

糯米粉对海绵蛋糕烘焙品质及老化特性的影响

Effects of glutinous rice flour on the baking and aging characteristics of sponge cake

于书蕾¹ 姜鹏飞¹ 王 丹² 祁立波¹ 尚 珊¹

YU Shulei¹ JIANG Pengfei¹ WANG Dan² QI Libo¹ SHANG Shan¹

(1. 大连工业大学食品学院国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁 大连 116034;

2. 阜新小东北食品有限公司, 辽宁 阜新 123000)

(1. National Engineering Research Center of Seafood, School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China;

2. Fuxin Xiaobei Food Co., Ltd., Fuxin, Liaoning 123000, China)

摘要:目的:开发具有糯米风味的海绵蛋糕。方法:探究糯米粉质量分数对面糊流变特性和密度,海绵蛋糕比容、烘焙损失率、感官评价、气孔分布和微观结构以及贮藏 7 d 后蛋糕的质构特性、水分分布、淀粉有序度和结晶度的影响。结果:对照组和 100%糯米粉组蛋糕随糯米粉质量分数的增加,面糊密度降低,蛋糕比容增大且气孔分布更均匀;高质量分数的糯米粉(75%~100%)能有效延缓蛋糕的老化。当糯米粉质量分数为 75%时,蛋糕的滋味和总体喜好程度最佳。结论:糯米粉质量分数为 75%~100%较为适宜,糯米粉的添加赋予了海绵蛋糕更好的品质。

关键词:糯米粉;小麦粉;海绵蛋糕;微观结构;感官评价;老化特性

Abstract: Objective: This study aimed to develop a new type of sponge cake with glutinous rice flavor. **Methods:** To investigate the impact of different glutinous rice flour substitutions in the prepared baking flour on the rheological properties, density of batter, specific volume, baking loss rate, sensory evaluation and pore size distribution of cake were investigated. Also, the texture analysis, moisture distribution, starch ordered structure and crystallinity of cake after 7 days of storage were measured. **Results:** With the increasing substitution of glutinous rice flour, the batter density reduced, improving the specific volume and the pore size distribution. Effectively delaying the retrogradation of cake is possible with high glutinous rice flour substitution

(75%~100%). When the glutinous rice flour mass fraction is 75%, the cake tastes best and has the best degree of general preference. **Conclusion:** The mass fraction of glutinous rice flour 75%~100% is more suitable, and the addition of glutinous rice flour gives better quality to sponge cake, which can have important guiding significance for the development of pure glutinous rice flour gluten-free products.

Keywords: glutinous rice flour; wheat flour; sponge cake; microstructure; sensory evaluation; aging characteristics

为了满足消费者的需求,在蛋糕加工过程中添加具有营养价值的原料替代部分传统面粉,使蛋糕的营养价值更加丰富和多样化已成为烘焙行业发展趋势^[1]。海绵蛋糕是由面粉、糖、鸡蛋制成,利用蛋白质高起泡性使蛋液打发时充入大量的空气,形成无数细小的泡沫,所制作的蛋糕具有多孔绵结构,类似于海绵,因而得名海绵蛋糕^[2]。传统的海绵蛋糕是由面筋蛋白含量低于 9%的低面筋面粉制作而成,但部分人群食用后会发生过敏反应,从而诱发乳糜泻疾病^[3]。米粉因味道温和、低过敏且易于消化等特点,更适合于乳糜泻患者食用^[4]。

水稻是中国最广泛种植的农作物,主要包括糯米、粳米和籼米。Chompoorat 等^[5]用米粉与红小豆按照一定比例复配,研究了米粉添加量对面糊流变特性与蛋糕品质的影响,根据扫描频率测试可知,米粉增加了面糊的稠度和黏弹性,表现出类似固体的行为。陈凤莲等^[6]研究了不同米粉品种和粒度对面糊特性及蛋糕品质的影响,得出粒度为 120 目的粳米粉成品的感官评分最高。王丽等^[7]以籼米、粳米、糯米替代低筋面粉,采用感官、质构、比容等指标评价了米粉对蛋糕品质的影响,得出籼米粉蛋糕比容最大,外观最好,但口感稍差,糯米粉蛋糕口感较好。

基金项目:辽宁省“揭榜挂帅”项目(编号:2022JH1/10400019)

作者简介:于书蕾,女,大连工业大学在读硕士研究生。

通信作者:尚珊(1988—),女,大连工业大学工程师,硕士。

E-mail: 718586131@qq.com

收稿日期:2023-05-04 **改回日期:**2023-09-18

市面上制作蛋糕的原料主要是小麦粉,对于糯性大米蛋糕的研究较少。糯米粉中淀粉和蛋白质占例较大,而且直链淀粉含量较低,支链淀粉含量较多(达 95%~100%),所以不易老化^[3,8]。研究拟考察糯米粉添加量对海绵蛋糕品质的影响,以混合面粉粉质特性、面糊流变特性和密度、蛋糕比容、烘焙损失率、微观结构、质构特性、红外光谱淀粉有序度及淀粉结晶度等为指标,确定海绵蛋糕中最适宜的糯米粉添加量,以期对无麸质全糯米产品的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

鲜鸡蛋:大连洪家畜牧有限公司;
低筋小麦粉:上海枫未实业有限公司;
糯性大米粉:朝阳泰然科技食品有限公司;
泡打粉:安琪酵母股份有限公司;
一级糖霜:江西巧嫂食品有限公司;
牛奶:内蒙古蒙牛乳业股份有限公司。

1.2 仪器与设备

打蛋器:DDQ-A30D3 型,广东小熊电器有限公司;
Rational 万能蒸烤箱:ICP101E 型,德国莱欣诺公司;
流变仪:DHR-2 型,上海 TA 仪器有限责任公司;
核磁共振成像分析仪:Meso QMR23-060H 型,上海纽迈电子科技有限公司;
质构仪:Stable Micro Systems TA, XT, plus 型,英国 SMS 公司;
冷冻干燥机:Coolsafe 110-4 型,丹麦 Labogene 公司;
傅立叶变换红外光谱仪:Frontier FT-IR 型,日本铂金埃尔默仪器有限公司;
热场发射扫描电镜:JSM-7800F 型,日本电子株式会社;
混合实验仪:Mixolab 2 型,特雷首邦(北京)贸易有限公司;
X-射线衍射仪:7000 S 型,日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 蛋糕制作

