

米粉品种和粒度对蛋糕糊力学特性及成品品质的影响

陈凤莲, 郭银梅, 李欣洋, 贺殷媛, 刘琳琳, 吉语宁, 窦新栋, 安然, 张娜*

(哈尔滨商业大学食品工程学院 黑龙江省普通高等学校食品科学与工程重点实验室

黑龙江省谷物食品与资源综合加工重点实验室 哈尔滨 150028)

摘要 为探究米粉品种和粒度对蛋糕糊力学特性及成品品质的影响,以粳米、籼米和糯米为研究对象,分别制备 80,100,120,140 目的米粉,分析蛋糕糊的质构、基础流变学特性以及蛋糕成品的质构特性、感官品质。结果表明,随粒度减小,损伤淀粉含量呈增加趋势,其中 140 目的糯米粉中损伤淀粉含量最大为 23.1%。蛋糕糊的动态流变学结果表明,所有蛋糕糊的弹性均大于黏性,均表现出类似半固体的行为,初步判定为黏弹性流体。籼米粉和粳米粉蛋糕糊的 G' 值均高于糯米粉, G'' 值均低于糯米粉;随米粉颗粒粒度减小(80~140 目),籼米粉和粳米粉,蛋糕糊的 G' 增加, G'' 减小,而糯米粉相反。蛋糕糊的大形变质构特性结果表明,粳米粉、籼米粉、小麦粉蛋糕糊的弹性及回复性随粒度的减小而增大,黏聚性随粒度的减小而减小,而糯米粉蛋糕糊与之相反。蛋糕的质构结果表明,米粉粒度减小,蛋糕的硬度增大;米粉蛋糕的硬度与小麦粉蛋糕相比,整体上偏高,其中籼米粉蛋糕的硬度显著高于小麦粉和其它品种。感官分析粒度为 120 目的粳米粉评分最高。弹性模量与蛋白质和直链淀粉含量分别呈显著正相关和极显著正相关,与损伤淀粉含量呈显著负相关,黏性模量与直链淀粉含量呈极显著负相关;对于不同粒度的米粉,蛋糕质构特性与蛋糕糊流变学特性之间存在显著相关性,通过蛋糕糊基础流变学中 G' 与 G'' 的变化可以预测蛋糕质构的变化。

关键词 米粉; 粒度; 蛋糕糊; 流变学; 质构

文章编号 1009-7848(2023)04-0262-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.04.025

我国口粮消费中稻米位居第一^[1]。全世界约有 1/2 的人口以稻米为主食,全球稻米消耗量居高不下^[2]。稻米作为世界上最主要的粮食作物,对保障国计民生起到重要作用,是一种非常重要的战略物资,因此稻米的生产与加工受到世界各国的重视,稻米由最早的只作为口粮,转化为对其深加工以及综合利用,使稻米的各项功能得到最大限度地发挥^[3]。我国主要以大米作为主食,以稻米为原料加工的米制品种类丰富,因其具有大米特有的香味与口感,故颇受青少年的欢迎,同时米制品中所含的蛋白质、碳水化合物、水溶性纤维等均高于面粉制品,其营养更加丰富^[4]。

现如今,患有慢性小肠吸收不良综合症(乳糜泻)的人数呈逐年递增的趋势,在澳大利亚、北美和北欧的发病率最高,由于患者体内肠黏膜细胞酶活性降低,缺乏对麦胶蛋白的分解能力,导致对含麦胶蛋白(如面筋)的食品不耐受^[5],因此研制无

麸质食品十分重要。大米粉富含多种必需氨基酸^[6],不含面筋蛋白,乳糜泻患者可以放心食用,是最适合取代面粉制作烘焙食品的一种材料。Bozdogan 等^[7]用奎奴亚藜麦粉代替米粉和马铃薯淀粉,研究对面糊流变特性及无筋糕点理化性质和品质参数的影响,流变学分析表明,面糊的密度提高,表现出类似固体的行为,且显著改善了糕点的理化性质和品质指标,随着藜麦粉替代量的增加,蛋糕的体积增大,硬度降低。Tsuchiya 等^[8]研究添加糯米粉对米粉蛋糕品质的影响,分析米粉蛋糕成品的显微结构、体积比、质地、色差等指标,结果表明糯米粉添加量为 20% 的米蛋糕的感官评价最好。Wang 等^[9]研究米粉、交联淀粉和预糊化木薯淀粉按照一定比例混合制得米粉蛋糕,与普通面粉蛋糕的质构、外观、风味、口感等均无显著差异。

市面上制作蛋糕的原料主要是小麦粉,对于米蛋糕的研究较少,而蛋糕糊的特性与最终成品品质有着重要的关系。本文以糯米、籼米和粳米 3 种米为原料,通过测定米粉的基础成分、蛋糕糊基础流变学特性,以及蛋糕成品质构和感官等指标,采用相关性分析和主成分分析的方法,建立由米粉糊化特性和蛋糕糊基础流变特性组成的有效评

收稿日期: 2022-04-13

基金项目: 黑龙江省科技重大专项(2020ZX08B02)

第一作者: 陈凤莲,女,博士,副教授

通信作者: 张娜 E-mail: foodzhangna@163.com

价方法,确定可行性强的参数指标,为蛋糕品质的改良奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

粳米,宁波市江北五桥粮油有限责任公司;糯米,长春市鼎奇食品有限公司;籼米,芜湖谷兴食品有限公司;小麦粉,青岛百乐麦食品有限公司。

FW1777 中草药粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;TAnew plus 质构仪、H-PTD2000 流变仪,美国 TA 仪器公司;损伤淀粉仪,法国肖邦技术公司;CO-750A 电烤箱,中山卡士电器有限公司;SD-38 打蛋器,永康市康尔牛工贸有限公司;标准样筛,安平鑫兴筛具总厂。

1.2 试验方法

1.2.1 不同粒度米粉及小麦粉的制备 用实验室磨粉机将大米磨碎,然后使米粉分别过 80,100,120,140 目(粒度分别为 177,147,125,105 μm)^[10] 筛后收集,以获得不同粒度的米粉,并将其密封、备用。小麦粉的制备参照米粉的制备方法。

1.2.2 米粉成分测定 水分含量:根据 GB 5009.3-2016 规定的方法选取直接干燥法测定^[11];蛋白质含量:根据 GB 5009.5-2016 规定的方法选取凯氏定氮法测定^[12];损伤淀粉含量:使用损伤淀粉仪对米粉种损伤淀粉含量进行测定;直链淀粉含量:根据 GB/T 15683-2008 规定的方法测定^[13]。

1.2.3 蛋糕的制作 米粉或小麦粉:100%;按质量分数称量如下材料:鸡蛋(以全蛋液计):80%;绵白糖:80%;水:45%;泡打粉:1%。原材料的选择和称量→打发蛋液至蛋液气泡细密稳定→调制蛋糕糊→注模成型→烘烤(温度:上火 150 $^{\circ}\text{C}$,下火 160 $^{\circ}\text{C}$,焙烤 15 min 左右)→冷却及脱模。

