

不同比例乳清蛋白粉和蛋清粉对高蛋白蛋糕冻藏稳定性的影响

刘恺雯, 于书蕾, 尚珊, 姜鹏飞, 温成荣, 祁立波*

(大连工业大学 食品学院, 海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034)

摘要: 为提高蛋糕的感官品质和冻藏稳定性, 将乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI)和蛋清粉(egg white protein, EWP)按照质量比 1:0、4:1、2:1、1:1 和 1:2 进行复配(其中 1:0 组为对照组), 通过测定面糊的流变特性、面糊密度和微观结构、蛋糕的比容和质构特性以及冻藏 0、15、30、45 d 和 60 d 蛋糕的微观结构、老化焓值、淀粉结晶度和感官评价等指标, 研究复配蛋白粉对无麸质高蛋白蛋糕面糊特性及冻藏期间品质变化的影响。结果表明, 面糊的弹性模量(G')、黏性模量(G'')和面糊密度与乳清分离蛋白添加量呈正相关, 进而提高蛋糕的比容; 随着冻藏时间的延长, 添加高比例 WPI 的冷冻蛋糕的淀粉结晶度和老化焓值较低; 但高比例的 WPI 会因蛋白聚集使蛋糕横截面产生大气孔, 且硬度和咀嚼度较高, 降低蛋糕的感官评分。WPI 与 EWP 质量比为 2:1 时能改善蛋糕横截面大气孔的问题, 延缓蛋糕硬度和咀嚼度的上升速率; 此时冷冻蛋糕的蛋白质含量达 18.87 g/100 g。结合蛋糕的感官特性和老化特性, WPI 与 EWP 质量比为 2:1 时可以赋予冷冻蛋糕较好的冻藏稳定性。

关键词: 乳清分离蛋白(WPI); 蛋清粉(EWP); 冷冻蛋糕; 冻藏稳定性; 老化特性

Effect of Different Ratios of Whey Protein Isolate and Egg White Protein on Stability of High-Protein Cake during Frozen Storage

LIU Kaiwen, YU Shulei, SHANG Shan, JIANG Pengfei, WEN Chengrong, QI Libo*

(School of Food Science and Technology, SKL of Marine Food Processing & Safety Control, National Engineering Research Center of Seafood, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning, China)

Abstract: To improve the sensory quality and the stability of the cake during frozen storage, whey protein isolate (WPI) and egg white powder (EWP) were mixed in the ratios of 1:0, 4:1, 2:1, 1:1, and 1:2 (with 1:0 as the control group). This study measured the rheological mass properties, batter density, batter microstructure, specific volume and texture properties of cakes, as well as the microstructure, retrogradation enthalpy, starch crystallinity, and sensory evaluation of cakes during 0, 15, 30, 45 d, and 60 d of frozen storage. The effect of composite protein powder on the batter properties and quality changes of gluten free high protein cake during frozen storage were investigated. The results indicated that the elastic modulus (G'), viscous modulus (G'') and batter density of batter were positively correlated with the addition of WPI, which increased the specific volume of cake. A high ratio of WPI contributed to lowered retrogradation enthalpy and starch crystallinity during frozen storage but generated cakes with large holes due to protein aggregation as well as increased hardness and chewiness. Consequently, the sensory evaluation decreased. The mass ratio 2:1 of WPI and EWP could effectively alleviate the formation of large holes and the increase of cake hardness and chewiness, with protein content reaching 18.87 g/100 g. In light of the sensory characteristics and retrogradation characteristics of the cake, the mass ratio 2:1 of WPI and EWP could contribute to higher quality stability of cake during frozen storage.

Key words: whey protein isolate(WPI); egg white powder(EWP); frozen cake; stability of frozen storage; retrogradation characteristics

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2022YFF1100503-4)

作者简介: 刘恺雯(2000—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 农(水)产品精深加工。

*通信作者: 祁立波(1974—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 农(水)产品精深加工。

引文格式:

刘恺雯,于书蕾,尚珊,等.不同比例乳清蛋白粉和蛋清粉对高蛋白蛋糕冻藏稳定性的影响[J].食品研究与开发,2025,46(2):1-8.

LIU Kaiwen, YU Shulei, SHANG Shan, et al. Effect of Different Ratios of Whey Protein Isolate and Egg White Protein on Stability of High-Protein Cake during Frozen Storage[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 1-8.

麸质是在小麦、燕麦等谷物中广泛存在的复合性蛋白质,也是一种致敏性物质,主要成分是麦醇溶蛋白和麦谷蛋白^[1]。过敏性体质如果食用麸质蛋白,会引发多种麸质不耐受症^[2]。近年来,我国确诊该病症的人数呈指数上升趋势,该病症会破坏小肠黏膜,进而产生慢性小肠炎症,并伴随着腹泻、腹痛等不良症状^[3],因此如何治疗麸质过敏正逐渐受到广泛关注,食用无麸质食品作为治疗该病症的有效方法也成为研究热点。目前已有研究人员利用不含麸质的农作物代替小麦、燕麦等作为原料生产无麸质食品,但普遍存在弹性、持气性、持水性差等问题^[4]。研究人员发现对原料进行预处理,可以有效改善无麸质食品品质;还可以通过添加外源性物质,改善无麸质食品内部结构来提高产品综合评分。

乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI)主要由 β -乳球蛋白、 α -乳白蛋白和免疫球蛋白等组成^[5]。因其起泡性、乳化性和胶凝性较好,所以常用来改善淀粉基食品的质地和风味等^[6]。蛋清粉(egg white powder, EWP)作为新鲜鸡蛋清的替代品,延续了其优良的功能特性,包括高凝胶性、乳化性、保水性等^[7]。冷冻面团技术的出现和迅速发展,减少了因产品劣变导致的大量损失,有效提高了产品的便捷性。但冻藏过程中产品内部大冰晶的形成会引起烘焙产品品质劣化^[8]。目前关于冷冻无麸质蛋糕的品质研究几乎未见报道。本研究以WPI组作为对照组,以加入不同复配质量比(4:1、2:1、1:1、1:2)的WPI和EWP组作为试验组。以面糊流变特性、面糊密度和微观结构、冷冻期间蛋糕感官评价、微观结构、老化焓值、质构特性和淀粉结晶度等为指标,研究不同复配质量比的WPI和EWP对无麸质蛋糕面糊特性、蛋糕在冻藏期间稳定性和感官特性的影响,以期为研究蛋白粉在改善无麸质蛋糕品质特性、冻藏稳定性等方面提供理论依据,同时也为改善无麸质冷冻蛋糕品质方面的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鸡蛋:大连韩伟养鸡有限公司;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;白砂糖: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;乳清分离蛋白:陕西哈佛生物科技

