

# 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

阮征<sup>1,2</sup>, 李赛<sup>1</sup>, 李旭涵<sup>1</sup>, 周雅轩<sup>1</sup>, 李丹丹<sup>1</sup>, 李沐生<sup>1,2\*</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

(2. 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 广东广州 510640)

**摘要:** 针对蛋糕制备中增加高纤原料含量容易带来的结构塌陷等品质不稳定问题, 该研究选择高膳食纤维含量的青稞粉为主要粉料, 探究青稞粉粒径及其高添加量对戚风蛋糕面糊特性和蛋糕品质的影响。以小麦粉基戚风蛋糕为对照, 研究了不同粒径青稞粉 (QKF80、QKF100、QKF120) 在不同添加量 (50%、75%、100%) 下, 面糊的比重、气泡分布、黏度以及蛋糕的比容、气孔结构、质构、感官品质的变化。结果表明, 青稞粉粒径越大, 膳食纤维含量越高, 青稞粉的吸水吸油能力越强。随着青稞粉添加量的增多, 面糊稳定性降低, 比重及黏度增加, 蛋糕比容减小、硬度增加、内部气孔变大, 塌陷程度增加, 感官品质下降。小粒径青稞粉可赋予面糊适当黏度, 使之在缺乏面筋蛋白的情况下也能稳定。QKF120 三种添加量下, 面糊比重范围 0.33~0.36, 糊中气泡分布均匀, 成品蛋糕比容 4.8~5.2 mL/g, 内部气孔结构致密均匀, 质构特性及感官评分与小麦粉基蛋糕无显著性差异。该研究可为开发高含量青稞粉戚风蛋糕提供理论依据和实践参考。

**关键词:** 青稞粉; 粒径; 添加量; 膳食纤维; 面糊特性; 戚风蛋糕; 品质

文章编号: 1673-9078(2022)07-205-216

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.7.1102

## Effects of Grain Size and High Addition of Highland Barley Powder on the Characteristics of Batter and Quality of Chiffon Cake

RUAN Zheng<sup>1,2</sup>, LI Sai<sup>1</sup>, LI Xuhan<sup>1</sup>, ZHOU Yaxuan<sup>1</sup>, LI Dandan<sup>1</sup>, LI Biansheng<sup>1,2\*</sup>

(1.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2.Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In view of the unstable quality such as structural collapse caused by raw materials with high dietary fiber in cake preparation, highland barley powder with high dietary fiber content was selected as the raw material to explore the effects of particle size and high addition amount on the batter characteristics and cake quality of Chiffon cake. Take the wheat flour based Chiffon cake as control, the changes of specific gravity, bubble distribution, viscosity of batter and the specific volume, pore structure, texture and sensory quality of cake with different particle sizes (QKF80, QKF100 and QKF120) under different addition amounts (50%, 75% and 100%) of highland barley powder were studied. The results showed that the larger the grain size was, the higher dietary fiber contents and the stronger water and oil absorption capacity of highland barley powder had. With the increase of highland barley powder, the stability of batter decreased, the specific gravity and viscosity of batter increased, the specific volume and sensory quality of cake decreased, and the hardness, internal pores and degree of collapse increased. The

引文格式:

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

收稿日期: 2021-10-01

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2019B020212002); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400400); 中山市重大科技专项 (2017A1032)

作者简介: 阮征 (1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与保藏, E-mail: zhruan@scut.edu.cn; 共同第一作者: 李赛 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与保藏, E-mail: 13361484076@163.com

通讯作者: 李沐生 (1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与保藏, E-mail: febshli@scut.edu.cn

highland barley powder with small grain size gave the batter appropriate viscosity, so that it could be stable in the absence of gluten protein. Under the three addition amounts of QKF120, the specific gravity range of batter was 0.33~0.36, the bubbles in the batter were evenly distributed, the specific volume of the cake was 4.8~5.2 mL/g, the internal pore structure was dense and uniform, and there was no significant difference in texture characteristics and sensory scores between the highland barley powder and wheat flour based cake. This study can provide theoretical basis and practical reference for the development of Chiffon cake with high content of highland barley powder.

