

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80409

微纳米马铃薯淀粉脂肪模拟物性质 及其在戚风蛋糕中的应用

雍雅萍¹ 杨晓清² 李铭媛² 张婧娟³ 李云玲¹ 苏 靖¹

(1. 内蒙古河套学院农学系, 内蒙古 巴彦淖尔 015001; 2. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古鄂尔多斯市东胜区市场监督管理执法大队, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: [目的] 研究微纳米马铃薯淀粉脂肪模拟物性质及应用效果。[方法] 采用动态超高压微射流技术对酶解马铃薯淀粉脂肪模拟物进行处理, 并将其应用于戚风蛋糕中替代脂肪。[结果] 经动态超高压微射流技术处理后, 脂肪模拟物颗粒粒径由 3 550.33 nm 减小至 532.40 nm, 溶解度由 84.24% 上升至 92.22%, 分支度由 14.57% 下降至 12.84%。经动态超高压微射流处理后微纳米马铃薯淀粉脂肪模拟物未形成新的官能团, 但红外光谱峰值强度发生了变化, 荧光强度降低, 热解速率下降, 体系的热稳定性上升。[结论] 由微纳米马铃薯淀粉脂肪模拟物制作的戚风蛋糕比容、感官品质、质构特性均优于酶解组脂肪模拟物制作的蛋糕, 且脂肪替代率提升了 10%。

关键词: 脂肪模拟物; 马铃薯淀粉; 微纳米级脂肪模拟物; 戚风蛋糕

Study on properties of micro-and nano-potato starch fat simulants and their application in chiffon cake

YONG Yaping¹ YANG Xiaoqing² LI Mingyuan² ZHANG Jingjuan³ LI Yunling¹ SU Jing¹

(1. Department of Agriculture, Hetao College, Bayannur, Inner Mongolia 015001, China;

2. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. Inner Mongolia Ordos City, Dongsheng District Market Supervision and

Administration, Law Enforcement Team, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: [Objective] In order to study the properties and application effect of micro-nano potato starch fat mimics. [Methods] The enzymatic hydrolysis potato starch fat mimics was treated by dynamic ultra-high pressure micro-jet technology, and it was applied to replace fat in chiffon cake. [Results] The results showed that the particle size of fat simulant particles decreased from 3 550.33 nm to 532.40 nm, the solubility increased from 84.24% to 92.22%, and the branching degree decreased from 14.57% to 12.84% after the treatment of dynamic ultra-high pressure micro-jet technology. After dynamic ultra-high pressure micro-jet treatment, the micro-nano potato starch fat mimics did not form new functional groups, but the peak intensity of infrared spectrum changed, the fluorescence intensity decreased, the pyrolysis rate decreased, and the thermal stability of the system increased. [Conclusion] The specific volume, sensory quality and texture characteristics of chiffon cake made from micro-nano potato starch fat simulant are better than those made by enzymatic hydrolysis fat simulant, and the fat replacement rate is increased by 10%.

Keywords: fat simulants; potato starch; fat simulants in micro-and nano-scale; chiffon cake

戚风蛋糕因口感松软、轻盈、细腻滋润等特点备受消费者青睐^[1-2]。其制作过程中脂肪在乳化过程中通过阻碍蛋白质和淀粉形成连续固体网络, 从而赋予食物柔软

的质地^[3], 因此, 戚风蛋糕类产品一般都含有大量脂肪。《中国居民营养与慢性病状况报告 2020》报道, 过去 10 年中国成年居民超重肥胖率居世界第一^[4]。肥胖成为危害

基金项目: 内蒙古自然科学基金面上项目 (编号: 2021MS03027); “科技兴蒙”行动重点专项 (编号: NMKJXM202201-5); 河套学院科学技术研究项目 (编号: HYZX202187, HYZX202166)

通信作者: 杨晓清 (1966—), 女, 内蒙古农业大学教授, 博士。E-mail: yxqnmg@163.com

收稿日期: 2024-05-02 **改回日期:** 2024-11-07

公众身体健康的因素之一,而控制脂肪的摄入是目前行之有效的策略之一。选用低脂食品、食品加工过程中去除部分脂肪和模拟脂肪功能特性的产品(简称脂肪模拟物)替代食品加工中的脂肪^[5-6],成为控制脂肪摄入的有效途径。前两种方法因加工过程中去除了一定量的脂肪,使得产品口感等感官体验下降,产品加工受限。而选用脂肪模拟物替代食品加工中的部分脂肪,不仅可以很好地保持产品应有的独特感官品质,还能降低产品脂肪含量。

