

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.81196

麦麸水提物稳定高内相乳液的制备及其在蛋糕中的应用

张 晶^{1,2} 王立峰^{1,2} 熊文飞^{1,2} 叶鑫伟^{1,2}

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏 南京 210023)

摘要: [目的] 探究以麦麸水提物稳定的高内相乳液(HIPEs)作为黄油替代物在蛋糕中的应用效果。[方法] 采用麦麸水提物稳定的高内相乳液按不同比例替代黄油制备蛋糕, 并以纯大豆油组作为对照, 系统测定蛋糕糊的黏度、相对密度及微观结构, 并对产品的质构特性、水分分布、色泽、X射线衍射(XRD)图谱和风味特征进行综合分析。[结果] 随着高内相乳液替代比例的增加, 蛋糕 a^* 值升高、 b^* 值降低, 体积减小但气孔更均匀; 硬度由2.72 N增至4.54 N, 水分含量从11.92%升至17.53%, 弱结合水比例上升; XRD显示淀粉重结晶受抑; 电子鼻/电子舌表明风味无显著变化。[结论] 麦麸水提物稳定的高内相乳液可有效替代黄油, 提升蛋糕的保水性、延缓老化, 兼具营养与功能优势, 具良好烘焙应用前景。

关键词: 麦麸水提物; 高内相乳液; 蛋糕; 风味特征

Application of stable high internal phase emulsions based on wheat bran water extract in cakes

ZHANG Jing^{1,2} WANG Lifeng^{1,2} XIONG Wenfei^{1,2} YE Xinwei^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: [Objective] To investigate the application of high internal phase emulsions (HIPEs) stabilized by wheat bran water extract as a butter substitute in cakes. [Methods] Cakes were prepared by substituting butter with HIPEs stabilized by wheat bran water extract at different ratios, with a pure soybean oil group used as the control. The viscosity, relative density, and microstructure of the cake batter were systematically measured, and the textural properties, moisture distribution, color, X-ray diffraction (XRD) patterns, and flavor profiles of the cakes were comprehensively analyzed. [Results] With increasing substitution ratios of HIPEs, the a^* value of the cakes increased while the b^* value decreased. The cake volume decreased, but the pore structure became more uniform. Hardness increased from 2.72 N to 4.54 N, and moisture content increased from 11.92% to 17.53%, accompanied by an increase in the proportion of weakly bound water. XRD analysis indicated that starch recrystallization was inhibited. Electronic nose and electronic tongue analyses revealed no significant change in flavor profile. [Conclusion] HIPEs stabilized by wheat bran water extract can effectively replace butter, improving the water-holding capacity of cakes and delaying staling, while providing both nutritional and functional advantages, showing good prospects for baking applications.

Keywords: wheat bran water extract; high internal phase emulsion; cake; flavor characteristics

基金项目:“十四五”国家重点研发计划(编号:2021YFD2100904);国家自然科学基金区域联合基金(编号:U23A20256);江苏省农业科技自主创新资金项目(编号:CX(23)1017);江苏省自然科学基金(编号:BK20230437)

通信作者:王立峰(1977—),男,南京财经大学教授,博士。E-mail:wanglifeng_8@163.com

收稿日期:2025-12-26 改回日期:2026-02-04

引用格式:张晶,王立峰,熊文飞,等. 麦麸水提物稳定高内相乳液的制备及其在蛋糕中的应用[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 184-191.

Citation:ZHANG Jing, WANG Lifeng, XIONG Wenfei, et al. Application of stable high internal phase emulsions based on wheat bran water extract in cakes[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 184-191.

麦麸是小麦在面粉加工过程中的主要副产物,占比17%左右^[1]。麦麸具有丰富的营养价值,其内部富含多糖、蛋白质、酚类化合物等功能成分^[2],因此,对麦麸中整个水溶性组分进行分离利用是一种提高麦麸经济附加值的新思路。超声波提取技术是食品加工领域中一种常见的辅助提取技术,其主要作用原理为超声波的空化效应、热效应以及微束流效应^[3],即通过超声在溶液内部制造出气泡,气泡破碎后在局部释放出巨大能量,并产生瞬时高温和湍流,以此来破碎待提取物组织结构并促进溶质的流出。

高内相乳液(high internal phase emulsions, HIPEs)又称超浓缩型乳液或乳液凝胶,是一种特殊类型的乳液,其内部油相占比极高,通常达74%以上^[4]。此外,高内相乳液内部的液滴通过紧密堆积排列形成了致密的凝胶网状结构,使得高内相乳液兼具弹性与黏性^[5],并拥有半固态的结构特点和优越的稳定性。与传统乳液相类似,高内相乳液基于连续相和分散相间的极性关系,也可以分为水包油型乳液和油包水型乳液^[6]。高内相乳液因其独特的凝胶网状结构以及超高的稳定性,已被广泛用于塑性脂肪的替代物^[7]、生物活性物质的封装材料^[8]、多孔材料^[9]、生物可降解包装膜^[10]等。