有限公司;蛋清粉:江苏鑫瑞生物科技有限公司。

DDQ-A30D3 打蛋器:广东小熊电器有限公司;Rational 万能蒸烤箱:德国莱欣诺公司;DHR-2 流变仪、DSC250 差示扫描量热仪:上海 TA 仪器有限责任公司;TA. XT. Plus 质构仪:英国 SMS 公司;Coolsafe 110-4 冷冻干燥机:丹麦 Labogene 公司;Frontier 傅立叶变换红外光谱仪:日本铂金埃尔默仪器有限公司;JSM-7800F 热场发射扫描电镜:日本电子株式会社;7000 S X 射线衍射仪:日本岛津公司。

1.2 试验方法

1.2.1 无麸质蛋糕制作

无麸质面粉总质量为 100 g(其中糯米粉为 55 g;其余为 WPI 和 EWP,质量比分别为 1:0、4:1、2:1、1:1 和 1:2)、鸡蛋液 120 g、白砂糖 45 g、牛奶 20 g、泡打粉 3 g。将鸡蛋液和白砂糖混合搅拌 6 min,加入牛奶低速搅拌 2 min;糯米粉、乳清分离蛋白和蛋清粉过筛后分次加入,并将其翻拌均匀并振荡消泡,直至表面平整;将面糊转移到蛋糕托中,放入烤箱烘烤,温度 150 °C,时间 40 min。

1.2.2 面糊流变特性的测定

参考 Chompoorat 等^[9]的方法并略作修改,平板直径为 40 mm,夹缝距离为 1 mm;剪切速率在 0.1~100 s⁻¹ 时,扫描频率为 0.1~10.0 Hz,形变量为 0.06%,测定其弹性模量 G' (Pa)、黏性模量 G'' (Pa) 和表观黏度 (Pa·s)。

1.2.3 面糊密度的测定

面糊密度测定参考 Jongstutjarittam 等^[10]的方法。采用简化方法测定:取空容器质量记作 M_0 (g),将面糊装满容器总质量记作 M_1 (g),同样质量的容器装满清水质量记作 M_2 (g),按照公式(1)计算面糊密度(ρ , g/cm³)。

$$\rho = \frac{M_1 - M_0}{M_2 - M_0} \times \rho_{\text{水}} \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度,1 g/cm³。

1.2.4 面糊微观结构的测定

参考 Sahagún 等^[11]的方法,将载玻片上的面糊刮抹平整,盖上盖玻片放于显微镜载物台上。物镜倍数为 10 倍,适当调节焦距、亮度及位置,观察面糊的微观结构并将其拍照记录。

1.2.5 蛋糕比容的测定

蛋糕比容测定参考 Wang 等^[12]的方法。采用菜籽

测量法测定体积,称质量并按照公式(2)计算比容。

$$P = \frac{V}{m} \quad (2)$$

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

1.2.6 无麸质蛋糕质构特性的测定

蛋糕质构特性的测定参考 Wang 等^[12]的方法并略作修改。取蛋糕芯进行质构分析测定。模式为质地剖面分析(texture profile analysis, TPA)模式,探头型号为 P50;测前、测中、测后速度分别为 3、1、5 mm/s;触发力为 10 g;应变为 30%。

1.2.7 冻藏期间蛋糕感官评分的测定

参考 Sahagún 等^[11]的方法并略作修改,从形态、弹柔性、气味、口感、内部结构和总体接受度 6 个方面进行打分,评分细则及评分标准参考 GB/T 24303—2009《粮油检验 小麦粉蛋糕烘焙品质试验 海绵蛋糕法》,具体标准见表 1。

表 1 蛋糕感官评价标准

评价项目	评价标准	评分
形态 (15)	底部无塌陷、上部有较大弧度、表面光滑无斑点	10~15
	底部塌陷、上部有一定弧度、略有白粉或斑点	6~<10
	底部塌陷严重、上部弧度较小,表面不光洁	0~<6
弹柔性 (15)	柔软有弹性,按下去较快复原	10~15
	柔软弹性一般,按下去缓慢复原	6~<10
	柔软性、弹性差,按下去较难复原	0~<6
气味 (15)	有浓郁的蛋糕香气	10~15
	蛋糕的香味较淡	6~<10
	无蛋糕香味或有异味	0~<6
口感 (20)	蛋糕口感松软、细腻香甜、不粘牙	13~20
	蛋糕口感适口性一般、稍粘牙	7~<13
	蛋糕适口性较差、松散、粘牙	0~<7
内部结构 (15)	气孔均匀呈细密蜂窝状、光滑细腻	10~15
	气孔偏大、较均匀、稍粗糙	6~<10
	有明显大气孔且分布不均匀,切片断裂掉渣	0~<6
总体接受度 (20)	有较好的接受度	13~20
	接受度一般	7~<13
	不能接受	0~<7

1.2.8 冻藏期间蛋糕微观结构的测定

蛋糕微观结构的测定参考 Goranova 等^[13]的方法并略作修改,待蛋糕冷却后,切片取中间部分,将其冷冻干燥后放于干燥皿中。将样品离子溅射喷金,使用扫描电镜进行观察测定,放大倍数为 2 000 倍。