淀粉基脂肪模拟物因热量低、适用范围广、成本低、无毒副作用、易被人体吸收利用而广受推崇。其制备方法有酶解法、化学法、物理法、复合改性法等^[7-8]。酶解法是制备淀粉基脂肪模拟物最普遍的方法。刘颖等^[9-12]研究表明,淀粉经酶水解后其 DE 值介于 2 与 3 之间的麦芽糊精在食品中与水结合后可提供如奶油的润滑性,表现出与脂肪类似的口腔停留时间^[13],食用时在口腔温度和压力的作用下,模拟脂肪润滑流动的口感和黏稠度^[14],产生与脂肪类似的流变学性质,可以部分替代食品中的脂肪。当酶解后的淀粉基脂肪模拟物在食品中的替代量>20%时,其口感与真正脂肪所制作的产品具有明显的差异性、且组织结构不均匀。这可能是酶解后的脂肪模拟物颗粒较大(2~6 μm)^[15],颗粒感的增大会冲击舌头上的感官乳突,影响或者覆盖原有脂肪口感。因此,选用粒径更加细小、功能性更加优良的脂肪模拟物成为亟待解决淀粉基脂肪模拟物替代率低的首要问题。

动态高压微射流技术是通过流动物料进行强烈撞击、高频剪切和空穴爆炸后对物料颗粒进行超微粉碎,是一种新型绿色、安全的均质手段^[16]。研究拟以传统单一酶解技术获得的马铃薯淀粉脂肪模拟物和酶解耦合动态超高压微射流技术获得的微纳米马铃薯淀粉脂肪模拟物为原料,考察二者的结构特性和功能特性,并将其应用于戚风蛋糕中替代脂肪,分析二者对戚风蛋糕品质的影响,以期提升淀粉基脂肪模拟物的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯淀粉:陕西卓立成农业科技开发有限责任公司;

α-淀粉酶:10 000 U/g,山东隆科特酶制剂有限公司;

氙代-二甲基亚砷:分析纯,上海安谱实验科技股份有限公司;

蛋糕粉:河南省新乡良润全谷物食品有限公司;

双效泡打粉、塔塔粉:安琪酵母股份有限公司;

食盐、大豆油、鸡蛋、白砂糖:市售。

1.2 仪器与设备

电子分析天平:ME104E 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

台式离心机:H1650 型,湘仪离心机仪器有限公司;

恒温加热磁力搅拌机:DF-6CD 型,常州市亿能实验仪器;

漩涡混匀仪:Vortex-2 型,上海沪析实业有限公司;

质构仪:TA.XT.Plus 型,英国 Stable Micro System 公司;

远红外食品烘炉:DFL-24 型,广州市白云区宝源设备厂;

纳米粒度及 Zeta 电位仪:Zetasizer Nano 型,英国马尔文仪器有限公司;

傅里叶红外光谱仪:IR Tracer 100 型,日本 Shimadzu 公司;

动态超高压微射流机:MF110IP-EH 型,上海迈克孚生物科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 酶解马铃薯淀粉脂肪模拟物的制备 将马铃薯淀粉与水配制成浓度为 15% 的料液,70 ℃水浴搅拌直至糊化完全。加入 α-淀粉酶,90 ℃水浴 10 min,沸水灭酶(至少 5 min),冷却,过滤。测得酶解产物中葡萄糖当量(DE)值为 2.40,符合脂肪模拟物葡萄糖当量值的要求。

1.3.2 微纳米马铃薯淀粉脂肪模拟物的制备 酶解马铃薯脂肪模拟物浓度为 3%、压力为 200 MPa、循环处理 10 次,可获得微纳米马铃薯淀粉脂肪模拟物。

1.3.3 粒径的测定 参照涂宗财等^[17]的方法。

1.3.4 溶解度的测定 参照郭泽铤等^[18]的方法,按式(1)计算溶解度。

$$b = \frac{M_2}{M_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

b ——溶解度,%;

M_0 ——淀粉初始质量,g;

M_2 ——水溶性淀粉质量,g。

1.3.5 分支度的测定 称取 5 mg 已纯化样品于进口 EP 管中,加入 1 mL 氙代-二甲基亚砷,80 ℃加热过夜;12 000 r/min 离心 10 min,取上清液加入核磁管中上机检测。采用 ¹H 核磁共振分析法,对样品分支度分布进行检测,扫描次数为 32,共振射频为 500.23 MHz,核磁谱为 1 H。利用 MestReNova 软件对数据进行分析,根据样品出峰时间,选择出峰范围,并按式(2)计算分支度。

$$D = \frac{A}{A+B} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

D ——分支度,%;
 A —— α -1,6键的峰面积;
 B —— α -1,4键的峰面积。

1.3.6 傅里叶变换红外光谱(FTIR)测定 将酶解与超微化的马铃薯淀粉脂肪模拟物样品分别按1%的比例与溴化钾混合研磨成粉末后进行压片。光谱扫描范围为4 000~400 cm^{-1} ,扫描次数为64次,分辨率为4 cm^{-1} 。

表1 不同替代率的酶解与微纳米马铃薯淀粉脂肪模拟物的戚风蛋糕配方表

Table 1 Formula table of chiffon cake with different substitution rates of enzymolysis micro-nano potato starch fat stimulants

脂肪替代率/%	鸡蛋/g	低筋面粉/g	大豆油/g	酶解脂肪模拟物/g	超微化脂肪模拟物/g	塔塔粉/g	白砂糖/g	食盐/g
0	100	40	12.0	0.0	0.0	0.8	32	0.4
5	100	40	11.4	0.6	0.6	0.8	32	0.4
10	100	40	10.8	1.2	1.2	0.8	32	0.4
15	100	40	10.2	1.8	1.8	0.8	32	0.4
20	100	40	9.6	2.4	2.4	0.8	32	0.4
25	100	40	9.0	3.0	3.0	0.8	32	0.4
30	100	40	8.4	/	3.6	0.8	32	0.4
35	100	40	7.8	/	4.2	0.8	32	0.4