塑性脂肪是一种由液体油和固体脂经过加工形成的混合油脂,其在室温下往往呈固体形态。塑性脂肪以其抗变形能力而闻名,在适当的范围内,它能够抵抗外力的变形,使其成为烘焙食品、巧克力制品等食品体系中不可或缺的成分。然而传统塑性脂肪往往以氢化植物油或者高熔点的动物奶油为原料,含有大量的反式脂肪酸。Syan等^[11]研究发现,长期摄入反式脂肪酸会增加心血管疾病、糖尿病和其他慢性疾病的风险。目前,随着消费者对食品绿色与健康属性的认知和要求不断提高,低脂肪食品的需求量逐年增加。然而,简单地降低食品中的脂肪含量会引起食品理化性质、生理特性和感官特性的变化。

Liu等^[12]利用马铃薯泥和纳米纤维素为原料,混合制备了低脂蛋黄酱,在马铃薯泥与纳米纤维素的最优混合比例(1:9)时制备的蛋黄酱与市售蛋黄酱有最为接近的色泽,且保持了良好的质构特性。Anggraeni等^[13]利用葡甘聚糖作为脂肪替代物制作面糊,在替代脂肪比例为30%时,面糊拥有更好的流变学性质,烘烤出的饼干品质较好。Rezaee等^[14]利用菜籽蛋白以及黄原胶稳定的Pickering乳液替代不同比例的动物油脂加入到肉制品中,随着乳液替代比例的提高,肉制品有了更低的蒸煮损失率,同时保持了良好的口感。

蛋糕是一类生活中常见的烘焙产品,黄油由于其独特的香气和起酥能力往往被用作蛋糕的制备原料。麦麸

水提物作为一种天然的复合物,其所稳定的高内相乳液具有良好的凝胶网状结构,且在不同的pH、离子强度、高温等条件下,基本仍能保持自身的凝胶态结构不被破坏。试验拟以麦麸水提物稳定的HIPEs为黄油替代物,考察其替代比例对蛋糕色泽、风味、质构及外观形态等品质特性的影响,旨在为天然来源乳化剂构建的高内相乳液在烘焙食品中的应用提供依据。

1 材料与设备

1.1 材料与试剂

麦麸:江苏三零面粉有限公司;

金龙鱼大豆油、低筋粉、鸡蛋、绵白糖、食盐、小苏打和黄油等:市售;

异丙醇、尼罗红:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

恒温磁力搅拌浴:HH型,郑州长城科工贸有限公司;

SOP电子天平:CP213型,赛多利斯科学仪器北京有限公司;

台式冷冻离心机:GL-21M型,长沙湘智仪器有限公司;

超声波细胞粉碎机:01D996型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

旋转流变仪:CR302型,奥地利安东帕集团;

质构仪:TAXI plus型,英国SMS公司;

核磁共振成像分析仪:NMI20-Analyst型,苏州纽迈电子科技有限公司;

激光共聚焦显微镜:LSM900型,德国蔡司公司;

高速剪切均质机:SCIENTZ-207A型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

电子鼻: α -FOX3000型,德国Bruker公司;

电子舌:ASTREE型,德国Bruker公司;

X射线衍射仪:DS-Advance型,德国Bruker公司。

1.3 试验方法

1.3.1 超声辅助麦麸水溶性组分的制备 将麦麸粉碎,过60目筛。采用索氏抽提装置对麦麸粉进行脱脂,风干后得到脱脂麦麸粉。按料液比1:5(g/mL)将脱脂麦麸粉与超纯水搅拌均匀,于冰水浴中进行超声处理:超声振幅为70%(总功率1200W),25kHz下超声10min,同时使用开3s/关5s的脉冲抑制样品升温,控制样品温度不超过30℃。

1.3.2 高内相乳液的制备 将麦麸水提物溶液装入20mL玻璃瓶中,加入大豆油($\phi=0.75$),10000r/min下均质处理60s,由此制得的高内相乳液为水包油(O/W)型。

1.3.3 蛋糕的制作 蛋糕配方见表1。将黄油于35℃水

表 1 蛋糕的配方

组别	糖	蛋液	低筋粉	泡打粉	食盐	黄油	乳液	大豆油
大豆油	37.5	30	40	1.5	0.5	0	0	40
0%乳液	37.5	30	40	1.5	0.5	40	0	0
25%乳液	37.5	30	40	1.5	0.5	30	10	0
50%乳液	37.5	30	40	1.5	0.5	20	20	0
75%乳液	37.5	30	40	1.5	0.5	10	30	0
100%乳液	37.5	30	40	1.5	0.5	0	40	0

浴 5 min;将不同替代比例的混合油脂放入烧杯中快速搅拌均匀,加入绵白糖,采用搅拌机 2 档快速搅匀 2 min;加入蛋液,采用 1 档慢速搅匀 1 min;将低筋粉、食盐、泡打粉依次过筛,称量后加入烧杯中,采用 1 档慢速搅匀约 2 min,直至干粉消失,面糊呈现均匀、无颗粒、具有光泽的糊状,即为搅打终点;所有试验组(包括黄油组、高内相乳液替代组及大豆油对照组)均采用相同的搅打程序(包括档位、时间和操作顺序)。将搅打好的蛋糕面糊装入纸质模具,每个模具 40 g。烤箱上火、下火温度均为 165 °C;烘烤时间 20 min。