1.2.9 冻藏期间蛋糕硬度和咀嚼度的测定

按照 1.2.6 方法测定冻藏 0、15、30、45、60 d 后的蛋糕芯硬度和咀嚼度的变化。

1.2.10 冻藏期间蛋糕老化焓值的测定

蛋糕老化焓值的测定参考 Hesso 等^[14]的方法并略

作修改,采用差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC)分析测定,将蛋糕在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下分别冻藏 0、15、30、45、60 d 后,取蛋糕中心部分约 10 mg 于 DSC 专用铝制耐高压坩埚中,以空坩埚为对照组,升温范围为 $25\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

1.2.11 冻藏期间淀粉结晶度的测定

淀粉结晶度的测定参考张仲柏^[15]的方法。通过 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)测定冻藏 60 d 后淀粉的结晶度。测试条件:衍射角(2θ)扫描范围为 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$,扫描速度为 $4^{\circ}/\text{min}$,分析测定蛋糕样品中淀粉的结晶度。

1.3 数据处理及统计分析

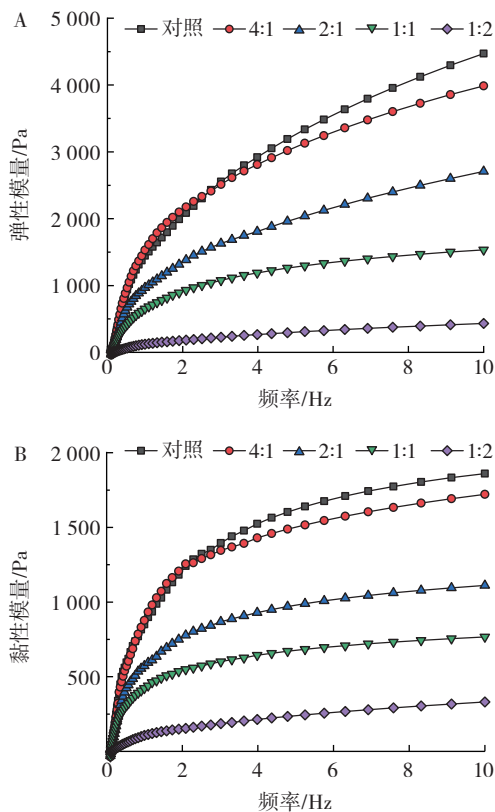
所有试验设计 3 组平行,数据为平均值 \pm 标准差,采用 SPSS 22.0 软件进行显著性分析($P<0.05$ 表示数据具有显著性差异),采用 Origin 2021 软件进行绘图。

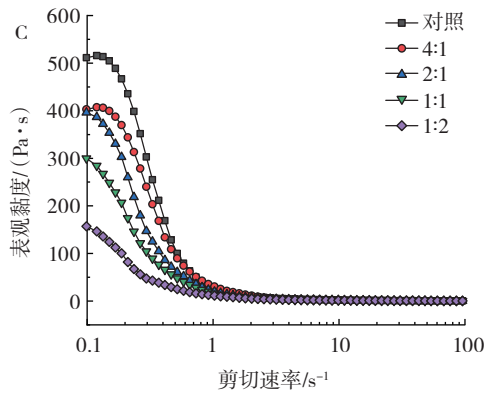
2 结果与分析

2.1 不同复配质量比蛋白粉对面糊流变特性的影响

无麸质蛋糕面糊的弹性模量和黏性模量变化如图 1 所示。

弹性模量代表面糊的弹性性能;黏性模量表示面糊的黏性与流动性。由图 1A 和图 1B 可知,不同组别弹性模量和黏性模量都随频率的增大而增大,而且在相同频率下 G' 高于 G'' ,说明蛋糕面糊的弹性大于黏性,表现出典型的弱凝胶动态流变特性。对照组面糊





A. 弹性模量; B. 黏性模量; C. 表观黏度。比例为 WPI 与 EWP 质量比。

图 1 不同比例蛋白粉对面糊流变特性的影响

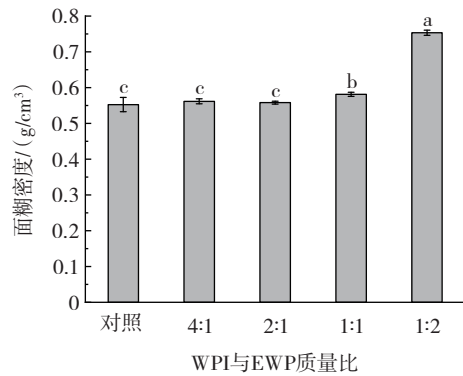
Fig.1 Effect of different proportions of protein powder on rheological properties of batter

的弹性和黏性模量最高,高于不同质量比的 WPI 和 EWP 复配组。可能是因为加入 WPI 后,面糊的持水力最大,从而提高了面糊黏弹性。由图 1C 可知,所有组别样品都显示同一趋势,即面糊黏度逐渐降低。在低剪切速率时,体系中的大分子与气泡缠绕,体系黏度

