同字母表示相同储藏天数下不同乳化剂添加量具有显著性差异($P<0.05$), 下同。

图 2 黄原胶对戚风蛋糕硬度(A)、回复性(B)与水分含量(C)的影响

Fig.2 Effects of xanthan gum on hardness (A), recoverability (B) and moisture content (C) of chiffon cakes

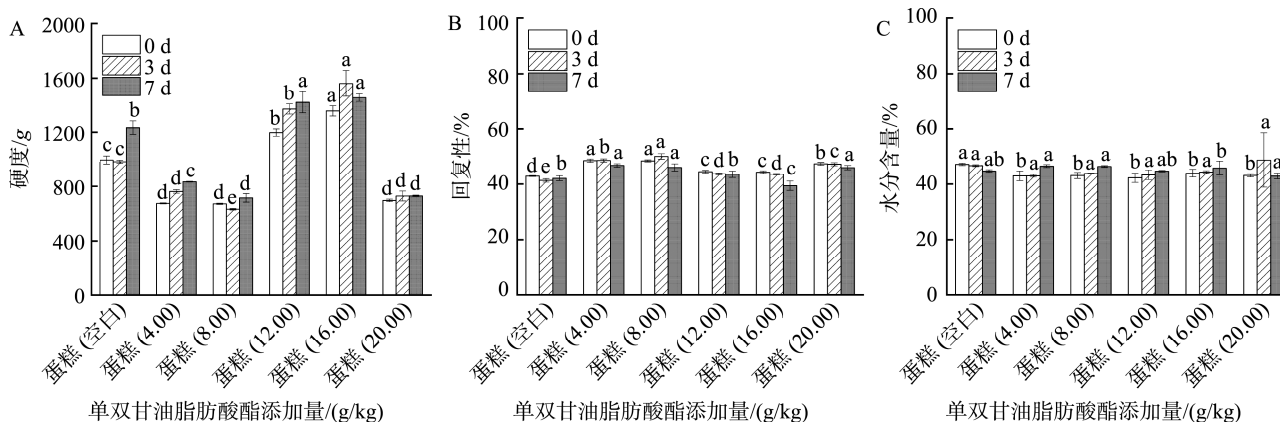


图 3 单双甘油脂肪酸酯对戚风蛋糕硬度(A)、回复性(B)与水分含量(C)的影响

Fig.3 Effects of mono- and diglyceride fatty acid esters on hardness (A), recoverability (B) and moisture content (C) of chiffon cakes

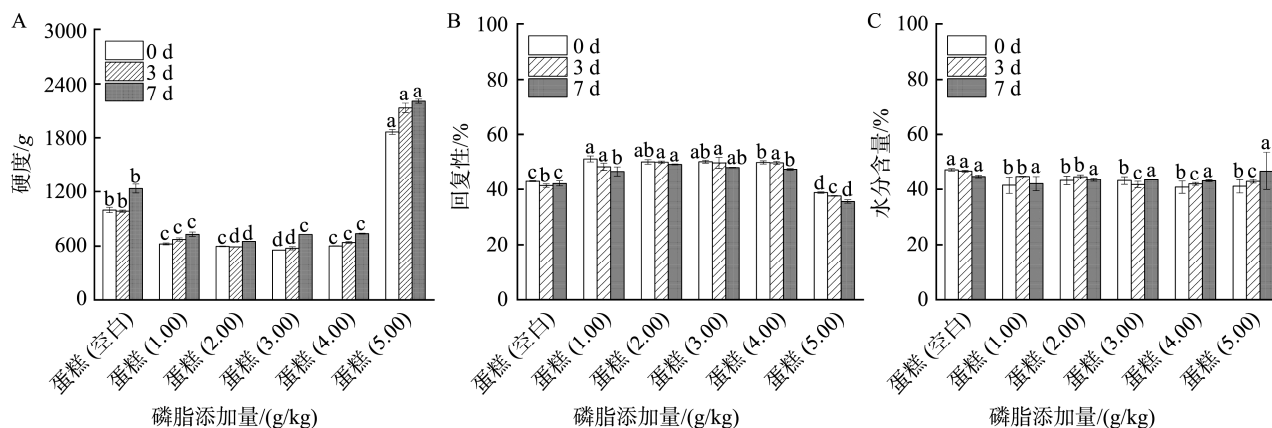


图 4 磷脂对戚风蛋糕硬度(A)、回复性(B)与水分含量(C)的影响

Fig.4 Effects of phospholipids on hardness (A), recoverability (B) and moisture content (C) of chiffon cakes