(1) 海绵蛋糕基础配方:新鲜鸡蛋 120 g、小麦粉 100 g、糖 45 g、牛奶 20 g、泡打粉 3 g。

(2) 工艺流程

鸡蛋液打发→添加辅料、混合→面糊→烘烤→冷却→脱模→成品

(3) 操作要点

① 蛋液打发:将蛋液放入无水容器中,用打蛋器进行打发,分 3 次均匀加入糖粉,打发至蛋液体积为原来的 3 倍即可。

② 混合、过筛:将两种面粉按照设置的比例,即糯米粉质量分数为 0%(对照组),25%,50%,75%,100%,充

分混匀,将面粉分 3 次过筛(60 目)加入到打发的蛋液中。

③ 调糊、入模:用硅胶铲缓慢将面粉混合均匀,翻拌至无粉质颗粒即可。再迅速倒入模具中,每个模具装相同质量的面糊(50 g),轻微震荡排除气泡。

④ 烘焙:烤箱提前预热,温度设定为 150 ℃,烘烤 40 min。

⑤ 成品冷却:将蛋糕从烤箱取出,室温自然冷却 1 h,用于后续指标测定。

1.3.2 面粉 Mixolab 混合实验仪测定 根据文献[9]。根据面粉的吸水率确定加水量,以获得 C1 值为(1.1±0.05) N·m 的面团。Mixolab 的各区间含义见表 1。

表 1 混合实验仪测定指标所表示的特性

Table 1 Characteristics expressed by the measurement index of the mixing experimenter

参数	含义
C1	揉混面团时扭矩最大值,用于测定吸水率
C2	用于反映在机械力和温度作用下蛋白质的弱化程度
C3	峰值黏度,用于测定淀粉的糊化特性
C4	最低黏度,用于测定淀粉的糊化特性
C5	用于测定冷却过程中淀粉的回生特性
C3-C2	反映淀粉糊化特性
C5-C4	反映淀粉回生速度

1.3.3 面糊动态流变测定 根据文献[5]并修改。平板直径 40 mm,夹缝距离 1 mm;剪切速率为 0.1~100 s⁻¹,扫描频率为 0.1~10 Hz,形变量为 0.06%,得到储能模量 G'和损耗模量 G''。

1.3.4 面糊密度测定 根据文献[10],按式(1)计算面糊密度。

$$\rho = \frac{M_1 - M_0}{M_2 - M_0}, \quad (1)$$

式中:

ρ ——面糊密度, g/cm³;

M_0 ——容器质量, g;

M_1 ——面糊质量, g;

M_2 ——清水质量, g。

1.3.5 蛋糕烘焙损失率及比容测定 根据文献[7,11],按式(2)、式(3)分别计算烘焙损失率和蛋糕比容。

$$B = \frac{W_1 - W_2}{W_1}, \quad (2)$$

$$P = \frac{V}{m}, \quad (3)$$

式中:

B——烘焙损失率, %;

W_1 ——烘焙前面糊重量, g;

W_2 ——烘焙后蛋糕重量, g;

P ——蛋糕比容, mL/g;
 V ——蛋糕体积, mL;
 m ——蛋糕质量, g。

1.3.6 蛋糕气孔测定 根据文献[12]并修改。蛋糕切片后用扫描仪进行扫描,并对每张图片的中间部分(3 cm×3 cm)进行裁剪。通过 Image J 软件分析,图像分辨率设置为 600 dpi,计算气孔密度和孔隙率。

1.3.7 蛋糕感官评价分析 根据文献[7]修改:由 15 位具有一定分辨差别能力的人员(5 男 10 女)组成感官评定小组。选定的海绵蛋糕的感官属性包括形态、弹柔性、气味、口感、内部组织结构。感官评分标准参考 GB/T 24303—2009 制定(表 2)。

1.3.8 微观结构 根据文献[13],将样品冷冻干燥,喷金后,分别观察放大 50,2 000 倍后扫描显微镜下的微观结构。

1.3.9 贮藏期间蛋糕质构测定 根据文献[6,14]并修改。蛋糕样品冷却后,将蛋糕中间片切成 3 cm×3 cm×1.5 cm 立方块。使用质构分析仪进行压缩试验,测量蛋糕质构特性。测试条件:探头型号 P/50,压缩程度为 25%,测试前、中、后速度分别为 3,1,5 mm/s。

1.3.10 贮藏期间蛋糕水分分布测定 根据文献[12]并修改。取不同贮藏时间的蛋糕芯用保鲜膜包住,以避免

失水。用 CPMG 序列测量松弛时间(T_2),试验参数:等待时间 2 500 ms;回波时间 0.25 ms;重复扫描次数 4;回波次数 1 800。

1.3.11 X 射线分析 根据文献[15]并修改。将老化 0,3,7 d 蛋糕芯的样品冷冻干燥,粉碎并过筛,用 X 射线衍射仪测量蛋糕 X 射线图谱。衍射角扫描区域 2θ 为 $10^\circ\sim 40^\circ$,扫描速度 $4(^\circ)/\text{min}$ 。

1.3.12 傅里叶变化红外光谱(FT-IR)测定 根据文献[16]并修改。采用 KBr 压片法,按 $m_{\text{样品}}:m_{\text{溴化钾}}$ 为 1:100 混合,于玛瑙研钵中粉碎,压成透明均一的晶片。扫描波数范围 $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$,分辨率为 4 cm^{-1} 。

1.4 数据处理

所有数据为 3 次平行测量的平均值,用“平均值±标准差”表示。用 Origin 2021 软件作图,SPSS 22.0 软件进行显著检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 糯米粉对面团热机械学特性的影响

由图 1 和表 3 可知,不同组别混合面粉的混合仪数值有着一定的变化趋势,面团的吸水率值符合其目标扭矩 C1 为 $(1.1\pm 0.05)\text{ N}\cdot\text{m}$ 所需求的水分要求[17]。峰值黏度(C3)显示了淀粉结合水能力与淀粉酶活性大小,与最终产品的质量有关;峰值黏度先增大后减小,造成这种差异的原因是糯稻中几乎不含直链淀粉,其淀粉组分和淀粉粒结构与非糯性米存在明显的差异[18]。淀粉回生由 C5 和 C5-C4 的差值表示,随着糯米粉比例的增加,C5 与 C5-C4 值下降,说明加入糯米粉会降低小麦/糯米混粉面团回生程度。这可能是因为糯米粉支链淀粉含量较高,直链淀粉含量较低,不易发生老化或老化速率较慢[3]。