1.2.4 蛋糕糊基础流变学特性的测定 蛋糕糊的制备方法参照 1.2.3 节所述的方法。蛋糕糊基础流变学特性的测定参照文献[14]的方法并稍作修改。使用直径为 50 mm 的平板在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下,间隙为 1 mm。应变扫描测试(频率为 1 Hz,振幅从 0.01%到 100%对数规律逐渐增大)后,在线性黏弹性区域以 0.1%的目标应变进行振荡频率测试(0.1~30 Hz),并记录动态流变数据,包括储能模量(G')和损耗模量(G'')。每次测定 3 份平行样品,结果为

“平均值 \pm 标准偏差”。

1.2.5 蛋糕糊质构特性的测定 取 35 mL 蛋糕糊,于 50 mL 装置中,使用质构分析仪测定质构特性^[15],对蛋糕糊进行全质构分析(TPA),并记录弹性、黏聚性和回复性值。每次测定 3 份平行样品,结果为“平均值 \pm 标准偏差”。使用直径为 35 mm 的平底柱形探头 P/35,测试的机械条件(测试参数)为试验类型:全质构分析;测试类型:下压;目标模式:形变;目标值:30.00%;停留时间:5 s;测试速度:测试前速度为 2.0 mm/s,测试中速度为 1.0 mm/s,测试后速度为 1.0 mm/s;接触点类型:力;接触点:5.00 gf。

1.2.6 蛋糕质构特性的测定 从蛋糕中心部分切出 2 cm \times 2 cm \times 2 cm 的正方体测试样品,使用 TAnew plus 质构仪对样品进行质构测定^[16]。采用直径 35 mm 的平底柱形探头 P/35,记录硬度、弹性、黏性和咀嚼性值。测试的机械条件(测试参数)参照 1.2.5 节的方法。

1.2.7 蛋糕感官品质的测定 感官评价根据 GB/T 15682-2008 中的方法测定^[17]。将蛋糕切成大小均一的数块,按照表 1 的评分标准邀请 10 名同学进行感官评价,结果取平均值,总分为 100 分^[18]。评价因素为色泽、外观、组织结构、口感和风味。综合得分如下: ≤ 50 分,非常差;51~60 分,差;61~70 分,比较差;71~80 分,相对不错;81~90 分,不错; > 90 分,非常好^[19]。

1.2.8 数据处理 所有试验均平行 3 次,结果以“平均值 \pm 标准偏差”的形式表示。曲线图使用 Origin 2021 和 Microsoft Office Excel 进行绘制,统计学分析使用 SPSS25 进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同粒度米粉的基础成分含量

同一品种的米粉随目数减小,米粉粒度变大,水分含量逐渐增加。粳米粉的水分含量在 12.08%~13.92%之间,籼米粉的水分含量在 10.17%~12.56%之间,糯米粉的水分含量在 11.03%~12.96%之间。

由表 2 可知,不同粒度的粳米、籼米、糯米粉的蛋白质含量分别为 7.994~8.159 g/100 g,8.160~

表1 蛋糕的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of cake

项目	评分标准	分数
形态	外形整齐丰满,表面细腻,底部平滑无破损及收缩塌陷	16~20
	外形较整齐,顶部略有坍塌,表面略有破损	11~15
	外形参差不齐,表面粗糙,顶部有塌陷、凹陷	0~10
色泽	外部浅黄,内部奶白色,颜色均匀,具有蛋糕独特的色泽	16~20
	外部略发黄,内部白色,颜色略均匀	11~15
	外部深黄,内部颜色不均匀	0~10
组织	起发均匀,组织松软细密,弹性好,粉质细腻不掉渣,无糖块、粉块等,切面呈细密蜂窝状	16~20
	起发差,组织不细密,内部孔隙空洞较大,弹性略差,粉质较细腻	11~15
	不起发,无弹性,有糖块、粉块,内部无孔隙、空洞等	0~10
滋味与口感	松软可口,有鸡蛋香味,不黏牙,甜度适中,具有蛋糕独有的口感与风味,无异味	16~20
	鸡蛋香味较淡,口感稍硬,蛋糕口感与风味不明显	11~15
	鸡蛋香味淡,口感较差,没有蛋糕的口感与风味	0~10
杂质	无肉眼可见杂质	16~20
	稍有杂质	11~15
	杂质过多	0~10

表2 不同种米粉的基础成分含量

Table 2 Content of basic components of different rice flour

样品名称	水分含量/%	蛋白质含量/ $\text{g}\cdot(100\text{g})^{-1}$	损伤淀粉含量/%	直链淀粉含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
粳米 80 目	13.92 ± 0.04 ^a	8.007 ± 0.04	4.9	18.102 ± 0.03
粳米 100 目	13.20 ± 0.10 ^b	8.003 ± 0.06	10.9	18.068 ± 0.03
粳米 120 目	12.41 ± 0.13 ^c	8.159 ± 0.07	18.0	18.617 ± 0.01
粳米 140 目	12.08 ± 0.13 ^d	7.994 ± 0.11	19.5	18.618 ± 0.01
籼米 80 目	12.56 ± 0.03 ^a	8.871 ± 0.18	12.0	22.876 ± 0.03
籼米 100 目	11.87 ± 0.03 ^b	8.722 ± 0.00	12.0	23.408 ± 0.02
籼米 120 目	11.02 ± 0.03 ^c	8.160 ± 0.04	13.2	23.551 ± 0.02
籼米 140 目	10.17 ± 0.08 ^d	8.825 ± 0.09	16.8	23.152 ± 0.02
糯米 80 目	12.96 ± 0.02 ^a	7.196 ± 0.06	18.3	0.643 ± 0.04
糯米 100 目	12.22 ± 0.03 ^b	7.361 ± 0.07	19.8	0.948 ± 0.02
糯米 120 目	11.85 ± 0.02 ^c	7.358 ± 0.06	22.5	0.449 ± 0.02
糯米 140 目	11.03 ± 0.01 ^d	7.366 ± 0.03	23.1	0.533 ± 0.03

注:不同品种不同目数米粉之间的含水量具有显著性差异($P<0.05$)。

8.871 g/100 g, 7.196~7.366 g/100 g, 直链淀粉含量分别为 18.068~18.618 mg/g, 22.876~23.551 mg/g, 0.449~0.948 mg/g。随米粉粒度的减小,蛋白质含量及直链淀粉含量变幅不大,而损伤淀粉含量呈显著增加趋势。这是因为在谷物里淀粉是以淀粉颗粒的形式存在,粒度越小,淀粉颗粒受到的机械损伤越大,损伤淀粉含量也会增加。籼米损伤淀粉含量为 12.0%~16.8%,相比较粳米损伤淀粉含量受粒度影响最大,由 80 目的 4.9% 升至 140 目的