高;高剪切速率时,作用力使分子链和气泡沿受力方向改变轨迹,缠绕现象减弱,黏度下降^[16]。

2.2 不同比例复配蛋白粉对面糊密度和微观结构的影响

图 2 和图 3 为不同复配质量比蛋白粉对面糊密度及面糊气泡微观结构的影响。



不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 2 不同复配质量比蛋白粉对面糊密度的影响

Fig.2 Effect of different mass ratio of protein powder on batter density

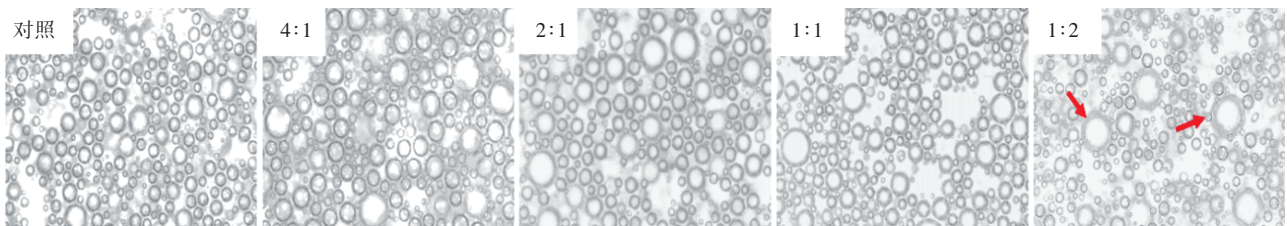


图 3 不同复配 WPI 与 EWP 质量比蛋白粉对面糊微观结构的影响

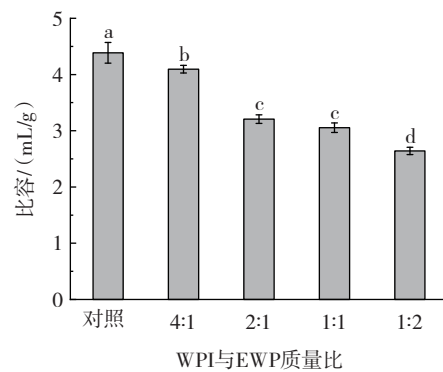
Fig.3 Effect of different WPI/EWP mass ratio of protein powder on the microstructure of batter

面糊密度反映面糊在搅打过程中产生气泡的多少以及维持气泡的能力,主要受蛋白质起泡作用的影响^[17];面糊微观结构更能直观地看出面糊中气泡的数量以及分布是否均匀。由图 2 可知,面糊密度值随着 WPI 添加量的减少逐渐增加,依次为 0.55、0.56、0.56、0.58、0.75 g/cm³。可能是因为 WPI 本身具有的优良起泡性使得充入面糊的空气量上升,导致其面糊密度减小^[18]。WPI 与 EWP 复配后,面糊密度增加,一方面可能是因为此时的复配面糊黏度减小,面糊体系黏度与气泡稳定性成正比;另一方面可能是因为 WPI 在面糊体系中起到的起泡作用优于 EWP。由图 3 可知,对照组气泡分布更均匀,数量多且直径小,无大气泡出现。但随着 EWP 的添加,出现了气泡数量减少且具有大气泡、气泡分布不均匀等现象。说明 WPI 组有更稳定的气泡结构,即 WPI 可以起到稳定面糊的作用,与面糊密度结果一致。

2.3 不同复配质量比蛋白粉对蛋糕比容的影响

蛋糕比容体现了蛋糕膨胀能力和持气能力,很大程度上影响蛋糕的质构特性,比容大表明蛋糕的膨胀

程度好^[19-20]。不同复配质量比蛋白粉组别的比容变化如图 4 所示。



不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 4 不同复配质量比蛋白粉对蛋糕比容的影响

Fig.4 Effect of different mass ratio of protein powder on cake specific volume

由图 4 可知,随着 EWP 添加量的增加,蛋糕比容呈现逐渐下降的趋势,比容值大小依次为 4.39、4.10、3.21、3.05 mL/g 和 2.64 mL/g。一方面可能是因为 WPI

在加热过程中,会形成蛋白质网络结构,在蛋糕体系起支撑作用;另一方面是 WPI 有稳定气泡的作用,在气泡外部形成了一种气泡膜并包裹在气泡外围,对气泡起到保护作用,能够使面糊在烘烤过程中膨胀得更大,

与上述面糊密度和面糊气泡微观结构变化趋势一致。

2.4 不同复配质量比蛋白粉对蛋糕质构特性的影响

表 2 为不同复配质量比蛋白粉对蛋糕质构特性的影响。

表 2 不同复配质量比蛋白粉对蛋糕质构特性的影响
Table 2 Effect of different mass ratio of protein powder on cake texture characteristics

WPI 与 EWP 质量比	质构特性					
	硬度/g	弹性	黏聚性	胶着度	咀嚼度	回复性
1:0(对照)	816.36±94.42 ^a	0.98±0.02 ^c	0.81±0.01 ^b	660.22±72.62 ^a	647.36±71.51 ^a	0.40±0.01 ^b
4:1	577.51±22.73 ^b	1.02±0.02 ^b	0.82±0.01 ^b	475.63±15.70 ^{bc}	486.12±6.61 ^b	0.42±0.00 ^b
2:1	456.30±17.96 ^c	1.24±0.02 ^a	0.85±0.02 ^a	388.49±15.60 ^c	385.68±42.62 ^c	0.45±0.02 ^a
1:1	579.47±6.56 ^b	1.01±0.02 ^{bc}	0.86±0.01 ^a	495.95±12.50 ^b	501.82±19.77 ^b	0.46±0.01 ^a
1:2	732.49±80.75 ^a	1.00±0.02 ^{bc}	0.86±0.01 ^a	630.90±80.13 ^a	628.28±70.43 ^a	0.47±0.02 ^a

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

研究表明,硬度、胶着度和咀嚼性与蛋糕品质呈负相关,数值越大代表蛋糕越坚硬、口感越差;弹性和回复性通常与蛋糕品质呈正相关,弹性越大代表蛋糕越蓬松、口感越柔软。由表 2 可知,对照组硬度最高,可能是因为 β-乳球蛋白常温状态以自然二聚物的形式存在,当温度超过某个数值时,球状折叠结构伸展,内部巯基(-SH)暴露,在二硫键(S-S)的作用下分子重新折叠,形成热变性聚集物^[21]。在设定质量比范围内,随着 EWP 添加量的增加,蛋糕的硬度、胶着度和咀嚼度呈现先降低后升高的趋势,WPI 与 EWP 质量比为 2:1 时蛋糕硬度、胶着度和咀嚼度值最小,分别为 456.30 g、388.49 和 385.68。WPI 具有较高的溶解度,在加热过程中与糖竞争水分,使糖溶解的有效水降低,