2.2 糯米粉对面糊流变特性的影响

G' 表示固体特性, G'' 表示液体性质。由图 2 可知,不同组别的面糊在 0.1~10.0 Hz 范围内,每个样品 G' 值大于相应的 G'' 值,因此样品表现为黏弹性固体性质[19]。对

表 2 感官评价表
Table 2 Sensory evaluation table

项目	标准	分值
形态	底部无塌陷、上部有较大弧度、表面光滑无斑点	10~15
	底部较塌陷、上部有一定弧度、略有白粉或斑点	6~9
	底部塌陷严重、上部弧度较小,表面不光洁	0~5
弹柔性	柔软有弹性,按下去复原很快	10~15
	柔软较有弹性,按下去复原较快	6~9
	柔软性、弹性差,按下去较难复原	0~5
气味	有浓郁的大米蛋糕香气且香味浓郁	10~15
	大米蛋糕的香味较淡	6~9
	无大米蛋糕香味或有异味	0~5
口感	具有烘烤后蛋糕香味、口感细腻香甜、不粘牙	10~15
	稍绵软、稍粘牙	6~9
	绵软性较差、松散、粘牙	0~5
	内部结构	
内部结构	气孔均匀呈细密蜂窝状、无大孔洞	10~15
	气孔偏大、较均匀、稍粗糙	6~9
	有明显大气孔且分布不均匀,切片断裂掉渣	0~5
总体接受度	综合根据形状、弹柔性、气味、口感内部结构及自身喜好进行打分	15

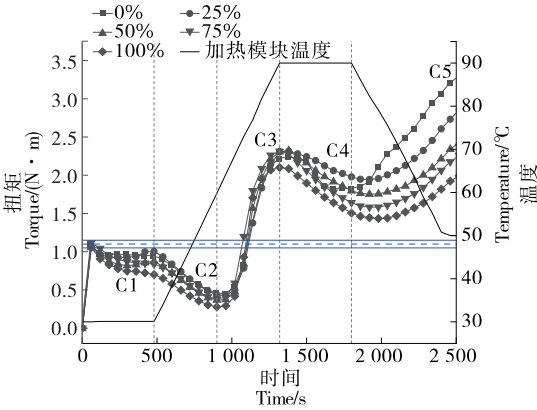


图 1 混合试验曲线图
Figure 1 Curve of mixolab plot

表 3 小麦—糯米粉不同添加比例混合仪参数[†]

Table 3 Mixolab parameters of sponge cake flour with different substitution of glutinous rice flour								
糯米粉质量分数/%	吸水率	C1	C2	C3	C4	C5	C3—C2	C5—C4
0	59.80±0.20 ^b	1.07±0.01	0.44±0.02 ^a	2.25±0.01 ^c	1.81±0.02 ^b	3.38±0.05 ^a	1.80±0.01 ^c	1.57±0.04 ^a
25	58.70±0.00 ^d	1.08±0.03	0.41±0.01 ^b	2.33±0.00 ^a	1.94±0.04 ^a	3.01±0.12 ^b	1.91±0.00 ^b	1.07±0.08 ^a
50	58.30±0.00 ^e	1.10±0.01	0.36±0.01 ^c	2.34±0.01 ^a	1.73±0.02 ^c	2.53±0.04 ^c	1.97±0.00 ^a	0.81±0.02 ^b
75	59.53±0.06 ^c	1.10±0.04	0.38±0.00 ^c	2.29±0.02 ^b	1.59±0.02 ^d	2.39±0.02 ^d	1.91±0.02 ^b	0.80±0.03 ^b
100	61.63±0.12 ^a	1.12±0.01	0.28±0.00 ^d	2.10±0.01 ^d	1.41±0.02 ^e	2.09±0.04 ^c	1.82±0.02 ^c	0.68±0.02 ^c

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

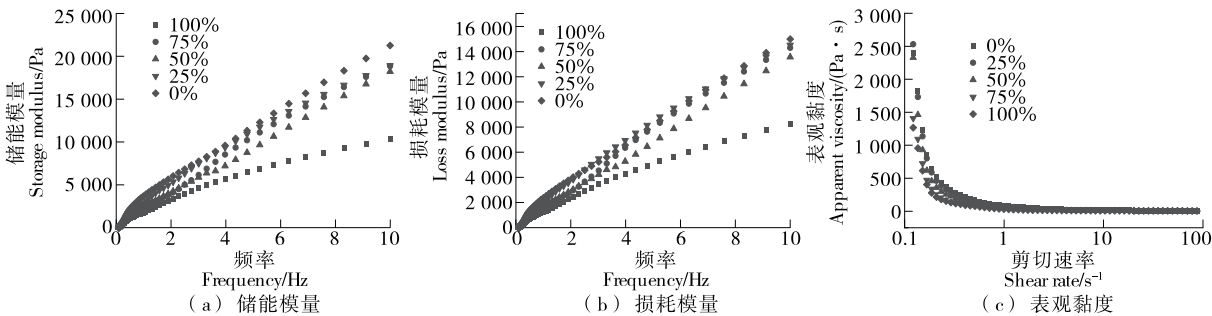


图 2 不同糯米粉质量分数下海绵蛋糕面糊的流变特性

Figure 2 The rheological properties of sponge cake batter with different contents of glutinous rice flour

照组黏弹性大于添加糯米粉组,可能是因为小麦粉中含有面筋蛋白,形成了面筋网络结构^[6]。所有样品均表现出非牛顿行为,即面糊黏度随剪切速率的增加而降低^[4]。对照组蛋糕糊黏性大于添加糯米粉组,这主要与小麦蛋白中麦谷蛋白和麦胶蛋白的含量有关;稻米中谷蛋白含量占米蛋白的 80%左右,但胶蛋白只占 5%左右;与小麦粉相比,米粉中的胶蛋白含量较少,从而使其所形成的蛋糕糊黏性大大降低^[6],与王晓瑞^[11]的结论一致。