1.3.4 蛋糕糊性质测定

(1) 黏度:利用旋转流变仪进行测定。静态剪切,扫描范围 0.1~100 s⁻¹,频率 1 Hz。

(2) 相对密度:按式(1)计算蛋糕糊的相对密度。

$$\rho = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \quad (1)$$

式中:

ρ ——面糊相对密度;

W_0 ——平底容器质量,g;

W_1 ——容器装满蒸馏水的总质量,g;

W_2 ——清空该容器并装满面糊的总质量,g。

(3) 微观结构:利用激光共聚焦显微镜对面糊中油脂的分布进行观察。以异丙醇为溶剂,配制尼罗红溶液(质量分数 0.1%)。将尼罗红溶液与油脂混匀,低速涡旋 30 s,按照 1.3.3 的方法制作成面糊样品。激发波长 488 nm,放大倍数 40,标尺 10 μ m。

1.3.5 蛋糕烘焙损失率和水分含量的测定

(1) 烘焙损失率:按式(2)计算蛋糕烘焙损失率。

$$L = \frac{W_1 - (W_2 - W_0)}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

L ——蛋糕烘焙损失率,%;

W_0 ——烘焙前模具质量,g;

W_1 ——面糊质量,g;

W_2 ——烘焙后蛋糕与模具的总质量,g。

(2) 水分含量:采用快速水分测定仪进行测定。

1.3.6 蛋糕水分分布测定 采用低场核磁共振分析仪(LF-NMR)测定蛋糕的水分分布。取新鲜蛋糕芯部,将样品切成 10 mm×8 mm×8 mm 的小块,放入直径为 15 mm 的核磁测量管中。选择 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)脉冲序列测量横向弛豫 T_2 值。采样点数 300 090,间隔时间 1 500 ms,回波时间 0.2 ms,累计次数 32。扫描后通过反演软件获得样品的 T_2 值。

1.3.7 蛋糕色泽测定 取新鲜制备的蛋糕,从蛋糕中部切出厚度适中的一片,用色差仪测定样品的色度值 L^* 、 a^* 和 b^* 。

1.3.8 蛋糕质构测定 取蛋糕芯部,将其切成 2 cm×2 cm×2 cm 方块,利用质构分析仪进行测定。采用 TPA 模式,P/36 R 圆柱型探头进行测定。测前速度 1 mm/s,测中速度 1 mm/s,测后速度 1 mm/s,应变 50%。

1.3.9 蛋糕 XRD 测定 将蛋糕样品进行冷冻干燥,研磨成粉末状备用。扫描角度为 3°~60°,扫描速度为 5(°)/min。

1.3.10 电子鼻分析 分别称取 5 g 蛋糕样品于空瓶中,35 °C 平衡 5 min,以 150 mL/min 速度进入电子鼻,与传感器接触 120 s。每个样品重复 3 次。

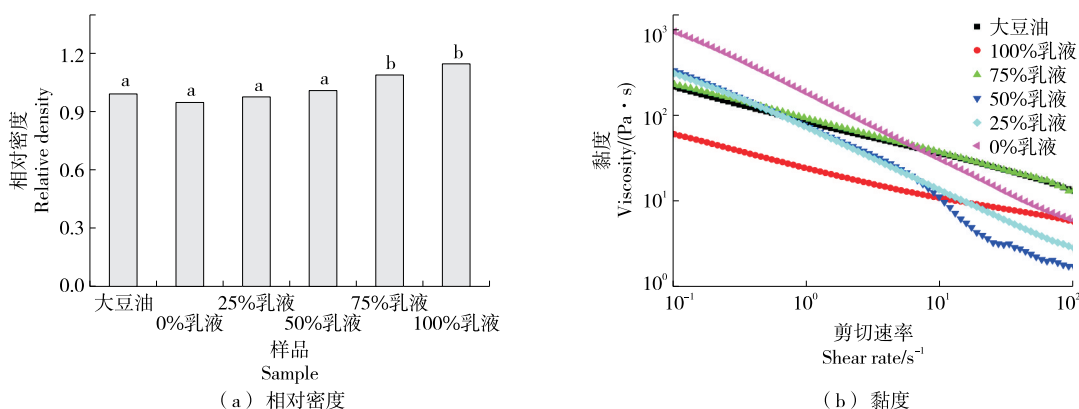
1.3.11 电子舌分析 分别称取 5.00 g 蛋糕样品,加入 50 mL 去离子中浸泡 60 min,过滤固体待用。将浸泡液冷却至室温后,置于 ASTREE 电子舌上进行测定。每个样本的数据采集时间为 120 s。用去离子水清洗样品 10 s,每隔 1 个样品用 1 杯去离子水清洗传感器,以消除交叉污染。每个样品重复 6 次。

1.3.12 统计分析 使用 SPSS 25.0 软件的单因素方差分析(ANOVA)进行最小显著差数法和邓肯分析,显著性 $P<0.05$ 。使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 蛋糕糊性质

一般来说,蛋糕糊的相对密度越小,烘焙出的蛋糕内部组织越蓬松,相应的口感也会更松软,反之,蛋糕糊的相对密度越大,烘烤出的蛋糕组织会更加紧实绵密。由图 1(a)可知,当乳液替代黄油比例为 75% 时,蛋糕糊的相