(2) 戚风蛋糕制作工艺:将蛋白与蛋黄分离,蛋白与白砂糖、塔塔粉及食盐混合搅拌至尖立不倒状态,蛋黄与水、大豆油和脂肪模拟物、泡打粉及低筋面粉混合,顺时针搅拌至无颗粒状态,将蛋白糊的1/3与蛋黄糊混合,再将剩余蛋白糊并入充分混合至光滑状态,倒入蛋糕模具,磕出气泡。190 $^{\circ}\text{C}$ 烤箱中焙烤18 min,倒置放凉至室温,脱模得到成品。

1.3.10 戚风蛋糕比容测定 将蛋糕冷却至室温后称量,采用小米置换法测定蛋糕体积,按式(3)计算蛋糕比容。

$$\nu = \frac{v}{m}, \tag{3}$$

式中:

ν ——蛋糕比容,mL/g;

v ——蛋糕体积,mL;

m ——蛋糕质量,g。

1.3.11 戚风蛋糕质构测定 将成品戚风蛋糕切成3.0 cm $\times$ 3.0 cm的正方体,采用质构仪平行测定3次,测前速度1.0 mm/s,测试速度1.0 mm/s,测后速度3.0 mm/s。

1.3.12 戚风蛋糕感官评定 邀请20名食品专业人员按表2对戚风蛋糕的外观形态(20分)、切面组织状态(30分)、弹柔性(20分)和口感(30分)进行评分,以100分计。

1.3.7 荧光光谱测定 采用荧光光谱仪进行测定。发射光谱波长290~450 nm,激发波长280 nm,带宽5 nm。

1.3.8 热重(TG)测定 根据Kandori等^[19]的方法。

1.3.9 戚风蛋糕的配方及制作工艺

(1) 戚风蛋糕配方:酶解脂肪模拟物和微纳米脂肪模拟物分别按表1替代戚风蛋糕配方中的脂肪(以大豆油计)含量。

表2 感官评定表

Table 2 Sensory evaluation table

项目	评分标准	分值
外观形态	表面光滑无斑点、皱纹,表面允许略微隆起	16~20
	表面略有斑点、皱纹,稍有收缩变形	12~15
	表面有明显皱纹,淡黄色,明显收缩变形且凹陷	6~11
切面组织状态	淡黄色有光泽,气孔较均匀,细密无坚实部分	23~30
	淡黄色有光泽,气孔略大,不均匀,无坚实部分	16~22
	淡褐色无光泽,气孔较大,不均匀,底部气孔紧密,有少量坚实部分	1~15
弹柔性	柔软有弹性,按下去后复原较快	16~20
	柔软较有弹性,按下去后缓慢复原	12~16
	柔软性、弹性差,按下去后难复原	1~11
口感	味醇正,口感绵软细腻,稍有湿感	23~30
	软绵,略有坚实感,稍干不细腻	16~22
	松散发干,坚韧,粗糙或较粘牙	1~15

1.4 数据处理

利用SPSS 26和Origin 2021软件分析试验数据并制图。

2 结果与分析

2.1 马铃薯淀粉脂肪模拟物的粒径、分支度和溶解度

由表3可知,动态超高压微射流处理过程中由于脂肪

模拟物颗粒受到强烈剪切和高速撞击后,颗粒粒径明显减小,达到微米级(532.40 nm)。微米级脂肪模拟物的颗粒被分散得更小且多,增大了颗粒的比表面积,缩短了颗粒在水中的扩散路径^[20],使得溶解速率加快,溶解度增

加。动态超高压微射流的剪切撞击作用破坏了酶解脂肪模拟物的链结构及螺旋结构^[21],分子链发生断裂,有更多的糖苷键暴露出来,短链数量增加,分支度降低,而分支度与溶解度之间呈反向变化趋势。

表 3 马铃薯淀粉脂肪模拟物的粒径、分支度和溶解度[†]

Table 3 Measurement of particle size, branching and solubility of potato starch fat simulants

样品	粒径/nm	溶解度/%	α -1,4 键峰面积	α -1,6 键峰面积	分支度/%
酶解脂肪模拟物	3 550.33±0.02 ^a	84.24±0.01 ^b	79 098.09±0.14 ^b	13 492.15±0.31 ^b	14.57±0.22 ^b
微米级脂肪模拟物	532.40±0.13 ^b	92.22±0.03 ^a	96 592.64±0.20 ^a	14 232.98±0.42 ^a	12.84±0.16 ^a