2.3 糯米粉对蛋糕糊面糊密度的影响

由图 3 可知,与对照组相比,随着糯米粉质量分数的增加,面糊密度显著下降($P<0.05$),糯米粉质量分数为 100%时蛋糕面糊比重显著降低,为 0.67 g/cm³。加入糯米粉后密度下降是因为黏度适中,有利于蛋糕糊在搅拌过程中气泡的进入和保持^[13,20]。

2.4 糯米粉对蛋糕烘焙损失率和比容的影响

由图 4(a)可知,随着糯米粉质量分数的增加,蛋糕的烘焙损失率下降。当糯米粉质量分数为 100%时,烘焙损失率为 13.59%,明显低于对照组($P<0.05$),表明糯米粉的添加有利于改善面糊的持水性,可以使面糊内部蛋白质、淀粉等物质与水分结合状态变得更紧密^[11,21]。

由图 4(b)可知,随着糯米粉质量分数的增大,蛋糕比容显著增加($P<0.05$)。添加糯米粉使蛋糕糊在烘烤中淀粉糊化完全,蛋糕膨胀度大,比容升高^[11,22]。对照组蛋糕比容值最低(为 1.80 mL/g),可能是因为此时面糊黏度

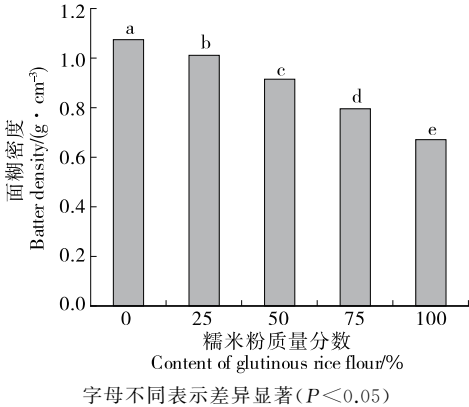


图 3 不同糯米粉质量分数下海绵蛋糕面糊的密度

Figure 3 The density of sponge cake with batter different contents of glutinous rice flour

过高,不利于气泡进入面糊。一般来说,高黏度面糊在烘焙过程中可以减慢气泡逸出速率,提高气体保持率。相反,面糊黏度过大则不利于烘焙过程中气泡的膨胀,使终产品体积更小^[12,23],与王丽等^[7]的研究结果一致。

2.5 糯米粉对蛋糕气孔分布的影响

孔隙率代表蛋糕中气孔的体积百分比,与蛋糕比容呈正相关;气孔密度代表蛋糕中的气孔数量^[24]。多孔结构与更软、更轻的蛋糕内部结构有关,与更高的感官质量有关。由图 5 和表 4 可知,随着糯米粉质量分数的增大,蛋糕的气孔密度和孔隙率显著增加($P<0.05$),对照样

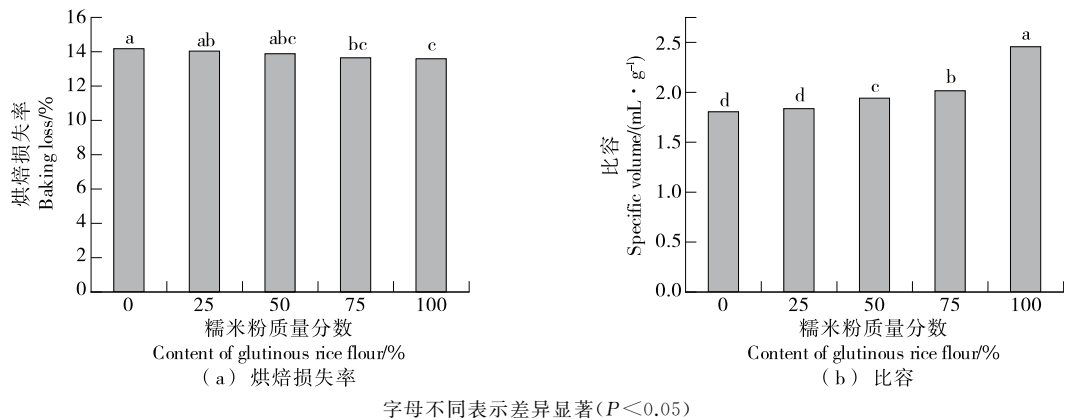


图 4 不同糯米粉质量分数下海绵蛋糕的烘焙损失率和比容
Figure 4 The baking loss and specific volume of sponge cake with different contents of glutinous rice flour

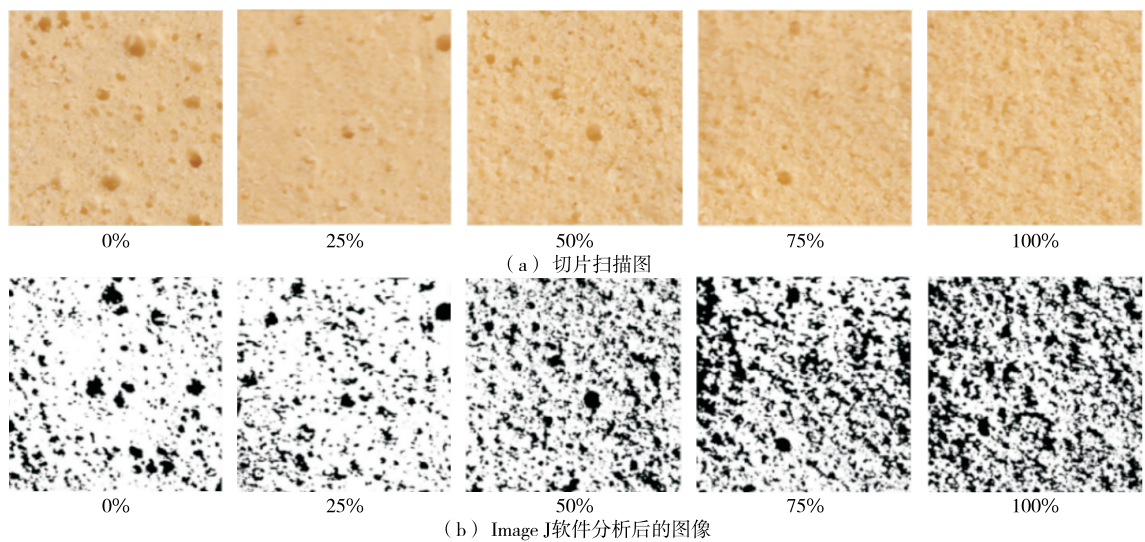


图 5 不同糯米粉质量分数下海绵蛋糕的气孔分布
Figure 5 The pore size of sponge cake with different contents of glutinous rice flour