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

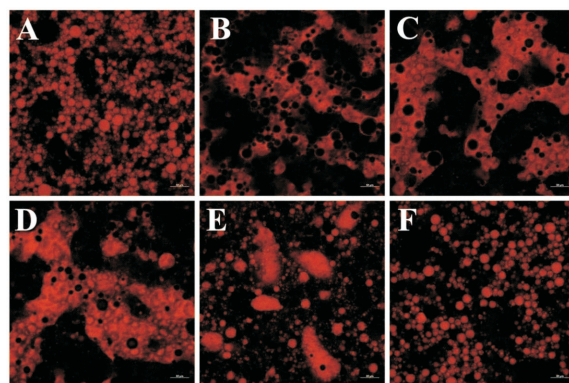
图1 面糊的相对密度和黏度

Figure 1 Relative density and viscosity of batter

对密度显著升高,一方面是因为乳液本身密度大于黄油,另一方面也可能是室温下黄油内部的固体脂肪晶体网络结构,使得蛋糕糊拥有更好的立体形态以及贮藏气体的能力,蛋糕糊内部气孔较多,从而降低了相对密度。当替代比例较低时,相对密度未发生明显变化,可能归因于乳液中麦麸水提物本身具有一定的起泡性以及乳液本身的凝胶态结构也使其具有一定的持气能力。而纯大豆油制作的蛋糕糊相对密度较低,可能是由于其本身密度低于黄油和高内相乳液。相对密度的差异可归因于不同油脂体系在相同机械作用下的实际充气效率与结构稳定性,可为评价各油脂的功能特性提供客观依据。

由图1(b)可知,剪切速率较低时,随着乳液替代比例的不不断提升,蛋糕糊黏度逐渐下降,可能是黄油在室温下会以固态的形式存在,具有更强的固体脂肪网络结构。此外,黏度曲线再下降时有两种趋势,在乳液替代比例较高时,黏度降低的速率较慢,而乳液替代比例较小时,黏度曲线的下降速率较快,这可能是由于黄油和高内相乳液不同的微观结构特性,黄油的脂肪晶体网络刚性较强,也更容易遭到破坏,在乳液含量更高时,蛋糕糊黏度由乳液主导,反之亦然。

由图2可知,经尼罗红染色的油脂呈红色。在纯黄油组中,油脂明显聚集成不规则块状,表明黄油在搅打后的冷却过程中发生了重结晶,重新转变为固体形态,体现了塑性脂肪的典型特征。三维晶体网络结构赋予面糊优异的持气与结构支撑能力。然而,这种块状晶体在面糊中的分布不均,可能导致局部区域在烘烤过程中形成较大的空腔(如图3(b-B)所示),从而影响蛋糕内部气孔的均匀性。相比之下,高内相乳液体系展现出更均一的微观结构:油滴以球形形态均匀分散于连续水相中,呈现出典型的水包油(O/W)型乳液特征,该结构有助于稳定气泡分布,避免大空腔的产生,从而获得更细腻、均质的蛋糕



A~F分别为大豆油和乳液替代比例0%,25%,50%,75%,100%制备的蛋糕糊

图2 蛋糕糊的微观结构

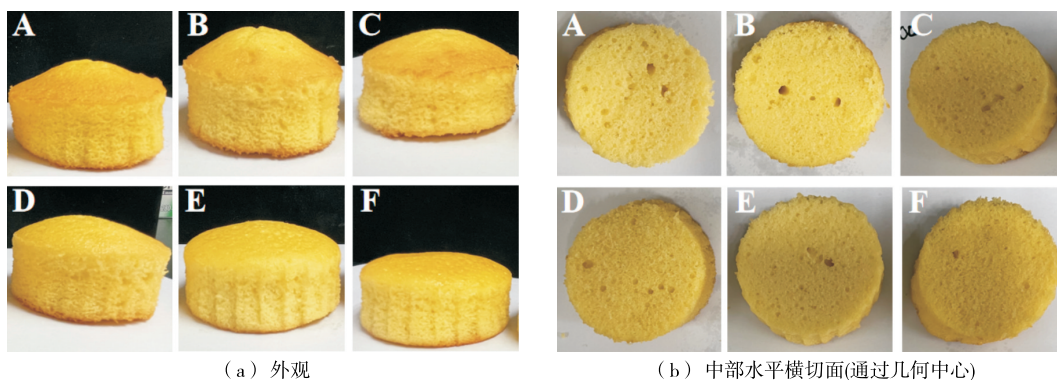
Figure 2 Microstructure of cake batter

组织。此外,在乳液替代比例较低时,块状的油脂表面吸附了大量球形的小油滴,说明此时乳液的球形油滴并没有分散开,但当乳液替代比例为75%时,虽然还存在部分块状油脂,但出现了大量分散的球形小油滴,说明蛋白糊此时的内部结构已转变为乳液主导,与蛋糕糊黏度结果相一致。

此外,块状油脂表面存在气泡,且随着乳液替代比例的不不断提升,气泡逐渐减少。这说明相比于黄油,高内相乳液的储气能力有所欠缺。但与大豆油制备的蛋糕糊相比,乳液稳定的蛋糕糊油滴更加分散,大豆油制备的蛋糕糊的油滴出现了大面积的堆积聚集,说明相比于大豆油,高内相乳液能更好地支撑蛋糕糊的结构。