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

由图 1 可知,微米级脂肪模拟物吸收峰的位置及形状未出现明显差异,说明未形成新的官能团,但吸收峰的峰强出现明显差异。3 000~3 500 cm^{-1} 附近出现较宽的一OH 伸缩振动特征吸收峰,微米级脂肪模拟物的峰宽及峰强明显减小,可能是因为微射流处理使得样品间氢键作用减弱^[22];2 916 cm^{-1} 处出现 C—H 伸缩振动峰,1 647 cm^{-1} 处出现羰基 C=O 的收缩振动峰,微米级的脂肪模拟物峰形消失,可能是因为微射流处理使得样品的功能基团发生变化^[23];1 020,1 148 cm^{-1} 处的收缩振动峰属于—CHO,微米级脂肪模拟物的峰强减小,可能是因为强烈的剪切力和空穴作用使得样品从有序变为无序现象^[24];550~850 cm^{-1} 处为 D-吡喃葡萄糖的吸收带及—CH₂ 的弯曲振动吸收峰,均为淀粉分子的特征吸收峰^[25]。

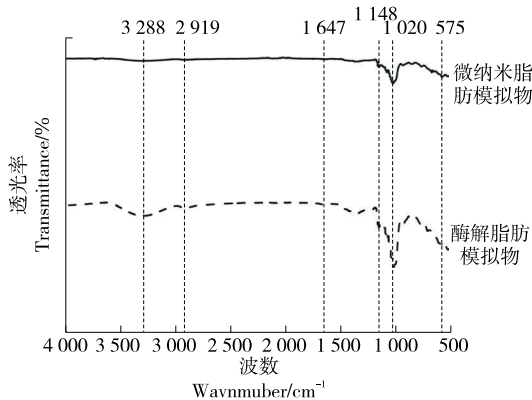


图 1 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

Figure 1 Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis

2.3 荧光光谱分析

酪氨酸和色氨酸残基是引起蛋白质荧光的主要氨基酸残基^[26],是蛋白质内源荧光的主要来源。荧光强度的改变与蛋白质溶液发生荧光淬灭有关。荧光淬灭是指溶液中的淬灭分子与荧光物质分子之间相互作用,使荧光

物质的荧光量子效率降低或者激发态寿命缩短的过程^[27]。由图 2 可知,酶解脂肪模拟物在 300 nm 处被激发,在 325 nm 处呈现最大荧光发射波长;微米级脂肪模拟物的最大发射波长未改变,但荧光强度降低,说明微射流处理过程发生了荧光淬灭。荧光淬灭的产生与分子间不同的相互作用有关,如分子重排、能量转移,基态复合物形成和碰撞猝灭^[28]。一方面,微射流处理增大了色氨酸残基的暴露程度,诱导了蛋白的荧光淬灭^[29];另一方面,在超高压处理过程中淬灭体(多糖)更易与荧光发光体互相碰撞形成不发光的配合物,导致微米级脂肪模拟物荧光强度降低^[26]。

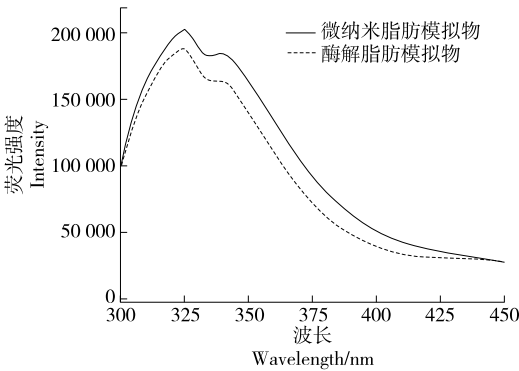


图 2 荧光光谱分析

Figure 2 Fluorescence spectrum analysis

2.4 热重(TG)分析

热降解分为两个阶段:第一个阶段为脱水阶段(温度 $\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$),即水分随着温度的升高蒸发而导致的质量损失;第二阶段发生在 300 $^{\circ}\text{C}$ 附近,此时的质量损失与糖类有机物的热解逸散有关^[30]。由图 3 可知,微米级脂肪模拟物的质量分数大于酶解脂肪模拟物,说明微射流处理影响了样品的热稳定性。微米级脂肪模拟物的质量损失率优于酶解组,说明样品经微射流处理后,内部结构稳定,样品的热解速率慢,而酶解脂肪模拟物的颗粒粒径大,结构疏松,在热降解过程中质量损失大。