表 4 糯米粉质量分数对蛋糕气孔分布的影响[†]

Table 4 Effect of different substitution of glutinous rice flour on the distribution of pores in cake

糯米粉质量分数 / %	气孔密度 / mm ⁻²	孔隙率 / %
0	781.00 ± 77.66 ^b	13.99 ± 3.65 ^b
25	867.00 ± 128.95 ^b	17.61 ± 6.31 ^{ab}
50	1 268.00 ± 39.95 ^a	22.72 ± 0.97 ^a
75	1 264.67 ± 156.37 ^a	22.79 ± 2.20 ^a
100	1 384.67 ± 107.61 ^a	22.91 ± 3.08 ^a

[†] 字母不同表示差异显著 (P < 0.05)。

品的气孔密度与孔隙率显著低于糯米粉质量分数为 100% 组的, 二者相比加入糯米粉后, 气孔密度和孔隙率分别提高了 43.60%, 7.15%。王晓瑞^[1] 研究表明, 加入 30% 糯米粉会增加蛋糕的气孔密度和孔隙率。

2.6 糯米粉对蛋糕感官评定的影响

由图 6 可知, 海绵蛋糕添加糯米粉后感官评分显著

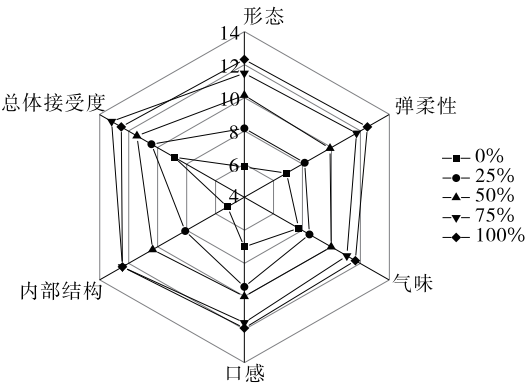


图 6 不同糯米粉质量分数下海绵蛋糕的感官评价
Figure 6 Sensory evaluation of sponge cake with different contents of glutinous rice flour

升高 (P < 0.05)。当糯米粉质量分数为 25% 时, 海绵蛋糕的感官评分与对照组差异不大; 当糯米粉质量分数 ≥ 50% 时, 海绵蛋糕在形态、弹性等方面得分较高。由

图 7 可知,随着糯米粉质量分数的增加,蛋糕的表面变得饱满且底部无塌陷出现,蛋糕内部结构气孔均匀,无大空洞;对照组蛋糕底部发生皱缩塌陷,对蛋糕外观产生不利影响。海绵蛋糕整体可接受性最高组为糯米粉 75% 组(13.17 分),其次为糯米粉 100% 组(12.50 分)。

2.7 糯米粉对蛋糕微观结构的影响

蛋糕内蛋白质气孔壁越光滑,气孔膜上孔洞越少,蛋白质网络外裸露的淀粉颗粒越少,蛋糕结构越佳^[12]。由图 8(a)可知,添加小麦粉组蛋糕可以观察到淀粉颗粒,说

明淀粉未完全糊化且糊化不均匀;糯米粉质量分数 100% 组表面光滑,观察不到裸露的淀粉颗粒,淀粉糊化完全且淀粉全部包裹在蛋白质网络结构中^[25]。由图 8(b)可知,对照组蛋糕内气孔壁上孔洞小而密,加入糯米粉后变得大而疏松,说明糯米粉组蛋糕在烘焙过程中向气孔外部扩散的气体量大,会导致蛋糕烘焙过程中气体膨胀率增加,与比容的结果一致,并与王家宝^[12]的研究结果一致。对照组气孔密集,使蛋糕内部结构过于密实,也是导致蛋糕硬度增加的原因之一^[23,26]。



图 7 糯米粉质量分数对蛋糕外观的影响

Figure 7 The appearance of sponge cake with different contents of glutinous rice flour

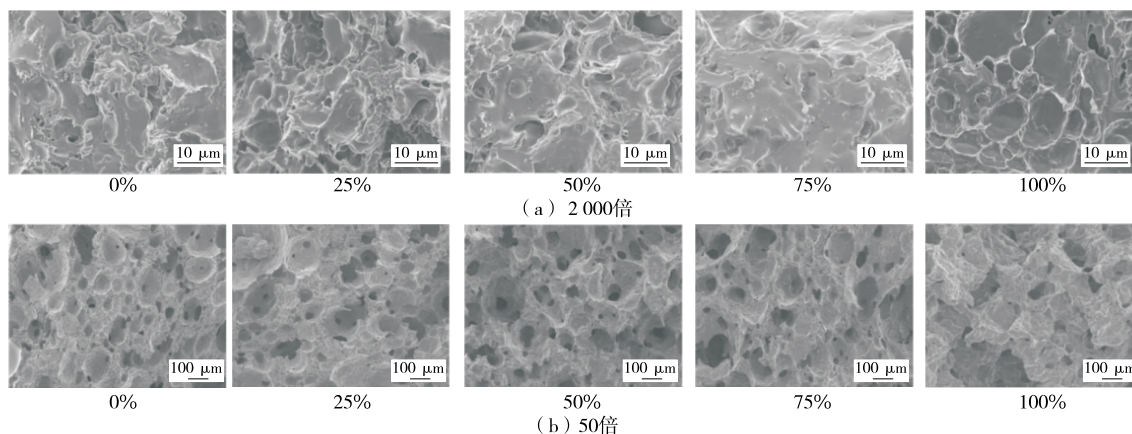


图 8 糯米粉质量分数对海绵蛋糕微观结构的影响

Figure 8 The microstructure of sponge cake with different contents of glutinous rice flour

2.8 糯米粉对贮藏期间蛋糕质构特性的影响

由图 9 可知,蛋糕的硬度和咀嚼度随贮藏时间的延长而增加,可能是蛋糕在贮藏期间水分含量下降,淀粉重结晶,使蛋糕硬度和咀嚼度增加^[15]。贮藏 7 d 后,添加糯米粉组硬度值小于对照组,与 Wang 等^[3]的研究结果一致。与支链淀粉相比,直链淀粉更容易老化,因为直链淀粉线性区域长,更容易整齐排列;支链淀粉不易老化是因为形成的立体形的空间位阻对有序构象造成了干扰^[3]。