糖在受热时会产生结晶现象,所以硬度增加^[11,22]。有研究显示体积较小的蛋糕密度往往更大,气泡更加致密,因此蛋糕也更坚硬^[23]。由于 WPI 与 EWP 质量比为 1:1 和 1:2 时,两组别比容较小,所以也导致其硬度增加。随着 WPI 添加量的降低,蛋糕的弹性先升高后降低,2:1 组弹性最大,为 1.24,回复性显著提高。综上,加入不同质量比的 WPI 与 EWP 复配粉后会改善无麸质蛋糕的质构特性,使蛋糕硬度降低,弹性和回复性增加。

2.5 不同复配质量比蛋白粉对蛋糕冷冻期间蛋糕感官品质的影响

图 5 为蛋糕在冻藏期间感官品质的变化。

由图 5 可知,经过高温烘焙,WPI 和 EWP 的滋味

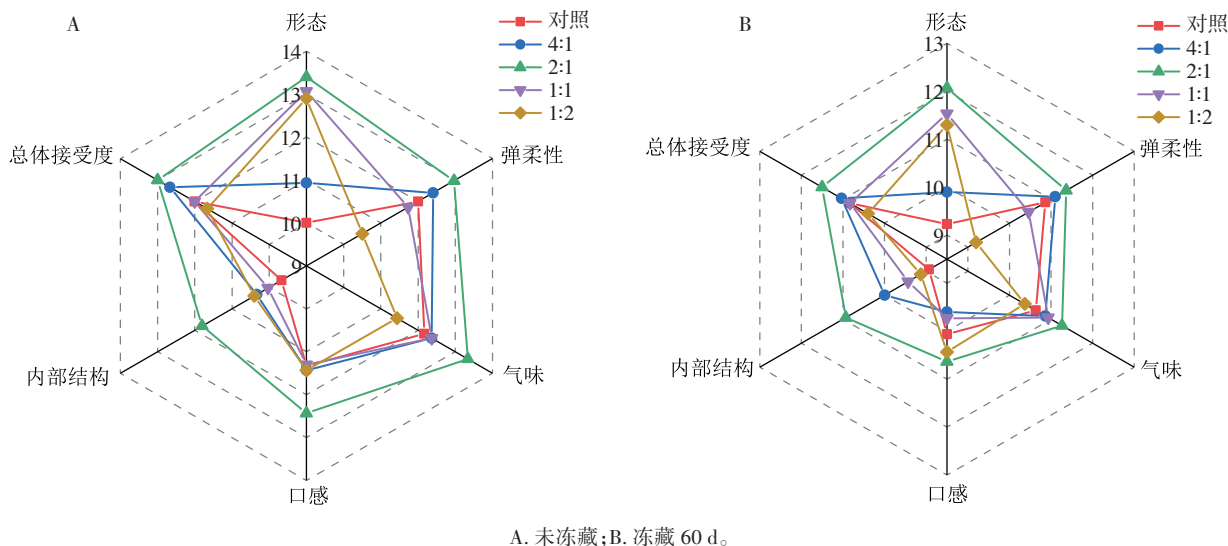


图 5 不同复配 WPI 与 EWP 质量比蛋白粉对冷冻期间蛋糕感官评价的影响

Fig.5 Effect of different WPI/EWP mass ratio of protein powder on sensory evaluation of cake during frozen storage

能够被消费者所接受。蛋糕在未冻藏且 WPI 与 EWP 质量比为 2:1 时,其在形态、弹性、内部结构、气味、口感和总体接受度 6 个方面分值均明显高于其他组。

WPI 具有起泡性,使蛋糕的比容变得更大,外观形态更好。根据蛋糕质构特性可知,加入一定比例 EWP 后,可以提高蛋糕柔软度,WPI 与 EWP 质量比为 2:1 时蛋

糕的硬度最小,弹性最大。在冻藏 60 d 后,不同组别的蛋糕均发生了不同程度的劣变,其感官品质也有所下降。在冻藏后硬度上升,这主要表现在蛋糕感官评

分中的口感方面,但 WPI 与 EWP 质量比为 2:1 时感官评价仍最佳。

图 6 为蛋糕的横切面。

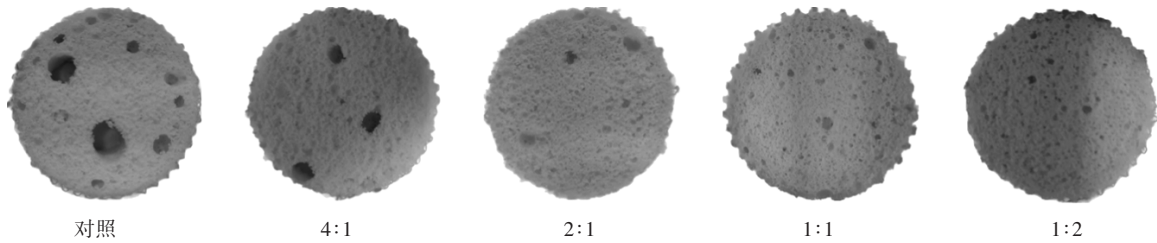


图 6 不同复配 WPI 与 EWP 质量比蛋白粉对蛋糕横切面的影响

Fig.6 Effect of different WPI/EWP mass ratio of protein powder on cross-section of cakes

由图 6 可知,对照组和 WPI 与 EWP 质量比为 4:1 时蛋糕存在大气孔现象,加入不同比例 EWP 复配后,WPI 与 EWP 质量比为 2:1、1:1 和 1:2 时无大气孔现象,说明加入 EWP 后可改善大气孔现象。

2.6 不同复配质量比蛋白粉对蛋糕冷冻期间蛋糕老化焓值的影响

淀粉的回生作用对于蛋糕的老化起着至关重要的作用。在储存过程中,淀粉的糊化导致其分子重新排列,形成晶体结构,最终导致蛋糕老化。Ban 等^[24]认为冻藏处理会显著提高淀粉的结晶程度,从而增加了淀粉熔融所需要的热量。冻藏期间蛋糕老化焓值的变化见表 3。

表 3 不同比例蛋白粉对冷冻期间蛋糕老化焓值的影响

Table 3 Effect of different mass ratio of protein powder on the retrogradation enthalpy of cakes during frozen storage