2.2 蛋糕的形态与色泽

由图3可知,0%替代组(纯黄油组)在蛋糕体积、比容和整体蓬松度方面表现最优,充分体现了黄油作为传统塑性脂肪在烘焙中的优异性能。所有替代比例的蛋糕糊



A~F 分别为大豆油及乳液替代比例为 0%, 25%, 50%, 75%, 100% 的蛋糕样品

图 3 蛋糕外观及切面形态

Figure 3 Cake appearance and cross-sectional morphology

均能烘焙成形态较好的蛋糕,但随着乳液替代比例的不断升高,蛋糕体积略有减小,表明商业黄油在起发性方面仍具有一定的优势。图 3(b)展示了蛋糕中部水平横切面(即垂直于高度方向、通过蛋糕几何中心的切面),用于客观评估内部气孔结构的均匀性。在此平面上,随着乳液替代比例的增加,蛋糕内部气孔分布更为均匀,未出现明显的大空腔,质地更加绵密均一。这可能与油脂的微观结构有关:乳液虽然表现出了类固态行为,但在搅拌过程中易于分散;而黄油在室温下容易发生重结晶,形成块状晶体,这种非均匀分布导致局部区域在烘烤过程中产生较大的空腔。此外,纯大豆油制备的蛋糕表现出明显的结构缺陷:底部塌陷、边缘组织松散,其中部横切面可见大量不规则、大小不一的气孔,整体结构缺乏支撑力。这一现象印证了液态油(尤其是富含不饱和脂肪酸的大豆油)在搅打过程中易破坏泡沫稳定性,导致气体逸出,无法有效支撑蛋糕骨架。相比之下,即使乳液的油相完全来源于大豆油,其形成的凝胶网络结构却能显著改善面糊的持气能力与机械强度,使 100% 替代组在中部横切面上仍保持完整外形和相对均匀的内部结构。该结果进一步说明,通过构建高内相乳液对液态大豆油进行结构化,可显著提升其在蛋糕体系中的功能表现,有效弥补液态油因缺乏网络支撑而导致的持气能力不足。

蛋糕的色泽变化受到多种因素的影响,包括食材成分、制作方式以及加热温度等。色泽在评估食品质量时起着关键作用,对于消费者的喜好度、接受度以及食欲有着重要影响。由表 2 可知,所有蛋糕样品在明度上(L^*)无显著性差异,在红度上(a^*)以大豆油制备的蛋糕数值低于其他蛋糕,可能是由于乳液的连续相中含有多糖、蛋白等成分,在加热时可能会发生美拉德反应产生焦糖色,使得蛋糕的红度上升。此外,随着乳液替代比例的不断升高,蛋糕的黄度(b^*)呈下降趋势,这可能与油脂本身的颜色有

表 2 蛋糕的色差分析†

Table 2 Color difference analysis of cake

组别	L^*	a^*	b^*
大豆油	79.23±0.62	3.79±0.11 ^a	44.23±0.27 ^b
0%乳液	79.34±0.94	4.08±0.39 ^{ab}	48.82±0.31 ^c
25%乳液	79.39±0.24	4.85±0.20 ^b	46.80±0.23 ^d
50%乳液	78.60±1.53	4.49±0.23 ^b	46.66±0.40 ^d
75%乳液	80.11±0.99	4.68±0.38 ^b	45.63±0.45 ^c
100%乳液	79.11±0.51	4.85±0.35 ^b	42.32±0.15 ^a

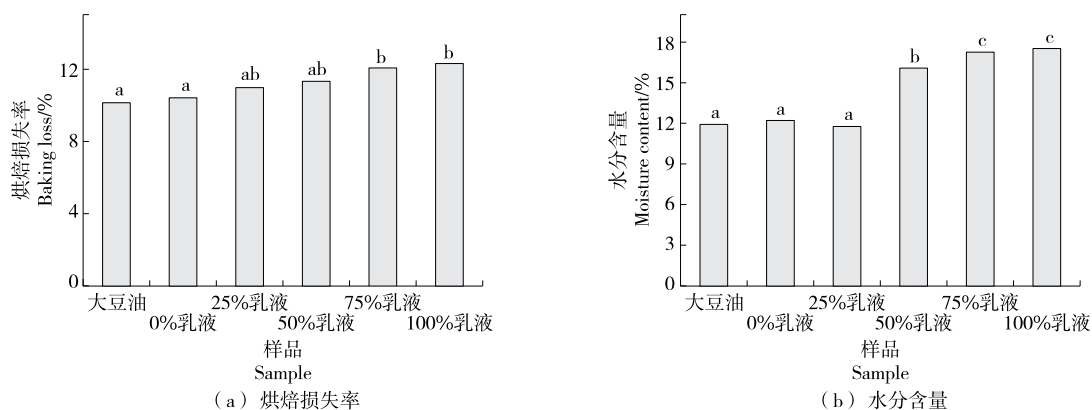
† 小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