2.9 糯米粉对贮藏期间水分分布的影响

由表 5 可知, A_{21} 代表不易流动的结合水, A_{22} 代表半结合水, A_{23} 代表易流动的自由水。随着贮藏时间的延长, A_{23} 的峰面积增大,表明蛋糕在贮藏过程中产生了更多的自由水。贮藏 7 d 后,糯米粉 100% 组水分波动最小,结合水下降了 13.08%,自由水升高了 6.30%;而对照组结合水下降了 47.31%,自由水升高了 52.22%,说明添

加糯米粉后,蛋糕保水性能增加,减少了自由水的形成。

2.10 糯米粉对贮藏期间红外光谱的影响

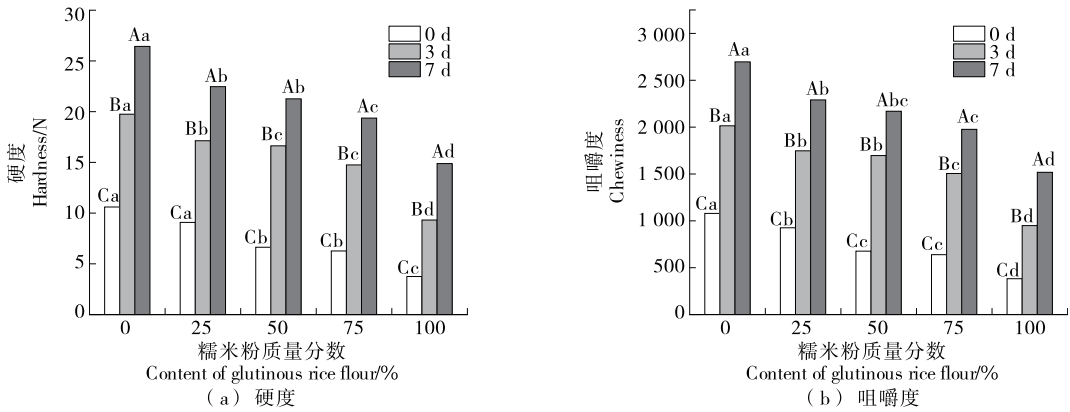
1 047/1 022 cm^{-1} 峰强度比值能够反映淀粉分子的有序程度,其比值越大,有序度越高,淀粉老化程度越大^[16,27]。由图 10 可知,蛋糕贮藏 0, 3, 7 d 后,1 047/1 022 cm^{-1} 处的峰值强度显著增加($P < 0.05$),淀粉发生回生现象。对照组在贮藏 7 d 后,1 047/1 022 cm^{-1} 比值增加了 31.75%;添加糯米粉后,1 047/1 022 cm^{-1} 比值增加有所减缓且数值较小。说明添加糯米粉后可以在一定程度上减少淀粉有序度的增加,有效延缓了淀粉回生,这可能是因为糯米粉中支链淀粉含量较高,不易老化,可降低淀粉有序度。一般来说,较高的直链淀粉含量通常会导致淀粉类食品更快老化^[28]。

2.11 糯米粉对贮藏期间相对结晶度的影响

蛋糕样品贮藏 7 d 后在 2θ 为 17° 和 20° 处出现衍射

峰,表明蛋糕发生了回生,淀粉形成 V 型和 B 型结晶^[15,27]。由表 6 可知,随着贮藏时间的增加,相对结晶度增加。与贮藏 0 d 的相比,对照组贮藏 7 d 的相对结晶度升高了 18.37%,糯米组 100% 组的升高了 11.36%,说明

糯米粉延缓了蛋糕老化程度。这与糯米粉中直链淀粉含量较高有关,与支链淀粉相比,直链淀粉更容易老化,因为直链淀粉具有螺旋状的空间结构,空间屏障小,容易凝结。直链淀粉主要通过分子间氢键形成双螺旋,形成更



小写字母不同代表相同贮藏时间添加不同糯米粉时差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同代表不同贮藏时间添加相同糯米粉时差异显著 ($P < 0.05$)

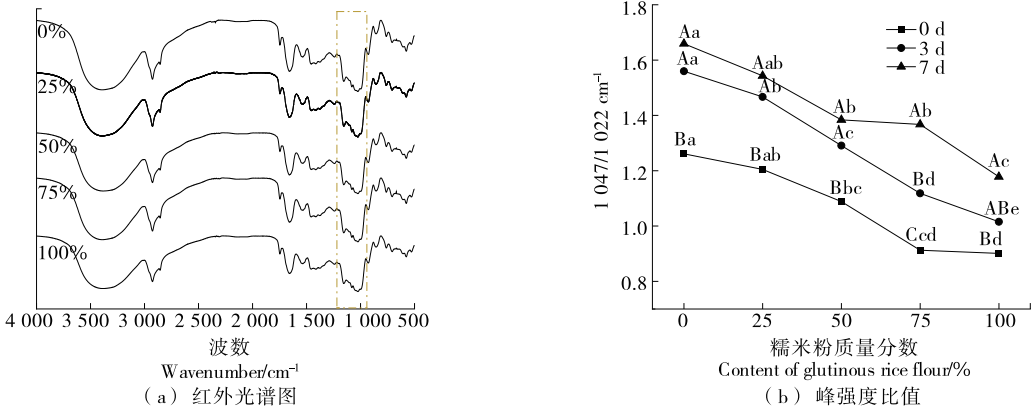
图 9 不同糯米粉质量分数下海绵蛋糕的质构特性

Figure 9 The texture properties of sponge cake with different contents of glutinous rice flour

表 5 糯米粉质量分数对水分分布的影响[†]