19.5%,可能是因为粳米籽粒中角质体较多,籽粒硬度大,受机械作用影响明显。糯米损伤淀粉含量为 18.3%~23.1%,相对较高,可能是因为糯米籽粒硬度最小,碾米过程中产生的损伤淀粉最多^[20]。

2.2 不同粒度米粉对蛋糕糊力学特性的影响

蛋糕糊是蛋糕制作过程中的重要中间体,其力学特性对成品品质具有重要影响,为探究不同品种米粉的粒度对蛋糕糊大形变和小形变力学特性的影响,本研究分别采用流变学(小形变)和质

构(大形变)进行测定分析。

2.2.1 流变学特性分析 弹性模量 G' 又称储能模量^[21],即样品在振动撤消后能储藏的变形能量,是样品弹性性能的表现。黏性模量 G'' 又称损耗模量,是样品在振动过程中消耗的能量,样品在能量消耗后无法恢复到原始的形状,是黏性性能的表现。流变学是线性变形范围内的研究,因此要找到样品的线性变化区间。图 1 为剪切应变变化过程中蛋糕糊的流变学变化图,最大应变为 0.1%。

图 2 是不同品种、不同粒度蛋糕糊的动态流变试验结果,由图可以看出,蛋糕糊黏弹性的变化与频率有关,米粉的品种不同也改变了蛋糕糊的黏弹性,该结果与 Oh 等^[22]的结论相一致。在线性黏弹区,不同粒度的米粉蛋糕 G' 与 G'' 值均随振荡频率的增加而增加,在一定振荡频率下的 G' 值始终大于 G'' 值,表明米粉制作的蛋糕糊的线性黏弹性变化是黏性与弹性性质共同决定的,仍为半固态而流动趋势强^[23]。这是由于蛋糕糊是一个气液

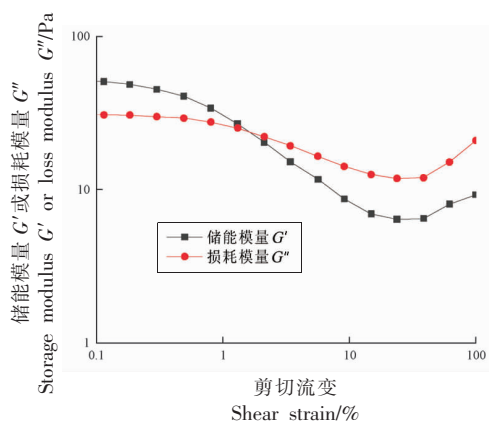


图 1 剪切应变变化过程中蛋糕糊的流变学变化
Fig.1 Rheological change of cake paste during shear strain change

固多项分散体系,其中蛋白质和淀粉大分子结构以及它们之间的交联作用,决定了蛋糕糊动态流变学性质的变化,初步判定该蛋糕糊为黏弹性流体,其流动复杂性在非牛顿流体之上。籼米粉和粳米粉蛋糕糊的 G' 值均高于糯米粉, G'' 值均低于糯

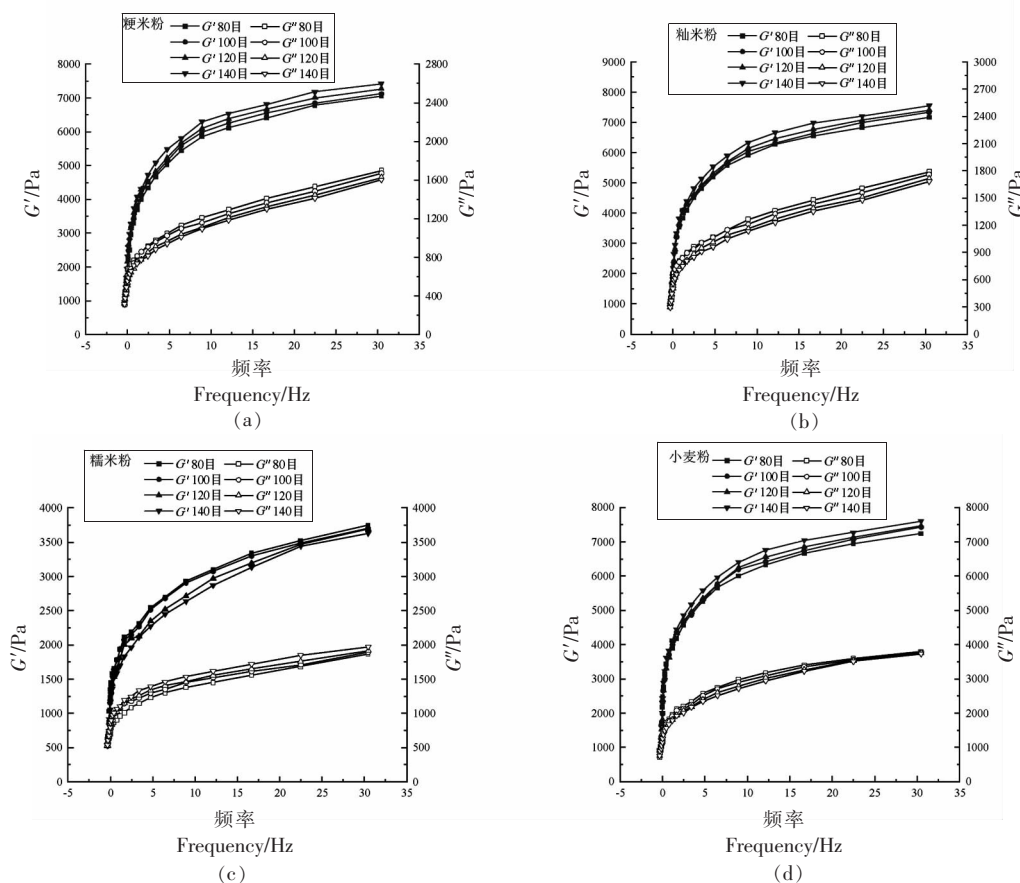


图 2 蛋糕糊的流变学特性

Fig.2 Rheological properties of different cake pastes

米粉,有研究报道,米粉中淀粉颗粒的结构和组成比例等对蛋糕糊的动态流变学特性产生很大影响^[24],据此可得,糯米粉中支链淀粉含量和损伤淀粉含量较高,损伤淀粉遇水易吸收膨胀,支链淀粉部分溶出,从而使蛋糕糊分散体系黏稠度增加,弹性变弱,因此与籼米粉和粳米粉蛋糕糊相比,糯米粉的 G' 值低, G'' 值高。小麦粉蛋糕糊的 G' 值与籼米粉和粳米粉相似, G'' 值均高于3个品种的米粉,这说明非糯性米粉以及小麦粉形成的蛋糕糊多项体系在弹性方面较相似,而在黏性方面差异较大,小麦粉蛋糕糊的黏性远远大于米粉,这主要是与小麦蛋白中麦谷蛋白和麦胶蛋白的含量有关。对于面团来说,小麦粉中麦胶蛋白能够提供面团延伸性,相当于黏性特性,麦谷蛋白能够提供面团弹性,小麦粉中的麦胶蛋白和麦谷蛋白各占小麦粉总蛋白的50%左右,黏弹比例适中,在蛋糕糊中的作用应该类似,稻米中谷蛋白占米蛋白的80%左