2.1.4 丙二醇脂肪酸酯对戚风蛋糕的影响

如图 5 所示, 丙二醇脂肪酸酯在 1.00~2.00 g/kg 时对戚风蛋糕的老化具有较好的改善效果。添加量为 1.00 g/kg 时, 戚风蛋糕的初始硬度最小(489.47 g), 回复性最大(50.72%), 但水分含量最低(40.22%)。添加量为 1.50 g/kg 时, 不仅能够改善戚风蛋糕的品质, 并且相较于 1.00 g/kg 具有更高的水分含量(45.75%), 且在储存过程中水分含量

更稳定。当添加量增加到 2.00 g/kg 时, 戚风蛋糕的初始硬度、回复性与水分含量与 1.50 g/kg 差异较小。故选择添加量 1.50 g/kg 作为后续正交试验的中间水平。

2.1.5 蔗糖脂肪酸酯对戚风蛋糕的影响

如图 6 所示, 添加蔗糖脂肪酸酯虽对戚风蛋糕的抗老化性有一定的提升, 与初始硬度相比, 添加量为 4.00 g/kg 和 5.00 g/kg 时戚风蛋糕储存 7 d 的硬度分别增加了

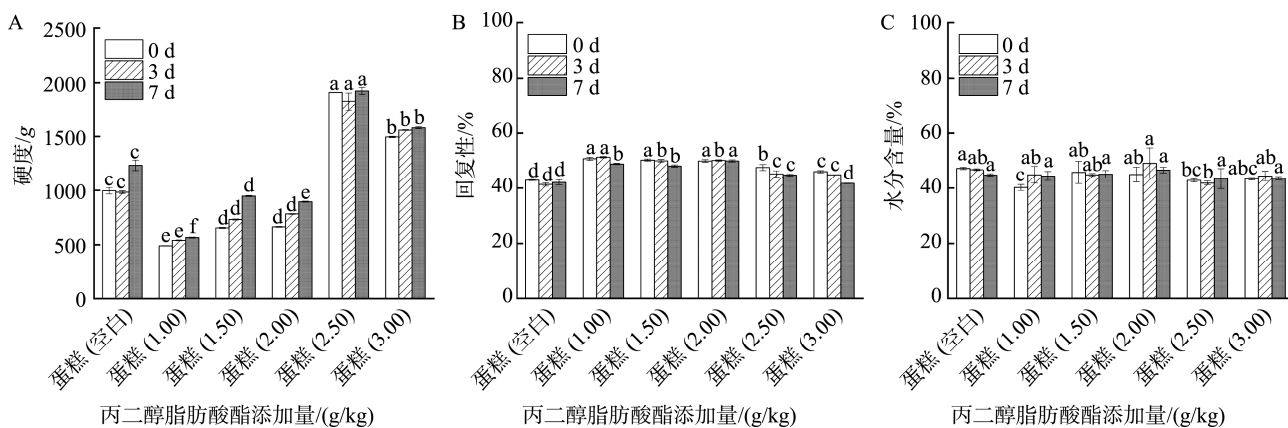


图 5 丙二醇脂肪酸酯对戚风蛋糕硬度(A)、回复性(B)与水分含量(C)的影响

Fig.5 Effects of propylene glycol fatty acid esters on hardness (A), recoverability (B) and moisture content (C) of chiffon cakes