WPI 与 EWP 质量比	冻藏 0 d	冻藏 15 d	冻藏 30 d	冻藏 45 d	冻藏 60 d
对照	0.22±0.05 ^{Ca}	0.39±0.05 ^{Bb}	0.47±0.09 ^{ABb}	0.50±0.02 ^{Ac}	0.55±0.05 ^{Ac}
4:1	0.24±0.01 ^{Ca}	0.41±0.01 ^{Bb}	0.48±0.01 ^{Bb}	0.49±0.08 ^{Bbc}	0.58±0.05 ^{Ab}
2:1	0.25±0.04 ^{Ca}	0.48±0.03 ^{Bab}	0.50±0.01 ^{Bab}	0.51±0.02 ^{Babc}	0.60±0.05 ^{Aab}
1:1	0.26±0.04 ^{Da}	0.48±0.01 ^{Cab}	0.54±0.00 ^{BCab}	0.58±0.05 ^{ABab}	0.61±0.05 ^{Aab}
1:2	0.26±0.03 ^{Ca}	0.54±0.09 ^{Ba}	0.58±0.01 ^{Ba}	0.59±0.02 ^{Ba}	0.66±0.10 ^{Aa}

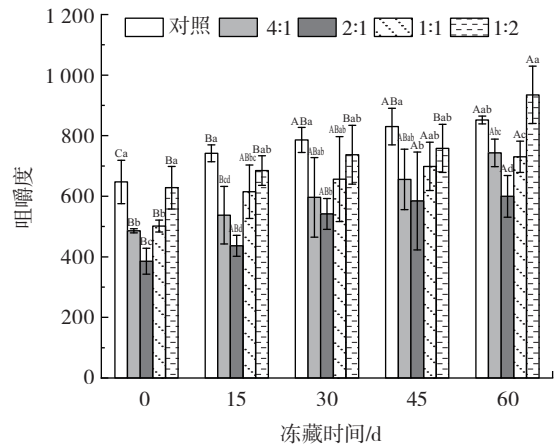
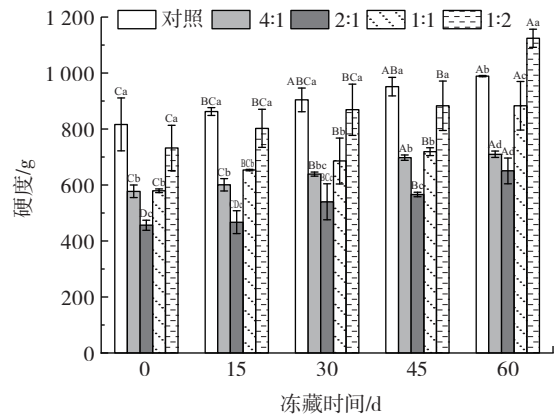
注:不同大写字母表示同一组别在不同冻藏时间下差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同冻藏时间下不同组别差异显著($P<0.05$)。

由表 3 可知,随着冻藏时间的延长,各组蛋糕的老化焓值均有不同程度的提高,在冻藏 60 d 后,对照组、WPI 与 EWP 质量比 4:1、2:1、1:1、1:2 组蛋糕的老化焓值分别增加至 0.55、0.58、0.60、0.61 J/g 和 0.66 J/g。WPI 包含疏水基团和亲水基团,且亲水基团分布在分子外侧,具有良好的乳化性,可以阻碍淀粉分子间氢键的相互作用,降低其结晶速度和成核速率,从而达到延缓蛋糕老化的目的。

2.7 贮藏期间蛋糕硬度和咀嚼度的变化

蛋糕硬度和咀嚼度随冻藏时间的变化如图 7 所示。

由图 7 可知,蛋糕的硬度和咀嚼度均随着冻藏时间的延长而逐渐提高。冻藏 0 d 时,WPI 与 EWP 质量比为 2:1 时蛋糕硬度和咀嚼度最小,为 456.30 g 和



不同大写字母表示同一组别在不同冻藏时间下差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同冻藏时间下不同组别差异显著($P<0.05$)。

图 7 不同复配 WPI 与 EWP 质量比蛋白粉对冷冻期间蛋糕硬度和咀嚼度的影响

Fig.7 Effect of different WPI/EWP mass ratio of protein powder on the hardness and chewiness of cakes during frozen storage

385.68。在冻藏 60 d 后,所有组别的蛋糕硬度值和咀嚼度都明显增大,硬度值分别增加至 988.98、709.70、650.47、883.17 g 和 1 124.24 g;与未冻藏条件下的样品相比,硬度分别增加了 21.15%、22.89%、42.55%、52.41% 和 53.48%。咀嚼度分别增加至 851.87、743.01、599.69、730.07 和 934.94;与未冻藏相比,咀嚼度分别增加了 31.59%、52.85%、55.49%、45.50% 和 48.81%。这可能

是由于在冻藏期间,蛋糕中的淀粉发生回生现象,且在冻藏后,一部分游离水流失,部分自由水转化为束缚水,参与淀粉的再结晶,导致蛋糕芯变得干硬,进而导致蛋糕硬度和咀嚼度增加^[25]。贾春利等^[26]研究羧甲基纤维素对冷冻蛋糕在冻藏期间硬度的变化,指出随着冻藏时间的延长,蛋糕硬度值增加,与本研究结果类似。总之,冻藏前后 WPI 与 EWP 质量比 2:1 组的硬度值和咀嚼度均最小,说明加入一定比例的 EWP 后可降低蛋糕的硬度和咀嚼度。

2.8 贮藏期间蛋糕淀粉结晶度的分析

淀粉老化导致蛋糕芯部分产生水分散失、质地变硬、容易掉渣等现象。通过 X 射线衍射仪进一步测定了不同质量比的 WPI 和 EWP 复配粉在冷冻储藏期间对蛋糕淀粉回生的影响,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,对照组淀粉相对结晶度小于其它组别。冻藏 0 d 时,对照组、WPI 与 EWP 质量比 4:1、2:1、1:1 和 1:2 组相对结晶度分别为 11.05%、12.84%、13.40%、13.84% 和 15.29%。冻藏 60 d 后,相对结晶度分别增加 22.54%、23.48%、24.92%、26.29% 和 28.28%。结果表明,冷冻储藏促进了淀粉的回生,导致相对结晶