关,黄油本身呈淡黄色,而乳液本身偏向白色。

2.3 蛋糕的烘焙损失率、含水量和水分分布

由图 4(a)可知,随着乳液替代比例的不不断提高,蛋糕的烘焙损失率呈小幅度上升趋势。蛋糕体积是影响烘焙损失的一个重要因素^[15],一般来说,蛋糕的体积越大,其与热空气接触的表面积也越大,内部自由水更容易蒸发。虽然乳液蛋糕体积略小于黄油蛋糕(图 3),但其烘焙损失率并未相应降低。一方面可能是由于高内相乳液本身含水量较高;另一方面可能是乳液内部的麦麸水提物颗粒浓度过高,部分颗粒包裹住了淀粉颗粒,影响了淀粉与水的结合。利用添加了菊粉的凝胶油烘烤蛋糕时也出现了烘焙损失率随着菊粉添加量的增高而先降后增的现象^[16]。

值得注意的是,单独依据烘焙损失率或最终水分含量单独评价蛋糕保水性能易产生偏差。由图 4(b)可知,随着乳液替代比例增加,蛋糕的最终水分含量显著增加($P<0.05$)。这一现象可结合水分存在形式进行深入分析。由图 5 可知,LF-NMR 将蛋糕中的水分分为 3 类,水分分布曲线从左至右的 3 个峰分别代表了结合最为紧密的结合水(T_{21})、不易流动的弱结合水(T_{22})以及流动性最强的自由水(T_{23})。当乳液替代比例 $\geq 75\%$ 时, T_{22} 的相对峰



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图4 蛋糕的烘焙损失率和蛋糕的水分含量

Figure 4 Baking loss rate and moisture content of cake

面积显著增加,而 T_{23} 比例则明显低于黄油蛋糕。弱结合水主要由麦麸水提物中的蛋白质、多糖等大分子通过氢键或三维网络结构束缚,具有较低的迁移性和蒸发倾向,能够在烘烤及贮藏过程中稳定存在于蛋糕基质中,并有效抑制淀粉分子链段的重排,从而延缓老化进程。相比之下,纯黄油蛋糕的 T_{23} 峰强度显著更高,表明其水分以流动性强的自由水为主。尽管黄油形成的脂肪晶体网络有助于包裹气泡、维持初期蓬松结构,并在一定程度上减少水分逸失(表现为较低的烘焙损失率),但其对水分的束缚能力较弱,导致自由水在贮藏期间更易参与淀粉回生反应。

乳液替代蛋糕的LF-NMR弛豫谱的整体分布显示,其水分分布向较短 T_2 区域偏移, T_{22} 含量显著增加,而 T_{23} 含量降低,反映出水分被更强地束缚;相比之下,黄油蛋糕则表现出更明显的长 T_2 组分,表明其水分活度较高。虽然黄油形成的晶体网络有助于包裹气泡,但对水分的束缚能力较弱;而乳液替代蛋糕中的麦麸水提物大分子网络能更有效地将水分子固定为弱结合态,从而提升水分稳定性。此外,大豆油蛋糕的烘焙损失率和水分含量均处于最低水平(图4),这与其缺乏结构化水相及持水网络密切相关,导致面糊稳定性差、组织松散、支撑力不足(图3(b))。

综上,乳液蛋糕虽表现出略高的烘焙损失率,但其最终水分含量更高,且水分主要以弱结合态存在。这类水分存在状态不仅提升了水分在蛋糕体系中的稳定性,还可在贮藏过程中抑制淀粉链段的迁移与重排,从而延缓老化。相比之下,黄油蛋糕虽表现出较低的烘焙损失率,但其水分以自由水为主,尽管有助于初期结构蓬松,但因水分活度较高,在贮藏期间更易参与淀粉回生过程。因此,乳液蛋糕引入的结构化水相,可在不依赖传统塑性脂肪的前提下,有效调控蛋糕水分分布,提升其持水性能与

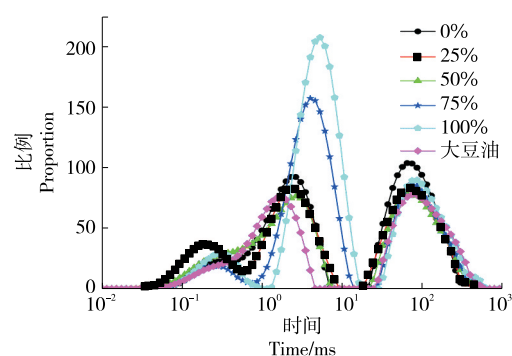


图5 蛋糕的水分分布

Figure 5 Water distribution of cake

潜在货架稳定性。

2.4 蛋糕的质构和XRD分析

由表3可知,随着乳液替代比例的不断升高,蛋糕芯的硬度不断上升,这可能与蛋糕的形态相关,黄油比例高的蛋糕中气孔更多且膨胀体积更大,所以硬度上更为松软。但值得注意的是,大豆油蛋糕展现出最低的硬度,表明大豆油蛋糕内部的蛋糕组织最为松散,与大豆油蛋糕在烘烤完成后容易发生塌陷这一表现现象相印证(图3)。蛋糕的弹性是指蛋糕在经受压缩后的恢复能力,不同乳液替代比例的蛋糕在弹性上并无显著差距,但大豆油蛋糕的弹性明显降低,这也进一步说明大豆油蛋糕的组织结构过于松散。黏聚性反映了蛋糕对抗外力挤压而不产生形变的能力,其展现出与蛋糕弹性相类似的趋势,说明乳液替代的蛋糕和黄油蛋糕相比,内部组织结构均不易被破坏,发生掉渣或组织塌陷等现象。而蛋糕咀嚼度展现出与蛋糕硬度相类似的趋势,说明在蛋糕口感上乳液替代比例高的蛋糕更加紧实绵密。