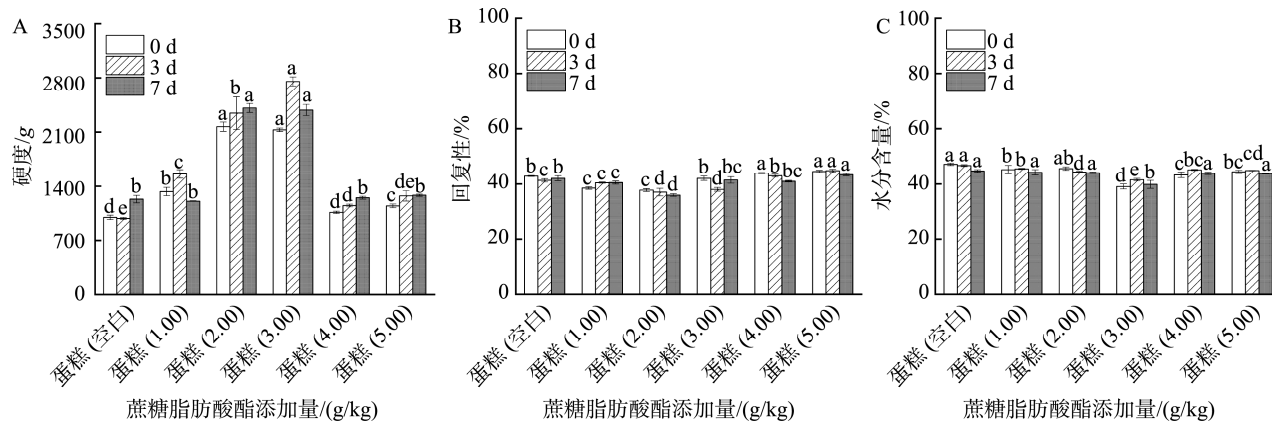


图 6 蔗糖脂肪酸酯对戚风蛋糕硬度(A)、回复性(B)与水分含量(C)的影响

Fig.6 Effects of fatty acid esters of sucrose on hardness (A), recoverability (B) and moisture content (C) of chiffon cakes

189.70 g 和 139.11 g, 小于空白组(237.53 g), 但戚风蛋糕的初始硬度大于空白组。经过 7 d 的老化测试后, 除了添加量为 3.00 g/kg 的戚风蛋糕水分含量下降较为明显, 其余的戚风蛋糕水分含量保持相对较好, 但由于添加了蔗糖脂肪酸酯的戚风蛋糕的整体硬度偏高, 反而降低了戚风蛋糕的品质, 因此在后续试验中将不选择蔗糖脂肪酸酯作为正交试验对象。

2.2 正交试验结果

综合单因素试验结果, 选择黄原胶、单双甘油脂肪酸酯、磷脂、丙二醇脂肪酸酯制备复配抗老化剂, 设计 $L9(3^4)$ 正交试验(表 3), 以戚风蛋糕 4 °C 储存 7 d 时硬度对比初始硬度的变化量为评价指标, 以获得最佳的复配比例。

正交试验结果如表 4 所示。根据方差分析(表 5)可知 4 种乳化剂对戚风蛋糕的硬度变化均有显著影响。比较 k 值后判断复配抗老化剂的优组合为 $A_2B_2C_2D_2$, 其质量比为黄原胶:单双甘油脂肪酸酯:磷脂:丙二醇脂肪酸酯=2:16:4:3。该复配比例下, 戚风蛋糕储存 7 d 后的硬度变化量为 324.64 g, 大于正交试验中多组试验的结果, 而正交试验

组 2 的硬度变化量最小, 因此可以认为试验组 2 的复配比例更优, 即优组合为 $A_1B_2C_2D_2$, 其质量比为黄原胶:单双甘油脂肪酸酯:磷脂:丙二醇脂肪酸酯=3:32:8:6。

2.3 两种抗老化剂对戚风蛋糕的影响

如图 7 所示。添加市售抗老化剂与复配抗老化剂的戚风蛋糕初始硬度分别为 932.78 g 和 510.43 g, 回复性分别为 38.98%和 43.67%。在 4 °C 储存 7 d 后, 添加市售抗老化剂的戚风蛋糕硬度为 1082.38 g, 增大了 149.60 g, 添加复配抗老化剂的戚风蛋糕硬度为 573.22 g, 增大了 62.79 g。与空白组初始硬度(996.28 g), 回复性(42.92%)以及硬度变化量(237.53 g)相比, 添加市售抗老化剂的戚风蛋糕硬度和硬度变化量下降了 6.37%和 37.09%, 回复性略有下降; 添加复配抗老化剂的戚风蛋糕硬度和硬度变化量下降了 48.77%和 73.56%, 回复性提高了 1.75%。结果表明复配抗老化剂对戚风蛋糕具有良好的抗老化效果, 抗老化效果优于市售抗老化剂。