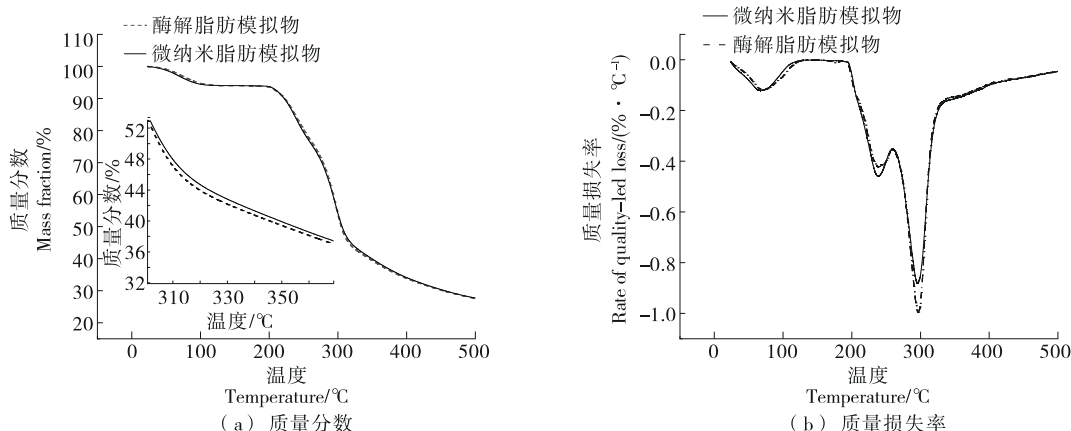


图3 热重分析

Figure 3 Thermogravimetric analysis

2.5 戚风蛋糕的比容

蛋糕比容是评判不同替代率的戚风蛋糕膨胀程度的主要指标,与膨胀度呈正相关^[31]。由图4可知,随着脂肪模拟物替代率的上升,戚风蛋糕的比容整体呈下降趋势。微纳米脂肪模拟物制作的蛋糕比容整体优于酶解组蛋糕,是因为两种粒径的脂肪模拟物分别替代脂肪添加到蛋糕中时,能在蛋糕内吸收水分,增加蛋糕组织的持水力,形成具有一定强度的凝胶结构,保持蛋糕内部支撑结构的强度,说明适量添加有助于蛋糕的膨胀定型^[32]。但由于酶解脂肪模拟物的粒径(3 550.33 nm)较大,在蛋糕制作过程中会发生分散度相对较差的现象,影响体系稳定程度。而微射流技术破坏了酶解脂肪模拟物颗粒表面的氢键,在油水界面中的原强亲水性能减弱^[33],颗粒在油相表面聚集的能力增强,提高了稳定性。阮征等^[32]研究表明,小粒径青稞粉有利于戚风蛋糕比容的提升。

2.6 戚风蛋糕的质构

由图5(a)和图5(b)可知,随着脂肪模拟物含量的增

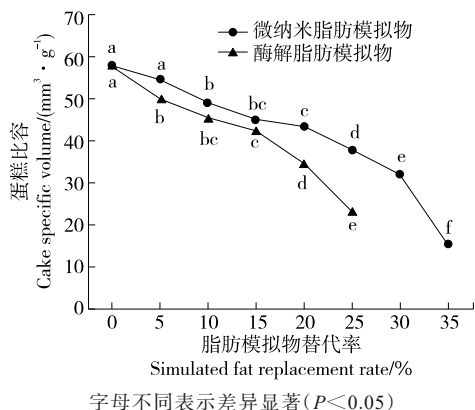


图4 不同替代率脂肪模拟物的戚风蛋糕比容

Figure 4 The specific volume of chiffon cake with different fat mimetic substitution rate

加,戚风蛋糕的硬度和咀嚼度呈上升趋势,可能是因为脂肪模拟物添加过多后对水分的保持能力过强,蛋糕在烘烤过程中阻碍了水分的传递,使得蛋糕的口感和松软度变差,品质下降^[34]。微纳米脂肪模拟物的粒径小,比表面积大,溶解度较好,添加到面糊中能更好地与各种成分融合,搅拌过程中形成较均匀的气泡,焙烤过程中也能将一部分自由水转化为结合水,从而使微纳米脂肪模拟物组戚风蛋糕的硬度和咀嚼度均小于酶解脂肪模拟物组蛋糕。硬度和咀嚼度的变化与蛋糕的比容呈负相关,与Gomea等^[35]的结论相一致。

由图5(c)和图5(d)可知,随着脂肪模拟物含量的增加,戚风蛋糕的弹性和回复性降低,微纳米脂肪模拟物组戚风蛋糕的弹性和回复性总体优于酶解脂肪模拟物组蛋糕。蛋糕的弹性和回复性与蛋糕内部气孔数量有关^[36],因为微纳米脂肪模拟物粒径更小,体系更加均匀稳定,在相同替代率下能较均匀地持有更多气体,形成均匀稳定的气孔结构。但随着脂肪替代率的增加,混合物的内部结构越紧密,搅拌过程中的气体难以进入,且水分持有量增大,使得焙烤过程中蛋糕的气孔形成数量减少,弹性和回复性减小。

2.7 戚风蛋糕的感官评定

由表4可知,在替代脂肪含量相同的情况下,微纳米脂肪模拟物制作的戚风蛋糕感官评分优于酶解物的。当蛋糕外形塌陷严重,失去戚风蛋糕结构细密、气孔分布均匀的特征时为脂肪替代率的最大限度^[37]。酶解脂肪模拟物的最大替代率为25%,此时蛋糕塌陷较严重,其组织状态得分明显低于同替代率下的微纳米组蛋糕;微纳米脂肪模拟物的最大替代率为35%,此时蛋糕的组织状态分值降到最低,但脂肪替代率比酶解脂肪模拟物的提升了10%。