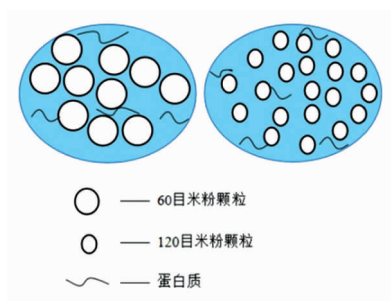


图3 蛋糕糊中淀粉颗粒与蛋白示意图

Fig.3 Schematic diagram of starch particles and protein in cake batter

2.2.2 质构特性 通过流变学分析初步判定该蛋糕糊为黏弹性流体,因此在蛋糕糊质构测定中采用了黏弹性流体专用的TPA分析方式。弹性代表物体受到外力作用下产生形变,消除外力后回复到最初状态的性能^[28];回复性代表样品使用弹性变形储藏的能量,表示在同样的压力、速度下变形样品与发生变形回复的程度。有学者使用下压回复性作为产品持续抗压能力的指标,通过第2压缩周期中峰值和第1压缩周期中峰值的比值表示^[29]。由表3可知,粳米粉、籼米粉、小麦粉蛋糕糊的弹性与回复性随着米粉目数的减小而减少,而糯米粉蛋糕糊与之相反。米粉蛋糕糊的弹性、回复

右^[25],且其中含有较多数量的分子内和分子间的二硫键^[26],胶原蛋白只占5%左右,与小麦粉相比,米粉中的胶原蛋白含量很少,从而使其所形成的蛋糕糊黏性大大降低。对于籼米粉和粳米粉,随米粉颗粒粒度的减小(80~140目),蛋糕糊的 G' 增加, G'' 减小,而糯米粉情况恰恰相反,小麦粉与籼米粉和粳米粉的结果相似,只是 G'' 随米粉颗粒粒度变化较小。分析原因可能是粒度减小后,在蛋糕糊分散体系中更容易吸水,蛋白吸水后形成蛋白凝胶,赋予体系弹性,使得蛋糕糊的 G' 增加,而系统中的粉体颗粒变小,吸水后黏结碰撞的机会减少(如图3),黏稠度下降, G'' 减小。此外,随粒度减小,损伤淀粉增加,直链淀粉溶出增多,与蛋白相结合(如图4)^[27],利于弹性模量的增加,从而相对降低了黏性模量。对于糯米其损伤淀粉含量随粒度减小变化较大,这应该是影响其流变学特性的主要因素。

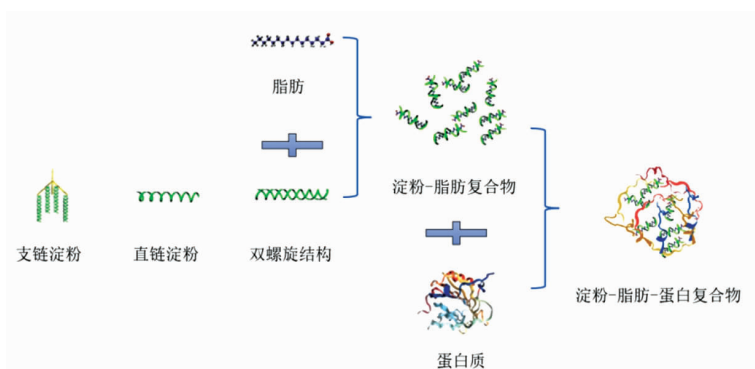


图4 淀粉-脂肪螺旋复合物及淀粉-脂肪-蛋白复合物示意图

Fig.4 Schematic diagram of spiral inclusion complex of starch-fat and complex of starch-fat-protein

性与小麦粉蛋糕糊相比,整体上偏低。糯米粉蛋糕糊在弹性及回复性方面与粳米粉、籼米粉蛋糕糊有显著差异,可能原因是糯米的损伤淀粉含量和支链淀粉含量较高,损伤淀粉含量的增高提高了米粉吸水率,加快了吸水速度,导致稠度及黏度升高,弹性变弱。黏聚性为测试样品通过第1次下压形变后所体现出来的对第2次下压的相对抵抗能力,反映的是受外力作用时,物质抵抗压力的同时仍能紧密连接,保持完整的性质,它反映样品内部结合力的大小^[30]。粳米粉、籼米粉、小麦粉蛋糕糊的黏聚性随着目数的减小而增大,而糯米粉蛋糕糊的黏聚性则随着目数的减小而减少。在相同粒

度下, 籼米粉蛋糕糊黏聚性均低于粳米粉及糯米粉, 可能原因是籼米中所含有的直链淀粉比粳米、糯米多, 且蛋白含量高, 蛋白质含量的多少对米粉的吸水性有影响, 含量越高, 吸水性则越差, 米粒之间的黏聚性就越小^[31]。

表 3 不同品种及粒度米粉对蛋糕糊质构特性的影响

Table 3 Effects of different kinds and particle sizes of rice flour on texture characteristics of cake paste

样品	弹性	回复性	黏聚性
粳米 80 目	0.76 ± 0.01 ^a	0.12 ± 0.02 ^a	0.96 ± 0.03 ^b
粳米 100 目	0.77 ± 0.02 ^a	0.13 ± 0.02 ^a	0.86 ± 0.05 ^c
粳米 120 目	0.78 ± 0.03 ^a	0.13 ± 0.05 ^a	0.86 ± 0.01 ^b
粳米 140 目	0.79 ± 0.02 ^a	0.15 ± 0.06 ^a	0.75 ± 0.01 ^a
籼米 80 目	0.78 ± 0.14 ^a	0.14 ± 0.04 ^a	0.85 ± 0.04 ^a
籼米 100 目	0.81 ± 0.02 ^a	0.16 ± 0.02 ^a	0.84 ± 0.03 ^b
籼米 120 目	0.83 ± 0.02 ^a	0.18 ± 0.05 ^a	0.76 ± 0.12 ^c
籼米 140 目	0.85 ± 0.04 ^a	0.19 ± 0.10 ^a	0.65 ± 0.04 ^a
糯米 80 目	0.74 ± 0.02 ^a	0.12 ± 0.03 ^b	0.76 ± 0.11 ^a
糯米 100 目	0.72 ± 0.03 ^a	0.12 ± 0.02 ^b	0.88 ± 0.07 ^a
糯米 120 目	0.71 ± 0.02 ^a	0.11 ± 0.05 ^a	0.90 ± 0.05 ^b
糯米 140 目	0.70 ± 0.04 ^a	0.08 ± 0.01 ^b	0.92 ± 0.07 ^a
小麦粉 80 目	0.84 ± 0.04 ^a	0.20 ± 0.02 ^a	1.02 ± 0.04 ^b
小麦粉 100 目	0.85 ± 0.03 ^a	0.22 ± 0.06 ^a	1.00 ± 0.04 ^a
小麦粉 120 目	0.85 ± 0.04 ^a	0.25 ± 0.02 ^a	0.93 ± 0.05 ^a
小麦粉 140 目	0.89 ± 0.05 ^a	0.26 ± 0.05 ^a	0.86 ± 0.03 ^a