此外, 添加市售抗老化剂的戚风蛋糕与添加复配抗老化剂的戚风蛋糕, 水分含量均低于空白组。

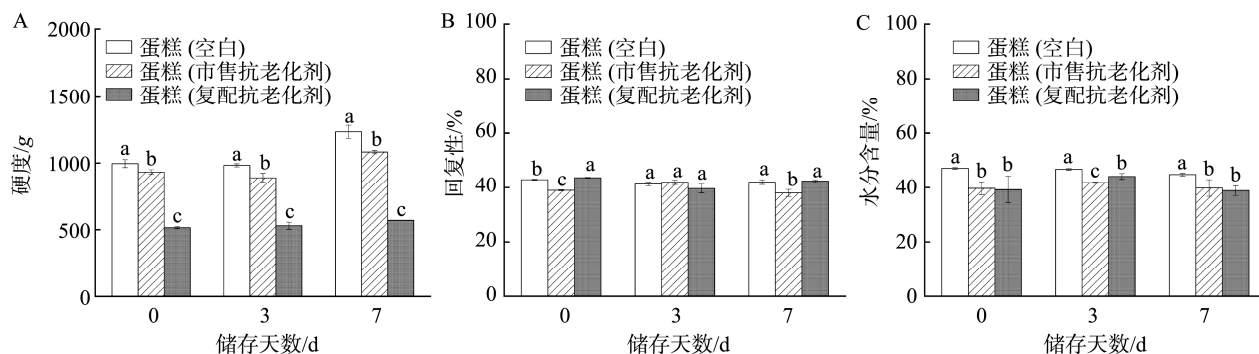
表 4 正交试验结果
Table 4 Results of orthogonal experiments

编号	A: 黄原胶	B: 单双甘油脂肪酸酯	C: 磷脂	D: 丙二醇脂肪酸酯	硬度变化量/g
1	1	1	1	1	456.90
2	1	2	2	2	54.36
3	1	3	3	3	186.78
4	2	1	2	3	70.94
5	2	2	3	1	176.14
6	2	3	1	2	211.20
7	3	1	3	2	190.04
8	3	2	1	3	238.38
9	3	3	2	1	269.68
K1	698.05	717.88	906.48	902.72	
K2	458.27	468.88	394.97	455.60	
K3	698.10	667.66	552.97	496.10	
k1	232.68	239.29	302.16	300.91	
k2	152.76	156.29	131.66	151.87	
k3	232.70	222.55	184.32	165.37	
极差 R	79.94	83.00	170.50	149.04	
主次顺序	C>D>B>A				
优组合	$A_2B_2C_2D_2$				

表 5 正交结果方差分析
Table 5 Orthogonal results analysis of variance

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F	P	显著性
A: 黄原胶	38337.04	2	19168.52	210.53	0.000	*
B: 单双甘油脂肪酸酯	34679.25	2	17339.62	190.45	0.000	*
C: 磷脂	137188.58	2	68594.29	753.39	0.000	*
D: 丙二醇脂肪酸酯	122299.63	2	61149.82	671.63	0.000	*
误差	1638.86	18	91.05			
总和	334143.35	26				

注: *表示具有显著影响($P<0.05$)。



注：市售抗老化剂代指菱友™ LS03 复配糕点乳化剂。

图 7 两种抗老化剂对戚风蛋糕硬度(A)、回弹性(B)与水分含量(C)的影响

Fig.7 Effects of 2 kinds of anti-aging agents on hardness (A), resilience (B) and moisture content (C) of chiffon cakes

3 讨论

基于乳化剂的两亲性特性和亲水胶体优异的持水性，这两类添加剂能够有效结合更多的水分子，抑制水分在戚风蛋糕中的迁移，从而显著延缓戚风蛋糕老化。本次讨论主要聚焦于乳化剂和亲水胶体与戚风蛋糕中不同食品组分之间的相互作用。通过研究分析乳化剂和亲水胶体在戚风蛋糕中的作用方式，进一步解释乳化剂和亲水胶体对戚风蛋糕品质的影响。