X射线衍射可以用于观测蛋糕中淀粉的晶体结构。由图6可知,所有样品的主要特征峰均出现在 20° 左右,对

表 3 蛋糕的质构分析[†]

Table 3 Texture analysis of cake

组别	硬度/N	弹性	黏聚性	咀嚼度/N
大豆油	2.09±0.12 ^a	0.85±0.01 ^a	0.60±0.01 ^a	1.12±0.11 ^a
0%乳液	2.72±0.22 ^b	0.90±0.01 ^b	0.63±0.01 ^b	1.67±0.27 ^b
25%乳液	3.07±0.25 ^b	0.88±0.01 ^b	0.64±0.01 ^b	1.74±0.22 ^b
50%乳液	3.56±0.11 ^c	0.88±0.01 ^b	0.65±0.01 ^b	2.05±0.19 ^b
75%乳液	3.98±0.15 ^d	0.89±0.01 ^b	0.64±0.01 ^b	2.28±0.16 ^{bc}
100%乳液	4.54±0.30 ^e	0.9±0.01 ^b	0.64±0.01 ^b	2.62±0.25 ^c

[†] 小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

应淀粉的V型结晶结构,这类晶体结构代表了蛋糕中的直链淀粉和脂质形成复合物,此外,在峰面积上除大豆油制备的蛋糕外并无显著差异,说明乳液可以很好地替代黄油与淀粉进行结合。而大豆油制备的蛋糕在20°左右的特征峰面积更大,可能是由于大豆油的流动性更强,在蛋糕糊的搅打过程中,能与淀粉更充分地混合。纯黄油和乳液替代25%黄油制备的蛋糕均在21°~24°出现了两个小的特征峰,主要代表了淀粉的A型、B型以及由两者混合而成的C型晶体结构,说明这两种油脂制备的蛋糕在制备后均发生了淀粉的重结晶,而在乳液替代比例提高后,两个特征峰彻底消失,说明乳液替代比例的提高可以有效抑制蛋糕中淀粉重结晶,延缓蛋糕老化速度,保持蛋糕的质地和口感。这也与乳液替代比例高的蛋糕中水分含量更高,能有效提高蛋糕保鲜期的结果相互印证。

2.5 蛋糕的风味

食品的风味可分为挥发性和非挥发性两类。其中,挥发性风味物质对嗅觉感受影响较大,而非挥发性风味物质则更多地影响味觉感受。由图7(a)可知,除PA/2和T30/1外,其余电子鼻传感器对样品的响应值无显著差异。当乳液替代比例为75%时,PA/2和T30/1传感器的响

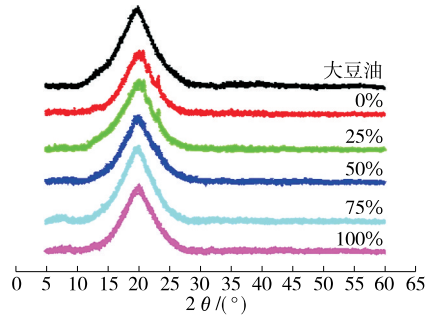


图 6 蛋糕的XRD分析

Figure 6 XRD analysis of cake

应值有小幅上升,可能是由于乳液中的蛋白、多糖和酚类物质在加热环境下发生了诸如美拉德反应等一系列的化学反应。

电子舌是一种重要的风味检测技术,能够利用传感器模拟人类的味觉,对食品的滋味进行定性和定量的分析。各传感器:AHS(酸)、CTS(咸)、NMS(鲜)、SCS(苦)、ANS(甜)、CPS和PKS(综合属性)。由图7(b)可知,所有蛋糕样品对于酸味和咸味传感器的响应无显著区别,而对鲜味、苦味、甜味传感器的响应值随着乳液替代比例的不不断提高而小幅上升,鲜味的差异可能是氨基酸的组成与含量不同,此外多酚、黄酮类物质的含量也会对蛋糕的鲜味产生影响,而乳液连续相中含有来自麦麸的水溶性蛋白与酚类物质。甜味响应值的增加可能与乳液连续相中的麦麸水溶性多糖有关。

3 结论

采用超声辅助麦麸水提取物稳定的高内相乳液可显著提升蛋糕的持水性,改善气孔均匀性,并有效抑制淀粉回生,为开发高纤健康烘焙食品提供了新策略。研究突破了传统认为麦麸提取物界面活性不足的局限,经超声处理后具备稳定高油相比乳液的能力,拓展了植物源成分