注: 不同肩标字母表示不同品种、不同目数米粉之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

2.3 不同粒度米粉对蛋糕品质特性的影响

提供重要的理论依据^[33]。米粉的粒度对蛋糕质构

2.3.1 质构特性 质构分析是模拟蛋糕在牙齿两次咀嚼下的机械运动^[32], 为蛋糕品质和感官评定

特性的影响如表 4 所示。

表 4 不同品种及粒度米粉对蛋糕质构特性的影响

Table 4 Effects of different kinds and particle sizes of rice flour on texture characteristics of cake

样品	硬度/gf	弹性	咀嚼性/gf	回复性
粳米 80 目	269.33 ± 4.16 ^b	0.89 ± 0.01 ^c	365.20 ± 4.26 ^b	0.52 ± 0.06 ^b
粳米 100 目	197.33 ± 8.08 ^d	0.90 ± 0.01 ^b	252.88 ± 2.87 ^d	0.53 ± 0.03 ^b
粳米 120 目	215.33 ± 4.16 ^c	0.92 ± 0.01 ^b	266.22 ± 4.46 ^c	0.55 ± 0.01 ^b
粳米 140 目	352.00 ± 5.29 ^a	0.94 ± 0.01 ^a	391.68 ± 6.31 ^a	0.59 ± 0.01 ^a
籼米 80 目	446.67 ± 6.11 ^b	0.89 ± 0.01 ^c	312.06 ± 4.64 ^b	0.54 ± 0.02 ^c
籼米 100 目	404.67 ± 5.03 ^c	0.91 ± 0.02 ^b	264.01 ± 7.55 ^c	0.55 ± 0.01 ^b
籼米 120 目	366.00 ± 8.72 ^d	0.93 ± 0.01 ^a	230.79 ± 2.39 ^d	0.57 ± 0.01 ^b
籼米 140 目	536.67 ± 5.03 ^a	0.94 ± 0.00 ^a	382.08 ± 8.31 ^a	0.60 ± 0.01 ^a
糯米 80 目	232.00 ± 7.21 ^c	0.85 ± 0.01 ^a	440.76 ± 7.85 ^c	0.49 ± 0.00 ^a
糯米 100 目	229.33 ± 8.08 ^d	0.82 ± 0.01 ^b	403.09 ± 3.13 ^d	0.47 ± 0.00 ^b
糯米 120 目	336.67 ± 4.62 ^b	0.82 ± 0.01 ^b	486.74 ± 7.34 ^b	0.46 ± 0.01 ^b
糯米 140 目	356.67 ± 4.16 ^a	0.80 ± 0.01 ^c	576.49 ± 3.38 ^a	0.42 ± 0.01 ^c
小麦粉 80 目	242.00 ± 2.65 ^b	0.91 ± 0.01 ^b	297.03 ± 7.86	0.58 ± 0.02 ^b
小麦粉 100 目	190.67 ± 8.33 ^c	0.91 ± 0.01 ^b	242.97 ± 3.64 ^{da}	0.59 ± 0.01 ^b
小麦粉 120 目	195.33 ± 7.57 ^c	0.93 ± 0.02 ^a	252.75 ± 2.32 ^c	0.60 ± 0.01 ^b
小麦粉 140 目	324.67 ± 3.06 ^a	0.95 ± 0.02 ^a	397.98 ± 2.36 ^a	0.62 ± 0.02 ^a

注: 不同肩标字母表示不同品种、不同目数米粉之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

硬度是第1次压缩过程中的最大峰值力,对蛋糕的食用品质有很大的影响,研究发现蛋糕品质与硬度成反比,硬度越小,蛋糕松软度越好,食用时口感软糯,弹性适宜^[34]。由表4可知,随着米粉目数的减小,蛋糕的硬度变小,这可能是由于蛋糕的保水力随米粉目数的减小而增大;弹性减小,然而不同目数之间没有明显差异;咀嚼性变化不明显;回复性有不明显的减少趋势。米粉蛋糕的硬度与小麦粉蛋糕相比,整体上偏高,其中籼米粉蛋糕的硬度显著高于小麦粉蛋糕的硬度,说明籼米粉对蛋糕硬度有显著影响。米粉中不同的直链淀粉含量会产生不同的理化性质,籼米中含有较多的直链淀粉,直链淀粉在水中易溶,产生的胶体溶液黏度较小,该溶液不稳定,易凝沉,因此直链淀粉含量高的米及其米制品易变硬。有研究表明直链淀粉含量越高,有较多的氢键形成,氢键的增加导致凝胶的弹性与硬度变大^[35],因此使得蛋糕的硬度、咀嚼性等质构特性有一定的变化。此外直链淀粉溶出后可以和脂肪形成螺旋包合物,也会使蛋糕的硬度增加(图4)^[27]。糯米粉蛋糕的硬度和咀

嚼性均大于小麦粉,弹性小于小麦粉,分析原因应该与其支链淀粉和损伤淀粉含量较高有关,支链淀粉少量溶出,同时损伤淀粉含量升高,提高了米粉吸水率,形成粘稠状态,使得蛋糕起发性变差。粳米粉蛋糕各项质构特性与小麦粉蛋糕最为接近,而糯米粉蛋糕的质构特性与之相差最大。

2.3.2 感官品质 由图5可以看出,粳米粉和籼米粉蛋糕在外观上接近小麦粉蛋糕,保持了良好的外观形状,糯米粉蛋糕表面塌陷,形状不规则。随着目数的增加,即米粉粒度的减小,米蛋糕的感官得分呈先上升后下降的趋势。在120目时,蛋糕的感官得分达到最高。当米粉在140目,粒径较小时,质地过于松软,食用时咀嚼性差,口感欠佳,蛋糕咀嚼性和弹性下降,蛋糕品质下降。综合图5、图6所示,与糯米粉相比,籼米粉和粳米粉更适合制成蛋糕,由粳米粉为原料制作的蛋糕品质更好,米粉的粒度分布会影响蛋糕的外观、形态、色泽、组织、滋味与口感、杂质以及蛋糕的整体质量。不同品种的米粉也会对其成品蛋糕品质产生影响,综上所述,对其外观和口感等方面分析,最终的感