在戚风蛋糕烘焙和储存过程中，小麦面粉中的淀粉经历了糊化、短时老化和长时老化 3 个阶段^[18]。烘焙时，淀粉发生糊化，内部结构转变为无序结构；在储藏时，淀粉进入老化阶段。短时老化在停止加热后的数小时至十几小时内，直链淀粉形成螺旋结构，聚集成结晶，长时老化则是形成结晶的直链淀粉诱导支链淀粉形成双螺旋结构并重新排列形成结晶^[19-20]。淀粉老化是个动态变化过程，在该过程中淀粉结晶不断增多，该现象会使得戚风蛋糕品质劣变。

在短时老化过程中，淀粉向有序结构状态进行转变，并形成螺旋结构，这种螺旋结构的外侧为亲水基团，内侧为疏水基团^[21]。乳化剂会与淀粉螺旋中的疏水基团发生相互作用形成淀粉-乳化剂 V 型复合物，阻碍淀粉进一步螺旋结晶，从而达到延缓淀粉老化的目的^[22]。黄原胶具有多羟基结构的亲水胶体，黄原胶中的羟基可以与小麦面粉中的羟基、氨基发生相互作用，阻碍其中的淀粉形成螺旋结构^[23-25]。此外，黄原胶具有固定水分子的作用，阻碍水分迁移丧失，减缓淀粉老化进程^[26]。由黄原胶单因素试验结果可知，添加了黄原胶的戚风蛋糕在经过 4 °C 7 d 加速老化后，其水分含量略高于空白组，其中黄原胶添加量为 3.00 g/kg 的戚风蛋糕具有更好的保水性，但各组别之间不具备显著性差异，这可能与测试时间相对较短有关。

面糊混合过程中，面粉中的面筋蛋白发生相互租用形成二硫键，并形成立体的、具有黏弹性的蛋白质网络结构，这种网络结构可以稳定气泡，在烘焙过程中减少网络结构被破坏^[27]。乳化剂能够通过对面筋蛋白的非共价相互

作用，增强面筋蛋白的网络结构稳定性，使得气泡在烘焙过程中更加稳定。稳定的蛋白质网络结构不仅羟化了淀粉颗粒的水合作用，还促进水分以结合水的形式存在于戚风蛋糕中，从而减少了自由水的比例。尽管这可能导致戚风蛋糕的水分含量测定值降低，但有助于抑制水分流失，延缓蛋白质网络结构的劣变。黄原胶则通过增强戚风蛋糕的持水能力减少水分流失，延缓蛋白质网络结构的变化^[28]。

在搅打蛋清形成蛋白霜的过程中，蛋白质分子展开，在气泡表面发生重排，构建稳定的气液界面，由于脂质与蛋白质表面张力不同，在蛋白霜与面糊混合过程中易导致气泡破裂^[12]。而乳化剂具有两亲性，在增强蛋白质网络结构稳定性的同时，可以取代蛋白质和脂质在气泡表面形成稳定界面。蔗糖脂肪酸酯能够取代气泡表面的蛋白质，形成一层单分子界面层，降低气液界面的表面张力，有助于改善面糊的起泡性^[29]。单双甘油脂肪酸酯与丙二醇脂肪酸酯属于 α 结晶乳化剂，能够在气液界面形成 α -凝胶，使气泡更加稳定，同时诱导脂肪形成 α 结晶，在界面处发生定向排列，增强脂肪的稳定性^[30-31]。脂肪结晶之间还能相互连接形成脂肪网络，使戚风蛋糕中的脂肪分布更加均匀，提高持气性能，蛋糕结构更稳定，延缓戚风蛋糕老化^[32]。然而单双甘油脂肪酸酯浓度的增加，会促使脂肪结晶过度生长和聚集，可能导致界面膜破裂，不利于气泡稳定^[33]。

4 结论

本研究通过单因素试验与正交优化试验研究了黄原胶、单双脂肪酸甘油酯、磷脂、丙二醇脂肪酸酯和蔗糖脂肪酸酯 5 种添加剂对戚风蛋糕品质的影响。复配抗老化剂的最优配比为黄原胶:单双甘油脂肪酸酯:磷脂:丙二醇脂肪酸酯=3:32:8:6。与空白戚风蛋糕相比，添加复配抗老化剂后的戚风蛋糕硬度降低 48.77%，回弹性提高 1.75%，硬度变化量相比降低了 73.56%。以上结果表明该复配抗老化剂具有良好的抑制淀粉老化和品质改良效果，为复配抗老化剂在淀粉基食品中的抗老化及品质改良提供重要指导。