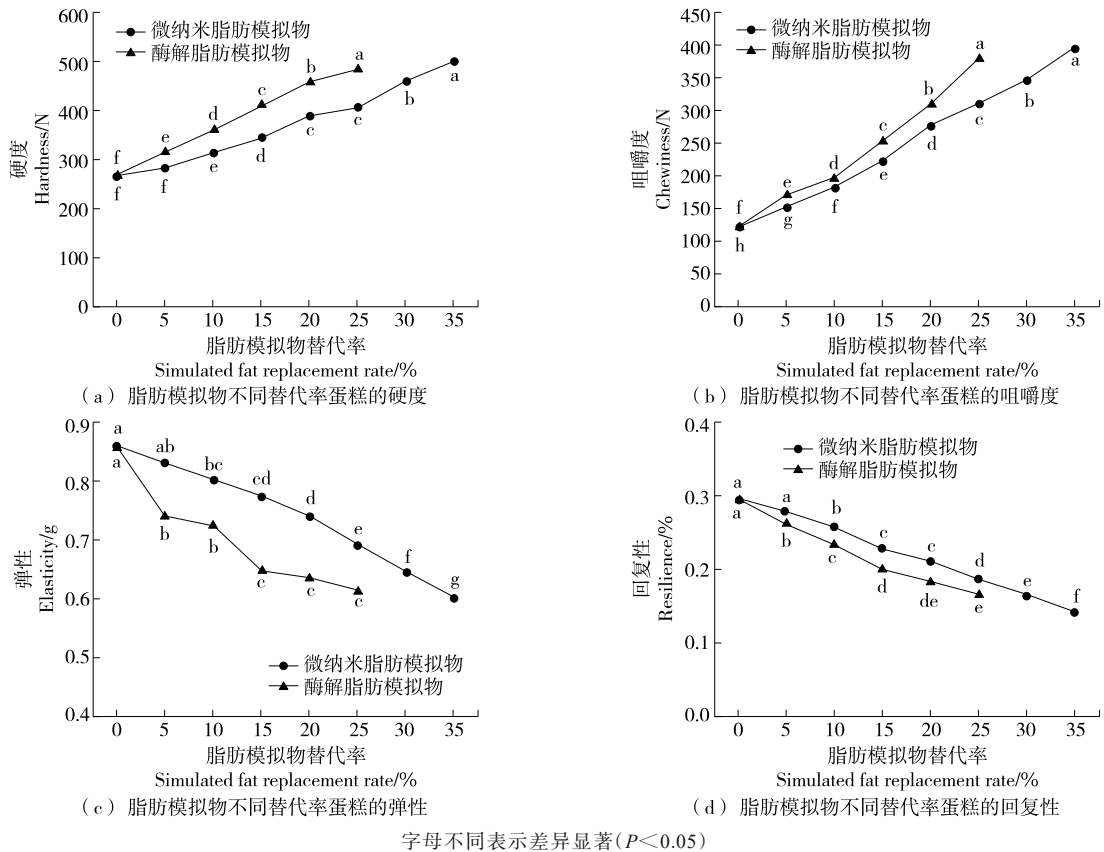


图 5 不同替代率下戚风蛋糕的质构指标

Figure 5 Texture analysis of chiffon cake with different substitution rates

表 4 不同替代率下酶解和微纳米脂肪模拟物的戚风蛋糕感官评分[†]

Table 4 Sensory scores of fat simulants and chiffon cakes with different substitution rates in enzymolysis and micro-nano groups

替代率/%	口感		弹性		切面组织状态		外观形态	
	酶解组	微纳米组	酶解组	微纳米组	酶解组	微纳米组	酶解组	微纳米组
5	26.80±1.11 ^a	27.60±0.75 ^a	18.70±1.17 ^a	18.85±0.93 ^a	27.35±2.11 ^a	27.90±1.02 ^a	17.75±0.79 ^a	18.90±0.79 ^a
10	26.55±0.83 ^{ab}	27.35±0.93 ^a	18.40±1.05 ^a	18.55±1.00 ^{ab}	26.80±0.89 ^a	27.30±1.12 ^a	17.45±1.00 ^a	18.60±1.05 ^{ab}
15	25.95±1.05 ^{bc}	26.15±0.81 ^b	18.35±1.14 ^a	18.25±0.72 ^b	24.95±0.69 ^b	26.10±1.02 ^b	17.20±1.11 ^a	18.30±0.66 ^b
20	25.50±1.15 ^c	25.75±1.16 ^b	17.50±0.76 ^b	17.60±0.60 ^c	20.40±1.23 ^c	25.25±1.83 ^c	16.75±0.97 ^b	17.65±0.67 ^c
25	23.35±1.14 ^d	24.40±0.94 ^c	17.10±0.85 ^b	17.45±0.76 ^c	13.25±1.41 ^d	24.90±0.72 ^c	15.45±1.32 ^b	16.85±0.81 ^d
30		21.05±1.76 ^d		17.20±1.01 ^c		22.30±0.66 ^d		15.20±1.11 ^e
35		20.55±0.69 ^d		16.25±1.21 ^d		20.20±1.11 ^e		14.30±0.73 ^f

[†] 同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

3 结论

试验表明,经动态超高压微射流处理后,酶解脂肪模拟物平均粒径由 3 550.33 nm 降至 532.40 nm,粒径降至微纳米级,溶解度明显提升,分支度降低。与酶解脂肪模拟物相比,微纳米脂肪模拟物的热解速率变慢,热稳定性能