注:J代表粳米粉,N代表糯米粉,X代表籼米粉,M代表小麦粉;80,100,120,140代表不同目数。

图5 米粉种类及其粒度对蛋糕外观的影响

Fig.5 Effect of rice flour type and particle size on cake appearance

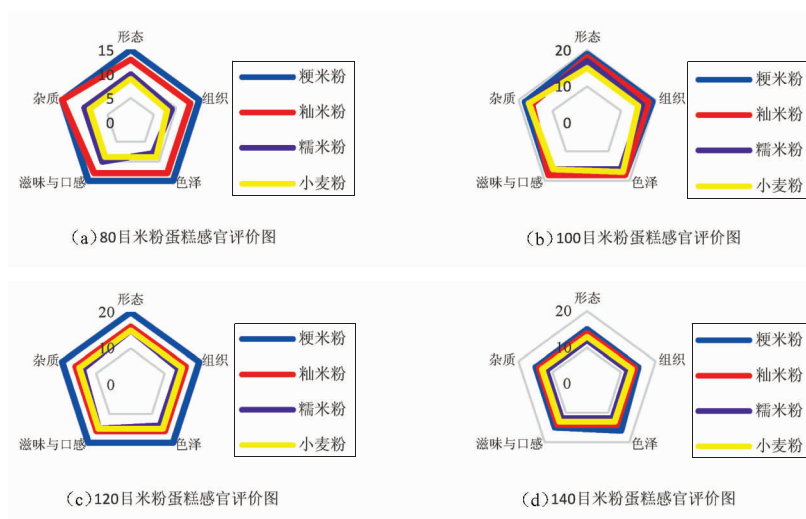


图 6 不同粒度及品种米粉蛋糕的感官评价图

Fig.6 Sensory evaluation of rice flour cakes with different particle sizes and varieties

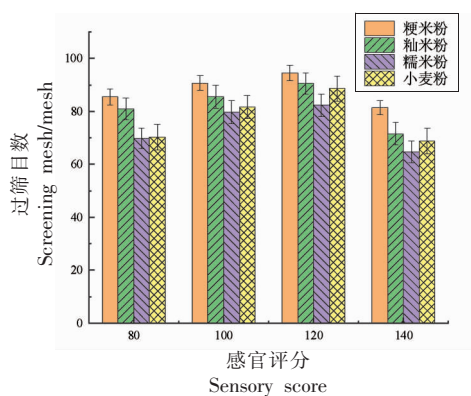


图 7 不同粒度及品种米粉蛋糕的感官评分

Fig.7 Sensory scores of rice flour cakes with different particle sizes and varieties

官评价结果表明,建议使用 120 目的粳米粉制作蛋糕等其它烘焙类产品。

2.4 相关性分析

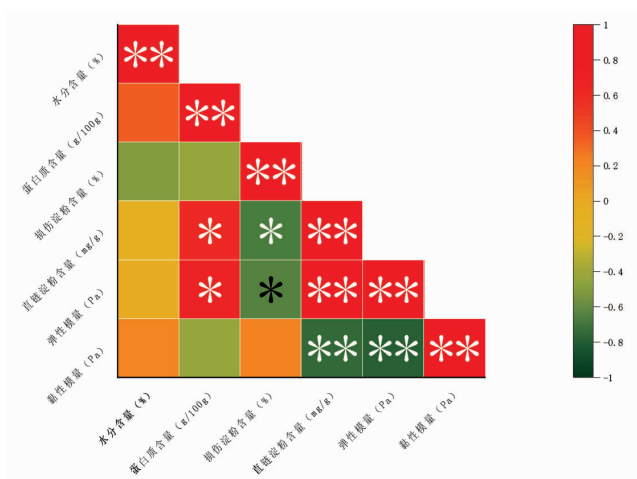
2.4.1 米粉基础成分与蛋糕糊流变学特性之间的相关性

通过皮尔逊分析,分析了米粉基础成分与蛋糕糊流变学特性之间的相关性分析,如图 8 所示。弹性模量与蛋白质和直链淀粉含量分别具有显著正相关性和极显著正相关性,与损伤淀粉含量具有显著负相关性,黏性模量与直链淀粉含量呈极显著负相关,说明蛋糕糊这种黏弹性液体,其弹性主要与其蛋白和淀粉含量相关,而其黏性主要与其直链淀粉含量有关。关于这一点,笔者认为蛋糕糊中的鸡蛋和米粉都为其提供了大量的蛋

白,蛋白溶于蛋糕糊液体中,能够形成一定的三维立体网络结构,因此能够为蛋糕糊这种液体提供一定的弹性,同时在蛋糕糊中也存在一些直链淀粉和支链淀粉,这些淀粉的存在主要由于损伤淀粉保护膜被破坏,使得部分淀粉在蛋糕糊中溶出,直链淀粉链短,而且也与弹性显著相关,因此认为其应该也参与到了网络结构中,而且起到了积极的加强网络的作用^[36];而直链淀粉通常与支链淀粉含量呈反比,支链淀粉分子质量大,溶于蛋白糊时,可使液体黏度增加,因此黏性与直链淀粉含量呈反比,实际上是与支链淀粉含量呈极显著的正比关系。

2.4.2 蛋糕糊流变学与蛋糕品质特性之间的相关性

如图 9 所示,通过皮尔逊分析,得到蛋糕质构特性和感官评价与蛋糕糊流变学特性之间的相关性。通过分析得出,蛋糕质构特性之间,咀嚼性与弹性和回复性分别呈极显著和显著负相关,回复性和弹性之间呈极显著正相关。蛋糕的弹性和回复性越差,咀嚼性越差。咀嚼性是固态食品咀嚼到可吞咽时所作的功,当蛋糕的弹性和回复性越好,其组织越疏松,咀嚼性就会越小^[37]。通过质构特性与感官特性的关系分析可以看出,决定感官特性的质构特性主要为咀嚼性。蛋糕质构特性与蛋糕糊流变学特性之间,蛋糕糊弹性模量与蛋糕成品弹性和回复性呈明显正相关,与咀嚼性呈明显负相关,黏性模量与弹性和回复性呈极显著负相关,



注: * 显著相关($P < 0.05$); ** 极显著相关($P < 0.01$)。

图8 米粉基础成分与蛋糕糊流变学特性之间的相关性分析

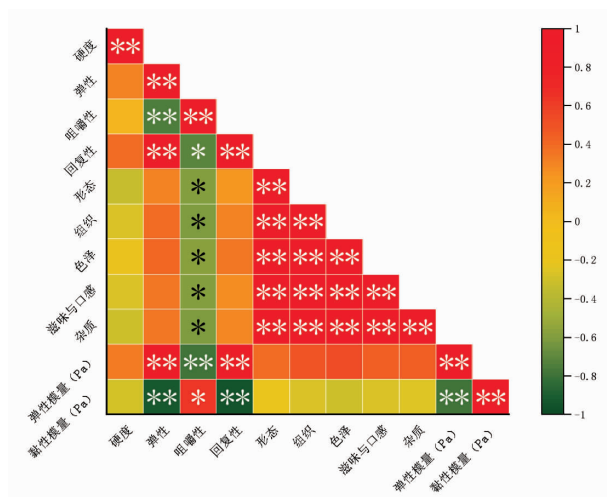
Fig.8 Correlation analysis between basic ingredients of rice flour and rheological properties of cake batter