参考文献

- [1] ZENG XX, WANG MH, CHEN L, *et al.* Impact of using whole chestnut flour as a substitute for cake flour on digestion, functional and storage properties of chiffon cake: A potential application study [J]. *Food Chem*, 2024, 432: 137016.
- [2] ZHANG LY, ZHAO J, LI F, *et al.* Insight to starch retrogradation through fine structure models: A review [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 273(1): 132765.
- [3] MANZOOR S, FAYAZ U, DAR AH, *et al.* Sustainable development goals through reducing food loss and food waste: A comprehensive review [J]. *Future Foods*, 2024, 9: 100362.
- [4] NGWASIRI PN, AMBINDEI WA, ADANMENGWI VA, *et al.* A review paper on agro-food waste and food by-product valorization into value added products for application in the food industry: opportunities and challenges for cameroon bioeconomy [J]. *Asian J Biotechnol Bioresour Technol*, 2022, 8(3): 32–61.
- [5] DIZLEK H, AWIKA JM. Determination of basic criteria that influence the functionality of gluten protein fractions and gluten complex on roll bread characteristics [J]. *Food Chem*, 2023, 404(PB): 134648.
- [6] QIAN XJ, SUN BH, MAS, *et al.* The role of lipids in determining the gas cell structure of gluten-free steamed oat cake [J]. *Food Hydrocoll*, 2024, 148(PA): 109460.
- [7] 李小芳. 乳化剂在烘焙食品中的应用研究[J]. *现代食品*, 2024, 30(5): 74–77.
LI XF. Research on the application of emulsifiers in baked goods [J]. *Mod Food*, 2024, 148(PA): 74–77.
- [8] 胥奇. 面包、蛋糕抗老化剂的研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
XU Q. Study on anti-aging agent of bread and cake [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [9] 赵甜甜, 张国治. 面包老化的影响因素及其控制途径[J]. *粮食加工*, 2021, 46(3): 24–28.
ZHAO TT, ZHANG GZ. The influencing factors of bread aging and its control methods [J]. *Grain Proc*, 2021, 46(3): 24–28.
- [10] 张雨, 张康逸, 张国治. 淀粉老化过程机理及淀粉抗老化剂应用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(13): 316–321.
ZHANG Y, ZHANG KY, ZHANG GZ. Research progress on starch retrogradation process mechanism and application of starch anti-retrogradation agent [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(13): 316–321.
- [11] 张玉荣, 高佳敏, 周显青, 等. 改良剂延缓糯米淀粉制品老化特性的研究[J]. *粮油食品科技*, 2015, 23(5): 1–6.
ZHANG YR, GAO JM, ZHOU XQ, *et al.* Study on aging retarding properties of glutinous rice starch products by improves [J]. *Sci Technol Cere*, 2015, 23(5): 1–6.
- [12] ZAYAS JF. Functionality of proteins in food [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [13] 刘姣姣, 郭金英. 亲水胶体对冷冻面筋蛋白性质的影响及机理研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(12): 6–9.
LIU JJ, GUO JY. Research progress on the influence of hydrophilic colloids on the properties of frozen gluten protein and its mechanism [J]. *Cere Oils*, 2023, 36(12): 6–9.
- [14] 楚雯文. 脂肪酸对淀粉与面筋蛋白体系影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
CHU WW. Study on the effects of fatty acids on starch and gluten proteins [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology.
- [15] 高婧怡, 顺利, 林晓岚. 海绵蛋糕的水分含量对感官品质影响研究[J]. *农产品加工*, 2019(18): 18–21.
GAO JY, GU L, LIN XL. Study on influence of moisture content of sponge cake on sensory quality [J]. *Farm Prod Proc*, 2019(18): 18–21.
- [16] 唐梦琦. 三种功能糖对戚风蛋糕的品质特性及抗老化机制的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021.
TANG MQ. Effects of three functional sugars on the quality characteristics and anti-aging mechanism of chiffon cake [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021.
- [17] 杨春华, 齐文, 贺殷媛, 等. 淀粉老化检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(19): 155–162.
YANG CH, QI W, HE YY, *et al.* Research progress in starch retrogradation detection technology [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(19): 155–162.