糯米粉质 量分数	贮藏 0 d			贮藏 3 d			贮藏 7 d		
	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃
0	8.54±0.11 ^{Aa}	86.96±0.09 ^{Ba}	4.50±0.19 ^{Ba}	6.45±1.10 ^{Bb}	88.39±0.91 ^{Aa}	5.16±0.19 ^{Ba}	4.50±0.63 ^{Cc}	88.65±0.04 ^{Aa}	6.85±0.65 ^{Aa}
25	10.82±0.51 ^{Aa}	84.71±0.26 ^{Ab}	4.47±0.28 ^{Ba}	8.51±1.94 ^{Ab}	86.74±2.19 ^{ABab}	4.74±0.39 ^{Ba}	5.62±1.34 ^{Bbc}	88.39±1.77 ^{Aa}	5.99±0.48 ^{ABa}
50	10.82±0.71 ^{Aa}	84.30±0.81 ^{Cbc}	4.88±0.11 ^{Aa}	8.18±0.90 ^{Bb}	86.51±0.55 ^{Bab}	5.31±0.43 ^{Aa}	5.89±0.49 ^{Cbc}	88.56±0.23 ^{Aa}	5.55±0.62 ^{Ab}
75	11.77±0.18 ^{Aa}	83.64±0.38 ^{Bcd}	4.59±0.39 ^{Ba}	8.83±1.51 ^{Bb}	85.88±1.11 ^{ABb}	5.29±0.40 ^{ABa}	6.77±1.47 ^{Bb}	87.43±1.62 ^{Aa}	5.81±0.32 ^{ABa}
100	11.93±1.43 ^{Aa}	82.99±0.72 ^{Bd}	5.08±0.79 ^{Aa}	11.87±0.67 ^{Aa}	82.78±0.42 ^{Bb}	5.35±0.42 ^{Aa}	10.37±1.04 ^{Aa}	84.23±0.56 ^{Ab}	5.40±0.62 ^{Ac}

[†] 小写字母不同代表相同贮藏时间添加不同糯米粉时差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同代表不同贮藏时间添加相同糯米粉时差异显著 ($P < 0.05$)。



小写字母不同代表相同贮藏时间添加不同糯米粉时差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母代表不同贮藏时间添加相同糯米粉时差异显著 ($P < 0.05$)

图 10 不同糯米粉质量分数下海绵蛋糕的红外光谱图和峰强度比值

Figure 10 The infrared spectra and peak intensity ratio of sponge cake with different contents of glutinous rice flour

表 6 贮藏期间相对结晶度的变化[†]
Table 6 Changes in relative crystallinity during storage
%

糯米粉质量 分数	贮藏 0 d	贮藏 3 d	贮藏 7 d
0	49.31±4.83 ^B	55.45±1.83 ^{ABa}	58.34±2.32 ^{Aa}
25	47.39±1.69	50.29±5.79 ^{ab}	54.37±3.80 ^{ab}
50	46.96±5.56	47.34±0.72 ^b	52.35±2.74 ^{bc}
75	45.26±1.09	48.09±5.09 ^b	51.37±0.59 ^{bc}
100	44.32±2.78	47.28±2.85 ^b	49.31±2.25 ^d

[†] 小写字母不同代表相同贮藏时间添加不同糯米粉时差异显著($P<0.05$);大写字母不同代表不同贮藏时间添加相同糯米粉时差异显著($P<0.05$)。

为有序的结晶结构^[3],即更高的直链淀粉含量通常导致结构中更规则的分子排列以及更高的结晶度^[28]。

3 结论

通过添加不同质量分数的糯米粉探究了海绵蛋糕面糊特性、烘焙特性以及老化特性的变化。结果表明,添加不同质量分数糯米粉后能够显著降低面糊的密度;高质量分数的糯米粉能够显著增加海绵蛋糕的比容且降低烘焙损失率;微观结构显示糯米粉添加使蛋糕气孔壁光滑,气孔膜上孔洞少,蛋白质网络外裸露的淀粉颗粒少,进而改善了蛋糕的烘焙特性。通过淀粉有序度及结晶度等老化指标,发现高质量分数糯米粉的抗老化效果尤为显著,尤以糯米粉 100%效果最为显著。综上,高质量分数糯米粉(75%~100%)能显著提高海绵蛋糕的烘焙特性和抗老化特性。贮藏 7 d 后的蛋糕品质仍出现了劣化,后续可探索与其他改良剂的复配使用。

参考文献

[1] 高瑾,蔡敏.菠萝风味戚风蛋糕的研制及质构分析[J].湖北工程学院学报,2018,38(6):47-50.
GAO J, CAI M. Development and texture analysis of pineapple flavored chiffon cake[J]. Journal of Hubei Institute of Engineering, 2018, 38(6): 47-50.
[2] 朱玥.壳寡糖对饼干和蛋糕品质的影响[D].武汉:武汉轻工大学,2021:3-5.
ZHU Y. Effects of chito-oligosaccharides on the quality of biscuits and cakes[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2021: 3-5.
[3] WANG L, ZHAO S, LIU Y, et al. Quality characteristics and evaluation for sponge cakes made of rice flour[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(7): e14505.
[4] ALEMAN R S, PAZ G, MORRIS A, et al. High protein brown rice flour, tapioca starch & potato starch in the development of gluten-free cupcakes[J]. LWT, 2021, 152: 112326

[5] CHOMPOORAT P, KANTANET N, RAYASDUARTE P. Physical and dynamic oscillatory shear properties of gluten-free red kidney bean batter and cupcakes affected by rice flour addition[J]. Foods, 2020, 9(5): 1-7.
[6] 陈凤莲,郭银梅,李欣洋,等.米粉品种和粒度对蛋糕糊力学特性及成品品质的影响[J].中国食品学报,2023,23(4):262-273.
CHEN F L, GUO Y M, LI X Y, et al. Effects of rice flour varieties and particle size on mechanical properties and finished product quality of cake batter [J]. Journal of Chinese Journal of Food Science, 2023, 23(4): 262-273.
[7] 王丽,黄琪悦,刘友明.米粉种类及添加量对蛋糕品质的影响[J].食品工业科技,2013,34(2):153-156,159.
WANG L, HUANG Q Y, LIU Y M. Effects of rice noodle types and dosage on cake quality [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(2): 153-156, 159.
[8] 张超.基于淀粉结构解析南方半糯性粳稻蒸煮食味品质与消化特性[D].扬州:扬州大学,2021:2-5.
ZHANG C. Analysis of flavor quality and digestion characteristics of southern semi-waxy japonica rice based on starch structure[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021: 2-5.
[9] 马洁.添加苦荞麦粉对米粉面团流变学及面包品质的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2019:26-27.
MA J. Effects of bitter buckwheat flour on rice flour dough rheology and bread quality [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2019: 26-27.
[10] JONGSUTJARITTAM N, CHAROENREIN S. Influence of waxy rice flour substitution for wheat flour on characteristics of batter and freeze-thawed cake[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 97(2): 306-314.
[11] 王晓瑞.米粉对蛋糕品质的影响及米粉蛋糕品质改良研究[D].合肥:安徽农业大学,2020:8-18.
WANG X R. Study on the influence of rice noodles on cake quality and the improvement of rice noodle cake quality[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020: 8-18.
[12] 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,2019:12-21.
WANG J B. Study on baking characteristics and quality improvement of low-fat cake containing propylene glycol ester[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 12-21.
[13] 王永俊.四种功能性低聚糖在海绵蛋糕中的应用研究[D].广州:华南理工大学,2019:22-26.
WANG Y J. Application of four functional oligosaccharides in sponge cake [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 22-26.
[14] 张敏华,郑宗平,陈洪彬,等.淮山粉对木糖醇戚风蛋糕品质的影响[J].食品与机械,2022,38(8):182-187.
ZHANG M H, ZHENG Z P, CHEN H B, et al. Effect of huaishan powder on the quality of xylitol chiffon cake [J]. Food & Machinery, 2022, 38(8): 182-187.