与咀嚼性呈显著正相关。该结果说明对于不同粒度的米粉,蛋糕质构特性与蛋糕糊流变学特性之间存在显著的相关性,通过分析蛋糕糊基础流变学中 G' 与 G'' 的变化可以预测蛋糕质构的变化。

3 结论

蛋白质和直链淀粉含量随粒度减小变幅不大,损伤淀粉含量随粒度的减小呈增加趋势。用米粉制作的蛋糕糊的线性黏弹性行为是黏性与弹性性质共同决定的结果。籼米粉和粳米粉蛋糕糊的 G' 值均高于糯米粉, G'' 值均低于糯米粉,糯米粉中支链淀粉含量和损伤淀粉含量较高,是影响其蛋糕糊力学特性和蛋糕质构特性的主要因素。米粉的粒度减小后,蛋糕糊分散体系的 G' 增加, G'' 减小。糯米粉蛋糕糊相对于粳米粉、籼米粉蛋糕糊在弹性、回复性以及黏聚性方面有显著差异。米粉蛋糕的硬度与小麦粉蛋糕相比,整体上偏高,籼米粉蛋糕的硬度显著高于其它品种,糯米粉蛋糕的咀嚼性显著高于其它品种米粉和小麦粉蛋糕。随着米粉目数的减小,蛋糕的硬度减少。综合米粉蛋糕感官评分,粒度为 120 目的粳米粉成品的感官评分最好。

蛋白溶于蛋糕糊液体中,能够形成一定的三维立体网络结构,因此能够为蛋糕糊这种液体提



注: * 显著相关($P < 0.05$); ** 极显著相关($P < 0.01$)。

图9 蛋糕糊流变学与蛋糕品质特性之间的相关性分析

Fig.9 Correlation analysis between cake batter rheology and cake quality characteristics

供一定的弹性,同时在蛋糕糊中的直链淀粉能够与脂肪和蛋白形成复杂的络合物,也参与到网络结构中,起到增强弹性的作用。蛋糕糊中的支链淀粉对蛋糕糊的黏性起到积极作用。同时蛋糕糊中淀粉含量与损伤淀粉密切相关,损伤淀粉遇水易吸收膨胀,进入蛋糕糊溶液,与其它成分互相作用,以影响蛋糕糊的黏弹性。蛋糕的弹性和回复性越好,咀嚼性越小,对于不同粒度的米粉,蛋糕质构特性与蛋糕糊流变学特性之间存在显著的相关性,通过分析蛋糕糊基础流变学中 G' 与 G'' 的变化可以预测蛋糕质构的变化。

参 考 文 献

- [1] 张永鑫. 籽粒富锌基因型水稻的农艺特性和遗传效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
ZHANG Y X. Studies on agronomic traits and genetic effects of rice (*Oryza sativa* L.) genotype with Zn-rich grains[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [2] 李军民. 湖南省优质稻米产业链研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
LI J M. Study on Hunan's high-quality rice industrial chain[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007.

- [3] 查春月, 古碧, 林莹, 等. 氧化淀粉对小麦面团品质变化影响研究[J]. 粮食与油脂, 2012, 25(5): 6-9.
ZHA C Y, GU B, LIN Y, et al. Effects of oxidized starch on dough characteristics[J]. Grain and Oil, 2012, 25(5): 6-9.
- [4] 李丽. 醋酸酯变性淀粉对苦荞-小麦混合粉加工特性的影响研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
LI L. The effect of acetate starch on processing properties of buckwheat-wheat mixed flour [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
- [5] NORELLE R R, PETER H R. Epidemiology and clinical presentations of celiac disease[J]. Seminars in Immunopathology, 2012, 34(4): 473-478.
- [6] YING J, ZHU K, QIAN H, et al. Staling of cake prepared from rice flour and sticky rice flour[J]. Food Chemistry, 2007, 104(1): 53-58.
- [7] BOZDOGAN N, KUMCUOGLU S, TAVMAN S. Investigation of the effects of using quinoa flour on gluten-free cake batters and cake properties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(2): 683-694.
- [8] TSUCHIYA K, HAYAKAWA K, NARITA A, et al. Effects of addition of glutinous rice flour on the quality of rice flour cakes[J]. Japanese Journal of Sensory Evaluation, 2013, 17(1): 29-35.
- [9] WANG C L, SUN B Y, ZHANG G, et al. Comparative properties of cakes prepared from rice flour and wheat flour[J]. European Food Research and Technology, 2016(23): 14-17.
- [10] 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. Gelatinization characteristics of rice flour with different varieties and particle sizes and their effects on the quality of rice cakes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 75-82.
- [11] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分含量的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.
China Health and Family Planning Committee. Determination of moisture content in foods: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standard Press of China, 2016: 1-2.
- [12] 国家食品药品监督管理总局. 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3.
China Food and Drug Administration. Determination of protein in foods: GB 5009.5-2016[S]. Beijing: Standard Press of China, 2016: 1-3.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 大米直链淀粉含量的测定: GB/T 15683-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-4.
China General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Rice-Determination of amylose content: GB/T 15683-2008[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008: 1-4.
- [14] BRAR D S, KHUSH G S. Wild relatives of rice: A valuable genetic resource for genomics and breeding research[J/OL]. The wild Oryza genomes, 2018: 1-25. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-71997-9_1.
- [15] LAKITAN B, ALBERTO A, LINDIANA L L, et al. The benefits of biochar on rice growth and yield in Tropical Riparian Wetland, South Sumatra, Indonesia[J]. Chiang Mai University Journal of Natural Sciences, 2018, 17(2): 111-126.
- [16] SHEN L, WANG C, FU Y P, et al. QTL editing confers opposing yield performance in different rice varieties [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2018, 60(2): 89-93.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局. 粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法: GB/T 15682-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-4.
China General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Inspection of grain and oils-Method for sensory evaluation of paddy or rice cooking and eating quality: GB/T 15682-2008[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008: 1-4.
- [18] 陈凤莲, 赵亚婷, 贺殷媛, 等. 黑龙江粳米粉对清蛋糕糊力学特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(2): 285-294.
CHEN F L, ZHAO Y T, HE Y Y, et al. The effect of Heilongjiang japonica powder on the mechanical properties of cake past[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(2): 285-294.
- [19] 谢晋. 双蛋白营养蛋糕的研制与营养分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
XIE J. The development and nutrition analysis of dual protein nutritious cake[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2019.