表 4 不同复配质量比蛋白粉对冷冻期间淀粉相对结晶度的影响
Table 4 Effect of different mass ratio of protein powder on the relative crystallinity of starch during frozen storage

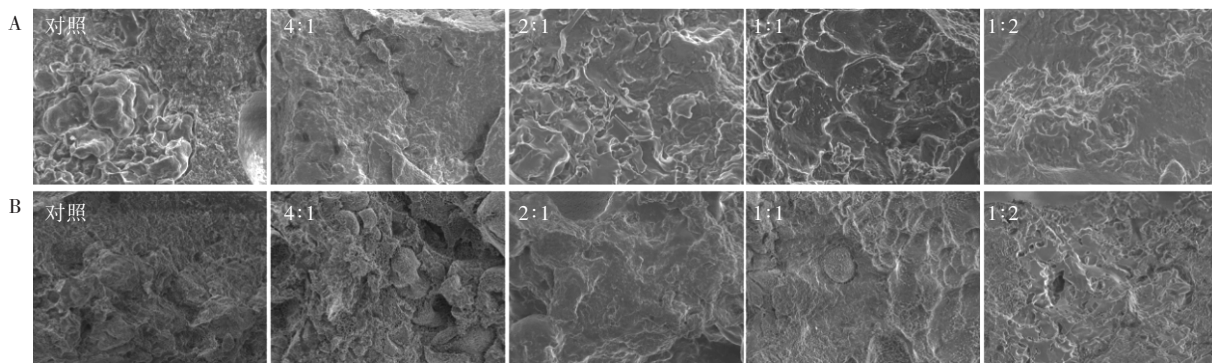
WPI 与 EWP 质量比	冻藏 0 d	冻藏 15 d	冻藏 30 d	冻藏 45 d	冻藏 60 d
对照	11.05±2.30 ^{Cb}	11.78±1.41 ^{Cb}	15.67±2.74 ^{Bd}	19.87±0.72 ^{Ae}	22.54±2.16 ^{Ae}
4:1	12.84±1.02 ^{Cab}	13.12±2.15 ^{Cab}	18.34±2.22 ^{Bcd}	22.63±1.20 ^{Ab}	23.48±1.90 ^{Abc}
2:1	13.40±1.28 ^{Cab}	14.32±0.64 ^{Cab}	21.26±1.20 ^{Bbc}	23.05±1.31 ^{ABb}	24.92±1.47 ^{Abc}
1:1	13.84±0.56 ^{Dba}	15.44±0.34 ^{Ca}	23.43±0.88 ^{Bab}	25.32±0.50 ^{Aa}	26.29±1.53 ^{Abb}
1:2	15.29±0.53 ^{Ca}	15.81±1.93 ^{Ca}	25.37±0.73 ^{Ba}	26.36±1.66 ^{ABa}	28.28±1.75 ^{Aa}

注:不同大写字母表示同一组别在不同冻藏时间下差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同冻藏时间下不同组别差异显著($P<0.05$)。

度不断增加,最终导致蛋糕贮藏品质的劣化。加入 WPI 后,因为其自身特性,可以有效改善蛋糕老化的现象,与冻藏后的老化焓值和硬度变化速率结果一致。

2.9 不同复配质量比蛋白粉对蛋糕冷冻期间微观结构的影响

冻藏期间冰晶的形成及生长会破坏蛋糕结构,导致蛋糕的保水性降低,严重影响最终成品蛋糕的品质。不同复配质量比蛋白粉对冷冻期间蛋糕微观结构的影响如图 8 所示。



A、B 分别为冻藏 0 d 和冻藏 60 d,放大倍数为 2 000 倍。

图 8 不同复配 WPI 与 EWP 质量比蛋白粉对冷冻期间蛋糕微观结构的影响

Fig.8 Effect of different WPI/EWP mass ratio of protein powder on the microstructure of cake during frozen storage

由图 8A 可知,淀粉颗粒包裹在蛋白质网络结构中,仅有少量外露,并未出现明显的淀粉颗粒结构,说明在加工过程中淀粉颗粒充分吸水膨胀。由图 8B 可知,贮藏 60 d 后的冷冻蛋糕的淀粉在一定程度上出现肿胀变形的现象,外露出更多的淀粉颗粒,网络结构变得不连续且不均匀,说明在贮藏期间蛋糕失水,内部结构被破坏。而对照组样品冻藏后的内部微组分仍较为聚集,添加了 WPI 的蛋糕体系具有较高的黏度,对水分也有更强的束缚力和保持力,各组分紧密聚集,体系呈现出更强的吸水性。

2.10 基本营养成分分析

依照 GB 24154—2015《食品安全国家标准 运动营养食品通则(含第 1 号修改单)》,补充蛋白类(固态)要求蛋白质含量不少于 15 g/100 g,脂肪含量不超过

15 g/100 g;控制能量类部分代餐要求蛋白质提供的能量占产品总能量的比例为 25%~50%,脂肪提供的能量占产品总能量的比例不超过 25%;微生物指标中规定沙门氏菌不得检出,金黄色葡萄球菌不得超过 10 CFU/g。

选取 WPI 与 EWP 质量比 2:1 组进行基本营养成分分析,最终改良的添加蛋白类无麸质蛋糕蛋白含量为 18.87 g/100 g,脂肪含量为 4.47 g/100 g,碳水化合物为 41.65 g/100 g,能量为 1 194.24 kJ/100 g。蛋白质提供的能量占产品总能量的比例为 26.86%,脂肪提供的能量占产品总能量的比例为 13.85%。本试验改良的高蛋白蛋糕符合 GB 24154—2015《食品安全国家标准 运动营养食品通则(含第 1 号修改单)》补充蛋白类要求且符合部分代餐要求。经过检测,冻藏 60 d 后的样品微生物指标均在相关国家标准限度范围内。