提升。将二者分别应用于戚风蛋糕中替代脂肪时,微纳米脂肪模拟物的脂肪替代率比酶解脂肪模拟物的提升了 10%,且制作的戚风蛋糕的比容、质构特性和感官评分均优于酶解脂肪模拟物制作的蛋糕。后续可进一步研究微纳米脂肪模拟物的晶体结构、相对分子质量等。

参考文献

- [1] 程莹. 黄精杂粮蛋糕的研制及其品质研究[D]. 成都: 成都大学, 2023: 1-10.
CHENG Y. Study on the preparation and quality of polygonatum coarse grain cake[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023: 1-10.
- [2] ZENG X X, WANG M H, 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 Chemistry, 2023, 432: 1-10.
- [3] WILDERJANS E, LUYTS A, BRIJS K, et al. Ingredient functionality in batter type cake making[J]. Trends Food Science & Technology, 2013, 30(1): 6-15.
- [4] 陈欢, 曹婷, 唐清苗, 等. 基于碳水化合物低热量脂肪模拟物研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(11): 187-195.
CHEN H, CAO T, TANG Q M, et al. Progress of the research on carbohydrate-based low-calorific fat substitutes[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(11): 187-195.
- [5] 程婷婷. 脂肪模拟物一大豆分离蛋白与蛋清蛋白复配物的制备与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 2-4.
CHENG T T. Preparation and application of fat analogue produced by soy protein isolate and egg white protein compound [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022: 2-4.
- [6] ASHOK R P, REED A N, ALEJANDRO G M. Applications of fat mimetics for the replacement of saturated and hydrogenated fat in food products[J]. Food Science, 2020, 33: 61-68.
- [7] TOMASIK P. Specific physical and chemical properties of potato starch[J]. Global Science Books, 2009(1): 45-56.
- [8] PARK J J, OLAWUYI I F, LEE W Y. Characteristics of low-fat mayonnaise using different modified arrowroot starches as fat replacer[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 215-223.
- [9] 刘颖, 刘羽萌, 窦博鑫. 不同DE值马铃薯淀粉基脂肪模拟物性质研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(11): 6-11.
LIU Y, LIU Y M, DOU B X. Study on characteristics of potato starch based fat mimics with different DE values[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(11): 6-11.
- [10] LI C, SUN P D, YANG C. Emulsion stabilized by starch nanocrystals[J]. Starch-Stärke, 2012, 64(6): 497-502.
- [11] 丛美娟, 郭华. 酶解马铃薯淀粉制备脂肪模拟品的研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(10): 1 369-1 373.
CONG M J, GUO H. Preparation of fat substitute using enzymatic denatured potato starch[J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(10): 1 369-1 373.
- [12] 盛鑫森, 王蕊, 王岩, 等. 复合酶法制备马铃薯脂肪模拟物工艺研究[J]. 农业科技与装备, 2020(1): 48-50, 53.
SHENG X M, WANG R, WANG Y, et al. Study on preparation of potato fat simulation by complex enzymes[J]. Agriculture Science & Technology Equipment, 2020(1): 48-50, 53.
- [13] PENG X, YAO Y. Carbohydrates as fat replacers[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2017, 8(1): 331-351.
- [14] COLLA K, COSTANZO A, GAMLATH S. Fat replacers in baked food products[J]. Foods, 2018, 7(12): 192.
- [15] 张斌, 罗发兴. 马铃薯淀粉基脂肪模拟物性质研究[J]. 粮食与油脂, 2010(1): 12-15.
ZHANG B, LUO F X. Study on characteristics of potato starch based fat mimics[J]. Cereals & Oil, 2010(1): 12-15.
- [16] 曹梦梦, 刘一鲲, 陈兴, 等. 动态高压微射流技术制备乳液运载体的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 474-482.
CAO M M, LIU Y K, CHEN X, et al. Research progress on emulsion-based delivery systems produced from dynamic high pressure microfluidization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 474-482.
- [17] 涂宗财, 汪菁琴, 刘成梅, 等. 动态超高压均质制备纳米级蛋白及其功能特性的研究[J]. 食品工业科技, 2007(2): 89-91, 95.
TU Z C, WANG Q Q, LIU C H, et al. Preparation and functional properties of nano-protein by high-pressure microfluidization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2007(2): 89-91, 95.
- [18] 郭泽斌, 曾绍校, 郑宝东. 超高压处理对莲子淀粉理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(11): 118-123.
GUO Z B, ZENG S X, ZHENG B D. Effect of ultra high pressure processing on the physicochemical properties of lotus-seed starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(11): 118-123.
- [19] KANDORI K, KURODA T, TOGASHI S, et al. Preparation of calcium hydroxyapatite nanoparticles using microreactor and their characteristics of protein adsorption[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2011, 115(4): 653-659.
- [20] CROCHET P, BEAUXIS-LAGRAVE T, NOEL T R, et al. Starch crystal solubility and starch granule gelatinisation[J]. Carbohydrate Research, 2005, 340(1): 107-113.
- [21] 谢宇, 张宏伟. 高压微射流对木薯淀粉性质结构的影响[J]. 造纸科学与技术, 2013, 32(6): 72-75, 160.
XIE Y, ZHANG H W. Study on paper and paper products technical trade measures[J]. Paper Science & Technology, 2013, 32(6): 72-75, 160.
- [22] 万婕, 刘成梅, 李佩, 等. 动态高压微射流作用对膳食纤维结晶结构的影响[J]. 高压物理学报, 2012, 26(6): 639-644.
WAN J, LIU C M, LI S, et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization on the crystal structure of dietary fiber[J]. Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(6): 639-644.
- [23] 黄佳卉, 赵雷, 朱杰, 等. 酶解—动态高压微射流制备纳米淀粉及其结构性质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 127-133.
HUANG J H, ZHAO L, ZHU J, et al. Nano-starch and its structural properties prepared from enzymolysis-dynamic high pressure micro-fluidization[J]. Science and Technology of