- [20] HE Y Y, CHEN F L, SHI Y G, et al. Physico-chemical properties and structure of rice cultivars grown in Heilongjiang province of China[J]. Food Science and Human Wellness, 2021, 10(1): 45-53.
- [21] LIANG S H. Analysis and evaluation on deep processing technology of rice bran (II): rice bran oil refining and utilization of byproducts[J]. China Oils & Fats, 2005(11): 10-15.
- [22] OH J H, KIM M J, YOO B. Dynamic rheological properties of rice flour - starch blends [J]. Starch Stärke, 2010, 62(6): 321-325.
- [23] SANSANO M, HEREDIA A, GLICERINA V, et al. Influence of chitosan on thermal, microstructural and rheological properties of rice and wheat flours-based batters [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 87: 529-536.
- [24] 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.
WANG X R. The effect of rice on the quality of cake and rice flour quality improvement research[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.
- [25] WANG Z, HUI L, LIANG M, et al. Glutelin and prolamin, different components of rice protein, exert differently *in vitro* antioxidant activities[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 72: 108-116.
- [26] 吕川根, 徐耀垣. 氮素影响稻米品质的机理初探[J]. 江苏农业学报, 1990, 6(3): 64-65.
LÜ C G, XU Y H. The mechanism of improving rice grain quality by nitrogen application[J]. Jiangsu Journal of Agricultural University, 1990, 6(3): 64-65.
- [27] XIA L, HUANG S Q, CHEN C, et al. Changes of starch during thermal processing of foods: Current status and future directions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 119: 320-337.
- [28] 孙玉清, 田文静, 杨新建. 马铃薯全粉对海绵蛋糕品质的影响[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(9): 31-36.
SUN Y Q, TIAN W J, YANG X J. Effect of whole potato flour on the quality of sponge cake[J]. Food and Nutrition in China, 2020, 26(9): 31-36.
- [29] 王颖, 李明娟, 张雅媛, 等. 木薯全粉对蛋糕品质及其质构特性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 179-183, 189.
WANG Y, LI M J, ZHANG Y Y, et al. Effect of the cassava flour on the qualities and texture characteristics of cake[J]. Food & Machinery, 2017, 33(10): 179-183, 189.
- [30] SPAZIANI M, TORRE M D, STECCHINI M L. Changes of physicochemical, microbiological, and textural properties during ripening of Italian low-acid sausages. Proteolysis, sensory and volatile profiles[J]. Meat Science, 2008, 81(1): 77-85.
- [31] OZYIGIT E, EREN S, KUMCUOGLU S, et al. Large amplitude oscillatory shear (LAOS) analysis of gluten-free cake batters: The effect of dietary fiber enrichment[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 275: 109867.
- [32] 张伟君, 钟耀广. 紫马铃薯全粉对马芬蛋糕质构性能和感官品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 211-214, 220.
ZHANG W J, ZHONG Y G. Influence of purple potato powders on the physical properties and sensory qualities of muffin cake[J]. Food Industry Technology, 2017, 38(18): 211-214, 220.
- [33] 韩薇薇, 郭晓娜, 朱科学, 等. 水溶性胶体对无麸质面团流变学特性及面包品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(2): 15-19.
HAN W W, GUO X N, ZHU K X, et al. The effects of water-soluble colloids on rheological properties of gluten-free dough and bread quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(2): 15-19.
- [34] 陈诚, 张宾乐, 王家宝, 等. 蔗糖酯与淀粉酶改善海绵蛋糕品质特性[J]. 食品科学, 2018, 39(24): 1-6.
CHEN C, ZHANG B L, WANG J B, et al. Effect of different sucrose esters and amylases on improving the quality of sponge cake [J]. Food Science, 2018, 39(24): 1-6.
- [35] KOCER D, HICSASMAZ Z, BAYINDIRLI A, et al. Bubble and pore formation of the high-ratio cake formulation with polydextrose as a sugar- and fat-replacer[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3): 953-964.
- [36] 赵旭. 磨粉工艺对生米粉品质特性影响及米粉蛋糕的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016.
ZHAO X. Effect of milling process on quality properties of rice flour and development of rice-flour cake[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2016.
- [37] 刘淑敏, 王浩, 杨庆余, 等. 米糠蛋糕的研制及品

质评定[J]. 食品工业, 2019, 40(4): 54-57.

LIU S M, WANG H, YANG Q Y, et al. Develop-

ment and quality evaluation of rice bran cake [J].

Food Industry, 2019, 40(4): 54-57.

Effects of Rice Flour Variety and Particle Size on Mechanical Properties of Cake Batter and Cake Quality

Chen Fenglian, Guo Yinmei, Li Xinyang, He Yinyuan, Liu Linlin, Ji Yuning,

Dou Xinlai, An Ran, Zhang Na*

(College of Food Engineering, Key Laboratory of Food Science and Engineering of Heilongjiang Ordinary Higher Colleges, Key Laboratory of Grain Food and Comprehensive Processing of Heilongjiang Province, Harbin University of Commerce, Harbin 150028)

Abstract In order to explore the influence of rice flour variety and particle size on the mechanical properties of cake batter and the quality of finished products, this experiment took japonica rice, indica rice and glutinous rice as the research objects, and prepared 80 mesh, 100 mesh, 120 mesh and 140 mesh rice flour respectively. Texture, basic rheological properties and textural properties and sensory qualities of finished cakes were detected analyzed. The basic analysis showed that with the decrease of particle size, the content of damaged starch increased, the maximum content of damaged starch in 140 mesh glutinous rice flour was 23.1%. The dynamic rheology results of cake batters show that all cake batters were more elastic than viscous, and all exhibit semi-solid-like behaviors, which were preliminarily determined to be viscoelastic fluids. The G' value of indica and japonica rice flour cake batter were higher than those of glutinous rice flour, and the G'' value was lower than that of glutinous rice flour; with the decrease of particle size, the G' value of indica and japonica rice flour batter increased and the G'' value decreased, whereas glutinous rice flour was the opposite. The results of large deformation texture properties of cake batter showed that the elasticity and recovery of japonica rice flour, indica rice flour and wheat flour cake batter increased with the decrease of particle size, and the cohesiveness decreased with the decrease of particle size, while the glutinous rice flour decreased as the particle size decreased. Powder cake batter was the opposite. The texture results of cakes showed that with the decrease of rice flour particle size, the hardness of cakes increased; the hardness of rice flour cakes was higher than that of wheat flour cakes, and the hardness of indica rice flour cakes was significantly higher than that of wheat flour and other varieties. According to sensory analysis, the japonica rice flour with a particle size of 120 mesh has the highest score. The elastic modulus had a significant positive and extremely significant positive correlation with the protein and amylose content, respectively, and had a significant negative correlation with the damaged starch content. The viscosity modulus has a very significant negative correlation with the amylose content. For rice flour with different particle sizes, there is a significant correlation between the texture properties of cake and the rheological properties of cake batter. The changes of G' and G'' in the basic rheology of cake batter can predict the change of cake texture.

Keywords rice flour; particle size; rice cake batter; rheology; texture