- [18] QING C, ZHENG BD, YI Z, *et al.* A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 186: 163–173.
- [19] ZHAO KF, JIA ZY, HOU LL, *et al.* Study on physicochemical properties and anti-aging mechanism of wheat starch by anionic polysaccharides [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 253(P8): 127431.
- [20] RIBOTTA PD, LE-BAIL A. Thermo-physical assessment of bread during staling [J]. *LWT*, 2007, 40(5): 879–884.
- [21] SINGH SV, CHANDRA SD, KSHITIZ K, *et al.* Starch: Advances in modifications, technologies and applications [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2023.
- [22] 孙志伟. 食品乳化剂的作用机理及其在专用小麦粉中的应用[J]. *现代面粉工业*, 2023, 37(5): 14–19.
SUN ZW. Action mechanism of food emulsifier and its application in special wheat flour [J]. *Mod Flour Milling Ind*, 2023, 37(5): 14–19.
- [23] MA MJ, GU ZB, CHENG L, *et al.* Effect of hydrocolloids on starch digestion: A review [J]. *Food Chem*, 2024, 444: 138636.
- [24] ZHANG C, ZHANG LZ, WAN KX, *et al.* Effects of enhanced starch-xanthan gum synergism on their physicochemical properties, functionalities, structural characteristics, and digestibility [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 241: 124646.
- [25] YAN XD, MCCLEMENTS DJ, LUO SJ, *et al.* Recent advances in the impact of gelatinization degree on starch: Structure, properties and applications [J]. *Carbohydr Polym*, 2024, 340: 122273.
- [26] DONMEZ D, PINHO L, PATEL B, *et al.* Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: starch gelatinization and retrogradation [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2021, 39: 103–109.
- [27] DUFOUR M, CHAUNIER L, LOURDIN D, *et al.* Unravelling the relationships between wheat dough extensional properties, gluten network and water distribution [J]. *Food Hydrocoll*, 2024, 146(PA): 109214.
- [28] 杨铭铎, 孙兆远, 侯会斌, 等. 几种乳化剂对小麦粉品质特性影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(11): 17–21.
YANG MD, SUN ZY, HOU HR, *et al.* Study on the effects of several emulsifiers on the quality characteristics of wheat flour [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2009, 24(11): 17–21.
- [29] WANG FC, MARANGONI AG. Advances in the application of food emulsifier α -gel phases: Saturated monoglycerides, polyglycerol fatty acid esters, and their derivatives [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2016, 483: 394–403.
- [30] SINGH S, GAUR S. Edible seeds pioneered in preparing modern age bakery food products: Recent challenges and applications [J]. *Food Chem Adv*, 2024, 4: 100684.
- [31] 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 JB. Study on baking characteristics and quality improvement of low-fat cake containing propylene glycol esters [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [32] JIANG J, JING WQ, XIONG YL, *et al.* Interfacial competitive adsorption of different amphiphaticity emulsifiers and milk protein affect fat crystallization, physical properties, and morphology of frozen aerated emulsion [J]. *Food Hydrocoll*, 2019, 87: 670–678.
- [33] CHENG JJ, DUDU OE, LI XD, *et al.* Effect of emulsifier-fat interactions and interfacial competitive adsorption of emulsifiers with proteins on fat crystallization and stability of whipped-frozen emulsions [J]. *Food Hydrocoll*, 2020, 101: 105491.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介

袁 辉, 高级工程师, 主要研究方向为饼干与蛋糕等制品工艺创新应用研究。
E-mail: 3773299859@qq.com



陈 旭, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能碳水化合物及淀粉功能化修饰与调控、食物组分互作与品质调控和降低糖指数食品研发。
E-mail: chenxu@dgut.edu.cn



朱 杰, 博士, 教授, 主要研究方向为食品组分相互作用与品质调控和碳水化合物功能材料。
E-mail: zhujiie@dgut.edu.cn