- Food Industry, 2024, 45(8): 127-133.
- [24] KASEMWONG K, RUKTANONCHAI U R, SRINUANCHAI W, et al. Effect of high-pressure microfluidization on the structure of cassava starch granule[J]. Starch-Stärke, 2011, 63(3): 160-170.
- [25] 涂宗财, 尹月斌, 张璆, 等. 动态高压微射流对玉米直链淀粉结构的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(5): 1 379-1 382. TU Z C, YIN Y B, ZHANG Q, et al. Effect of dynamic high-pressure micro-fluidization on the structure of maize amylose[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(5): 1 379-1 382.
- [26] 官印珑, 周丽妍, 王辉, 等. 动态高压微射流对刺梨果渣膳食纤维及其抑制淀粉消化和葡萄糖扩散的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 79-86. GUAN Y L, ZHOU L Y, WANG H, et al. Impact of dynamic high pressure microfluidization on dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt. pomace and its inhibitory capacity against starch digestion and glucose diffusion[J]. Food Science, 2022, 43(9): 79-86.
- [27] 敬思群, 王德萍, 周苗苗, 等. 动态高压下大豆分离蛋白/多糖复合物表征[J]. 食品工业, 2021, 42(11): 197-201. JING S Q, WANG D P, ZHOU M M, et al. Characterization of soy protein isolate/polysaccharide complex under DHPM[J]. Food Industry, 2021, 42(11): 197-201.
- [28] BERANOVA L, HUMPOLICKOVA J, HOF M. Principles and applications of fluorescence lifetime correlation spectroscopy [J]. Proceeding of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2009, 7 356: 121-127.
- [29] 嵇威, 刘军, 杨进洁, 等. 动态高压微射流环境中豌豆白蛋白—绿原酸复合物的相互作用[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 74-81. JI W, LIU J, YANG J J, et al. Interaction of pea albumin with chlorogenic acid in a dynamic high pressure microfluidization environment[J]. Food Science, 2023, 44(6): 74-81.
- [30] 张奎亮, 代养勇, 侯汉学, 等. 超声处理对马铃薯淀粉结构特性及理化性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 128-134. ZHANG K L, DAI Y Y, HOU H X, et al. Effect of ultrasonic treatment on structure and physicochemical properties of potato starch[J]. Food Science, 2018, 39(5): 128-134.
- [31] 王雪, 李冰, 李琳, 等. 羟丙基甲基纤维素对 Par-baking 戚风蛋糕品质改善的研究[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 276-282. WANG X, LI B, LI L, et al. Effect of HPMC on improving the quality of the Par-baking chiffon cake[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(6): 276-282.
- [32] 阮征, 李赛, 李旭涵, 等. 青稞粉粒径及其高添加量对戚风蛋糕面糊特性和品质的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(7): 205-216. RUAN Z, LI S, LI X H, et al. Effects of grain size and high addition of highland barley powder on the characteristics of batter and quality of chiffon cake[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 205-216.
- [33] 阮少龙, 周建伟, 高德, 等. 纳米淀粉基皮克林乳液的研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 312-320. RUAN S L, ZHOU J W, GAO D, et al. Research progress on nanostarch-based pickering emulsion[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 312-320.
- [34] 刘海波, 付文军, 郑万琴, 等. 不同粒度甘薯渣纤维对面包品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(4): 51-58. LIU H B, FU W J, ZHENG W Q, et al. Effects of different particle size of sweet potato residue cellulose on bread quality [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(4): 51-58.
- [35] GOMEA M, MANCHON L, OLIVIERE B, et al. Adequacy of wholegrain non-wheat flours for layer cake elaboration[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(3): 507-513.
- [36] RODRIGUEZ-GARCIA J, SALVADOR A, HERNANDO I. Replacing fat and sugar with inulin in cakes: bubble size distribution, physical and sensory properties[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 7(4): 964-974.
- [37] 张仲柏, 汪月, 牛黎莉, 等. 马铃薯泥对戚风蛋糕品质特性的影响[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(3): 39-44. ZHANG Z B, WANG Y, NIU L L, et al. Effect of mashed potatoes on quality characteristics of chiffon cake[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2017, 53(3): 39-44.