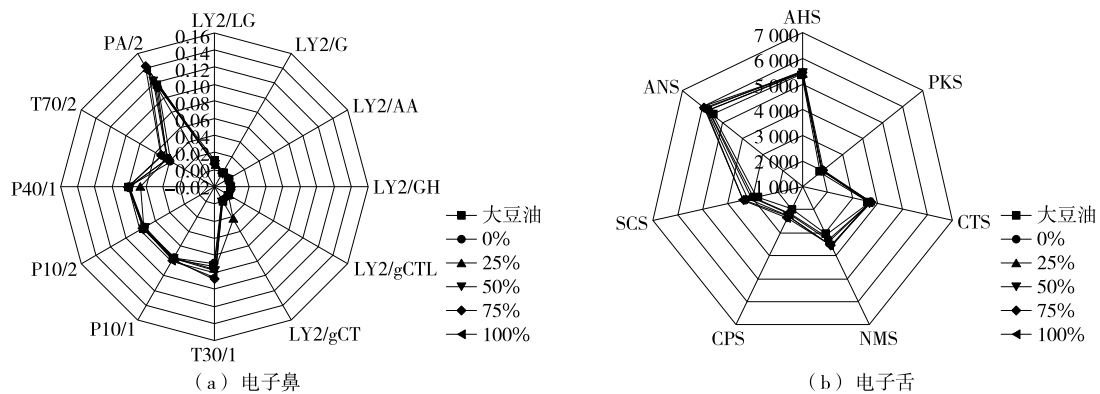


图 7 蛋糕的电子鼻分析和电子舌分析

Figure 7 E-nose and E-tongue analyses of cake

在结构性脂肪模拟中的应用。然而,高比例替代仍导致蛋糕比容降低、硬度增加,说明其在充气性和质构模拟方面尚存不足。未来可进一步探索麦麸提取物与蛋白或多糖的协同体系,优化加工工艺以改善膨发性能,并开展长期贮藏稳定性与消费者接受度研究,推动其在清洁标签烘焙产品中的实际应用。

参考文献

- [1] 崔晨晓. 麸皮的发酵改性及其在馒头中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 1-50.
CUI C X. Fermented modification of wheat bran and its application in steamed bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 1-50.
- [2] ZHAO H M, GUO X N, ZHU K X. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 28-36.
- [3] DAS P, NAYAK P K, KESAVAN R K. Ultrasound assisted extraction of food colorants: principle, mechanism, extraction technique and applications: a review on recent progress[J]. *Food Chemistry Advances*, 2022, 1: 100144.
- [4] GAO H X, MA L, CHENG C, et al. Review of recent advances in the preparation, properties, and applications of high internal phase emulsions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112: 36-49.
- [5] SHI A M, FENG X Y, WANG Q, et al. Pickering and high internal phase Pickering emulsions stabilized by protein-based particles: a review of synthesis, application and prospective[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106117.
- [6] ABDULLAH, WEISS J, AHMAD T, et al. A review of recent progress on high internal-phase Pickering emulsions in food science[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 106: 91-103.
- [7] JIAO B, SHI A M, WANG Q, et al. High-internal-phase Pickering emulsions stabilized solely by peanut-protein-isolate microgel particles with multiple potential applications[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(30): 9 274-9 278.
- [8] QIU C, WANG C X, LI X J, et al. Preparation of high internal phase Pickering emulsion gels stabilized by glycyrrhizic acid-zein composite nanoparticles: gelation mechanism and 3D printing performance[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108128.
- [9] GHOSH S, YADAV A, RANI S, et al. 3D printed hierarchical porous poly(ϵ -caprolactone) scaffolds from Pickering high internal phase emulsion templating[J]. *Langmuir*, 2023, 39(5): 1 927-1 946.
- [10] LIU Z, LIN D H, SHEN R, et al. Characterizations of novel konjac glucomannan emulsion films incorporated with high internal phase Pickering emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106088.
- [11] SYAN V, KAUR J, SHARMA K, et al. An overview on the types, applications and health implications of fat replacers[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2024, 61(1): 27-38.
- [12] LIU X W, SUN H N, MU T H, et al. Exploring the potential of potato products: Puree and cellulose nanofibers, to improve the nutritional value of mayonnaise[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437 (Pt 1): 137864.
- [13] ANGGRAENI A A, TRIWITONO P, LESTARI L A, et al. Evaluation of glucomannan as a fat replacer in the dough and cookies made from fermented cassava flour and soy protein concentrate[J]. *Food Chemistry*, 2024, 434: 137452.
- [14] REZAEI M, AIDER M. Study of the effect of canola proteins-xanthan based Pickering emulsion as animal fat replacer in a food matrix produced from mechanically separated meat[J]. *Meat Science*, 2023, 204: 109283.
- [15] 柴茜亚, 李华, 王小艳, 等. 阿洛酮糖对海绵蛋糕面糊性能和品质的影响[J]. *食品与机械*, 2025, 41(7): 183-189.
CHAI X Y, LI H, WANG X Y, et al. Effects of *D*-allulose on batter performance and quality of sponge cakes[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(7): 183-189.
- [16] 王洋洋, 李芳, 王学东, 等. 菊粉对面团流变性及冷冻面团烘焙特性的影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(3): 238-244.
WANG Y Y, LI F, WANG X D, et al. Effect of inulin on rheological of dough and baking properties of frozen dough[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(3): 238-244.