- [15] ANDRACA-ADAME J A. Sponge cake microstructure, starch retrogradation and quality changes during frozen storage [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2016, 51 (8): 1 744-1 753.
- [16] 张仲柏. 马铃薯蛋糕制备及其老化特性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018: 16-17.
ZHANG Z B. Study on potato cake preparation and aging characteristics[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018: 16-17.
- [17] CODIN G G, ISTRATE A M, GONTARIU I, et al. Rheological properties of wheat-flaxseed composite flours assessed by mixolab and their relation to quality features[J]. Foods, 2019, 8(8): 2-8.
- [18] 陈凤莲, 孙贵尧, 安然, 等. 不同品种和粒度对米粉糊化特性及米蛋糕品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 75-82.
CHEN F L, SUN G Y, AN R, et al. Effects of different varieties and particle size on gelatinization characteristics of rice flour and quality of rice cake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 75-82.
- [19] DAS A B, BHATTACHARYA S. Characterization of the batter and gluten-free cake from extruded red rice flour[J]. LWT, 2019, 102: 197-204.
- [20] 桂艳艳. 南瓜粉对面粉及其蛋糕品质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 19-21.
GUI Y Y. Effect of pumpkin flour on flour and its cake quality[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019: 19-21.
- [21] 胡欣宇, 明建, 王妹, 等. 超微板栗粉对海绵蛋糕品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 220-226.
HU X Y, MING J, WANG S, et al. Effect of ultra-micro chestnut powder on the quality of sponge cake[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 220-226.
- [22] ALEMAN R S, MORRIS A, PRINYAWIWATKUL W, et al. Physicochemical properties of frontiere rice flour and its application in a gluten-free cupcake[J]. Cereal Chemistry, 2021, 99 (2): 303-315.
- [23] 郝月慧. 三种糖醇影响无糖海绵蛋糕品质的比较研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 20-31.
HAO Y H. A comparative study on the effects of three sugar alcohols on the quality of sugar-free sponge cake [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 20-31.
- [24] ZIXUAN Y, DAN X, HONGLING Z, et al. New insight into the contribution of wheat starch and gluten to frozen dough bread quality[J]. Food Bioscience, 2022, 48: 101-107.
- [25] ŞİMŞEK S T. Vacuum-combined baking to enhance quality properties of gluten-free cake: Multi-response optimization study [J]. LWT, 2019, 116: 108-112.
- [26] 王雪. 亲水胶体对 Par-baking 戚风蛋糕品质的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 29-37.
WANG X. Study on the effect of hydrocolloidal on the quality of Par-baking chiffon cake[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 29-37.
- [27] JI Y, ZHU K, ZHOU H, et al. Study of the retrogradation behaviour of rice cake using rapid visco analyser, Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray analysis [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(5): 871-876.
- [28] FERNG L H, LIOU C M, YEH R, et al. Physicochemical property and glycemic response of chiffon cakes with different rice flours [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 53: 172-179.
- (上接第 28 页)
- [19] 童妹. 糯米淀粉—脂质复合物的制备、结构表征及消化特性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020: 26.
TONG S. Preparation, structural characterization and digestive characteristics of indica rice starch lipid complex[D]. Hangzhou: Zhejiang Industrial and Commercial University, 2020: 26.
- [20] 戢得蓉, 雷敏, 谢建明, 等. 过氧化氢/硫酸铜氧化慈姑淀粉的制备及性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(13): 209-216.
JI D R, LEI M, XIE J M, et al. Preparation and properties analysis of arrowhead starch oxidized by $H_2O_2/CuSO_4$ [J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(13): 209-216.
- [21] 黄立新, 赵壁秋. 次氯酸钠氧化小麦淀粉反应及其性质的研究[J]. 现代食品科技, 2010, 26(8): 805-808.
HUANG L X, ZHAO B Q. Preparation of oxidized wheat starch by sodium hypochlorite and its properties[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(8): 805-808.
- [22] 赵西坡, 卞武勋, 刘进超, 等. 高直链淀粉材料改性及应用研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 1-9.
ZHAO X P, BIAN W X, LIU J C, et al. Research progress in modification and application of high-amylose starch materials[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 1-9.
- [23] 林华山, 黄伟, 罗志刚. 无水有机醇介质中盐酸对蜡质玉米淀粉性质的影响[J]. 现代食品科技, 2013, 29(5): 945-947, 944.
LIN H S, HUANG W, LUO Z G. Properties of waxy corn starch treated in different anhydrous alcohols with hydrochloric acid[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(5): 945-947, 944.
- [24] 古碧, 查春月, 刘婷, 等. 食用氧化淀粉的制备及理化性能的研究[J]. 食品工业, 2012, 33(12): 85-89.
GU B, CHA C Y, LIU T, et al. Preparation and physicochemical properties of the edible oxidized cassava starch[J]. Food Industry, 2012, 33(12): 85-89.
- [25] HOOVER R, ZHOU Y. In vitro and in vivo hydrolysis of legume starches by α -amylase and resistant starch formation in legumes: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 54(4): 401-417.
- [26] CHEN Y, HUANG S, TANG Z, et al. Structural changes of cassava starch granules hydrolyzed by a mixture of α -amylase and glucoamylase[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 85(1): 272-275.