3 结论

本试验探究了不同复配比例的乳清分离蛋白和蛋清粉对无麸质高蛋白蛋糕品质及其冻藏稳定性的影响。结果表明:面糊的弹性模量(G')、黏性模量(G'')和面糊密度与 WPI 添加量呈正相关,进而增大了蛋糕比容;但过高比例的 WPI 会给蛋糕感官品质带来不利影响。加入一定比例的 EWP 会改善蛋糕横截面产生大气孔的现象并降低蛋糕硬度,WPI 与 EWP 质量比为 2:1 时硬度值最小。综合蛋糕感官评分和老化特性,可以得出复配蛋白 WPI 与 EWP 的最佳质量比为 2:1,可以赋予无麸质冷冻蛋糕更好的冻藏稳定性和感官品质。通过在蛋糕中添加不同比例蛋白粉研制无麸质高蛋白糯米粉蛋糕,不仅满足了消费者对食品营养的需求,而且能进一步开拓蛋白粉和无麸质糯米粉蛋糕的消费市场,研发出更高质量的蛋糕,为烘焙食品的工业化开辟新的方向。

参考文献:

- 傅玲琳,王彦波.食物过敏:从致敏机理到控制策略[J].食品科学,2021,42(19):1-19.
FU Linglin, WANG Yanbo. Food allergy: From sensitization mechanism to control strategy[J]. Food Science, 2021, 42(19): 1-19.
- SERGI C, VILLANACCI V, CARROCCIO A. Non-celiac wheat sensitivity: Rationality and irrationality of a gluten-free diet in individuals affected with non-celiac disease: A review[J]. BMC Gastroenterology, 2021, 21(1): 5.
- ALJADA B, ZOHNI A, EL-MATARY W. The gluten-free diet for celiac disease and beyond[J]. Nutrients, 2021, 13(11): 3993.
- 刘安伟.无麸质食品的研究进展[J].现代面粉工业,2022,36(1):13-16.
LIU Anwei. Research progress of gluten-free food[J]. Modern Flour Milling Industry, 2022, 36(1): 13-16.
- 吕隆重,任传顺,张涛显,等.乳清分离蛋白对无麸质大米面包品质的影响[J].中国粮油学报,2023,38(7):33-40.
LÜ Longzhong, REN Chuanshun, ZHANG Taoxian, et al. Effects of whey protein isolate on quality of gluten free rice bread[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(7): 33-40.
- KUMAR L, BRENNAN M A, MASON S L, et al. Rheological, pasting and microstructural studies of dairy protein-starch interactions and their application in extrusion-based products: A review[J]. Starch-Stärke, 2017, 69(1/2): 1600273.
- 刘尚丞,张思原.蛋清粉的加工特性及改性研究进展[J].中国家禽,2022,44(6):100-106.
LIU Shangcheng, ZHANG Siyuan. Research progress on processing properties and modification of egg white powder[J]. China Poultry, 2022, 44(6): 100-106.
- 李炜熠.冷冻蛋糕生产关键技术的研究[D].广州:华南理工大学,2013.
LI Weizhao. Research on key technologies on frozen cake processing [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- CHOMPOORAT P, KANTANET N, HERNÁNDEZ ESTRADA Z J, et al. 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): 616.
- 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.
- SAHAGÚN M, BRAVO-NÚÑEZ Á, BÁSCONES G, et al. Influence of protein source on the characteristics of gluten-free layer cakes[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 94: 50-56.
- WANG L, ZHAO S M, LIU Y M, et al. Quality characteristics and evaluation for sponge cakes made of rice flour[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(7): e14505.
- GORANOVA Z, MARUDOVA M, BAEVA M. Influence of functional ingredients on starch gelatinization in sponge cake batter[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124997.
- HESSO N, LE-BAIL A, LOISEL C, et al. Monitoring the crystallization of starch and lipid components of the cake crumb during staling [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 133: 533-538.
- 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.
ZHANG Zhongbai. Development of potato cake and research of the staling characteristics[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- 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 Jiabao. Study on baking characteristics and quality improvement of low-fat cake containing propylene glycol esters[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- WAZIHOH E, BENDER D, JÄGER H, et al. Ohmic baking of gluten-free bread: Role of non-gluten protein on GF bread structure and properties[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(2): 595-609.
- 陈泽珊.乳清蛋白的功能特性分析及在乳制品中的应用研究[J].食品安全导刊,2021(30):186-187.
CHEN Zeshan. Functional characteristics analysis of whey protein and its application in dairy products[J]. China Food Safety Magazine, 2021(30): 186-187.
- 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 Xue, LI Bing, LI Lin, 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.
- 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 Zheng, LI Sai, LI Xuhan, 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.
- 刘培玲,张晴晴,高增丽,等.乳清蛋白改性研究进展[J].食品科学,2021,42(23):333-348.
LIU Peiling, ZHANG Qingqing, GAO Zengli, et al. Advances in modification of whey proteins[J]. Food Science, 2021, 42(23): 333-348.
- AMMAR I, GHARSALLAH H, BEN BRAHIM A, et al. Optimization of gluten-free sponge cake fortified with whey protein concentrate using mixture design methodology[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128457.
- 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-Food Science and Technology, 2021, 152: 112326.
- BAN C, YOON S, HAN J, et al. Effects of freezing rate and terminal freezing temperature on frozen croissant dough quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 73: 219-225.
- LODI A, ABDULJALIL A M, VODOVOTZ Y. Characterization of water distribution in bread during storage using magnetic resonance imaging[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2007, 25(10): 1449-1458.
- 贾春利,汤晓娟,黄卫宁,等.羧甲基纤维素改善冷冻蛋糕体系热力学与烘焙特性研究[J].食品工业科技,2012,33(16):327-331.
JIA Chunli, TANG Xiaojuan, HUANG Weining, et al. Study on improvement of carboxyl methyl cellulose in frozen batter cake by modifying thermal and baking properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(16): 327-331.