**Key words:** highland barley powder; particle size; addition amount; dietary fiber; batter properties; Chiffon cake; quality

戚风蛋糕由含有低筋小麦粉、蛋黄、油和水的蛋黄糊与蛋白泡沫混合后形成的面糊烘烤而成,具有质地细腻柔软、水分充足、组织细密均匀的特点<sup>[1]</sup>。蛋糕在制作过程中,小麦粉中的麦谷蛋白和麦醇溶蛋白通过吸水形成面筋,面筋与鸡蛋中的蛋白质形成骨架结构,体系中的淀粉粘附在骨架上,形成蛋糕的海绵状组织结构<sup>[2]</sup>。由于小麦粉中膳食纤维等营养物质含量较低,大量研究选择添加部分营养素含量丰富的配料制备营养强化型蛋糕,如辣木叶粉海绵蛋糕<sup>[3]</sup>、胡萝卜海绵蛋糕<sup>[4]</sup>、蔓越莓膳食纤维蛋糕<sup>[5]</sup>、马蹄戚风蛋糕<sup>[6]</sup>等。

青稞 (*Hordeum vulgare L. var.nudum* Hook. F.), 又称为裸大麦,具有“三高两低”,即高膳食纤维、高蛋白、高维生素和低脂、低糖的特点。作为一种营养价值丰富的食物,将青稞运用到烘焙食品中,迎合了当前消费者追求营养、健康的心理<sup>[7]</sup>。但青稞中面筋蛋白含量很低,同时含有较高含量的 $\beta$ -葡聚糖、阿拉伯木聚糖等亲水性膳食纤维,会破坏面糊体系中的蛋白网络,使得蛋糕口感粗糙、组织松散<sup>[8]</sup>。这一蛋白质网络除了与原料成分相关外,与原料的粒径大小也存在一定关系<sup>[9]</sup>。

为了解决富含膳食纤维、缺少面筋蛋白的原料在蛋糕中添加量受限的问题,本研究将比较不同粒径青稞粉与低筋小麦粉的主要营养成分、吸水吸油能力和微观结构的差异,通过改变不同粒径青稞粉在戚风蛋糕中的添加量,探究原料性质与面糊比重、面糊气泡分布、面糊黏度以及蛋糕感官品质、比容、质构、内部气孔结构之间的关系,为高膳食纤维、低面筋蛋白原料在蛋糕等烘焙食品中的应用和开发提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

有机青稞粉,甘肃祁连农庄有机农业发展有限公司;蛋糕用小麦粉、木糖醇、双效泡打粉、塔塔粉,上海枫未实业有限公司;鲜鸡蛋、全脂牛奶、玉米油、白砂糖、食用盐、白醋、食品脱氧剂、蛋糕包装袋等均市售。

### 1.2 仪器与设备

MG25AF-PRR 电烤箱,广东美的微波电器制造有限公司;TG16-WS 台式高速离心机,湖南湘仪离心机仪器有限公司;EM-30 Plus 台式扫描电镜,韩国 COXEM 公司;OLYMPUS-CX21 生物显微镜,日本 HORIBA 公司;DHR-2 旋转流变仪,美国 TA INSTRUMENTS 公司;TA-XT2 物性测试仪,英国 Stable Micro System 公司;Cano Scan LiDE 120 平板扫描仪,日本 Canon 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 原料预处理

将青稞籽粒粉碎至全部能过 80 目筛,按 80~100 目、100~120 目以及<120 目三种粒径范围进行分级,分别标记为 QKF80、QKF100、QKF120;低筋小麦粉统一过 100 目筛,用 Control 表示。所有粉料冷藏备用。

#### 1.3.2 单因素实验

以 100%小麦粉蛋糕为对照,分别考察青稞粉的三种不同粒度(QKF80、QKF100、QKF120)以及不同添加量(50%、75%、100%)对戚风蛋糕面糊特性和品质的影响。

#### 1.3.3 戚风蛋糕的制作

表 1 戚风蛋糕的基本配方

Table 1 Basic recipe of Qifeng cake	
原料	含量
蛋清	100 g
蛋黄	50 g
小麦粉/青稞粉	50 g
牛奶	50 g
玉米油	30 g
白砂糖	15 g
木糖醇	15g
泡打粉	1 g
盐	1 g
塔塔粉	1 g
白醋	0.2 mL

表 1 为蛋糕制作的基本配方。首先将鸡蛋去壳,

蛋黄、蛋清分开；白砂糖和木糖醇混合均匀。在不锈钢盆中加入牛奶、糖和玉米油，搅拌使其呈乳化状态；先向盆中筛入小麦粉、泡打粉和盐，混合均匀后加入蛋黄，再加入相应粒径及添加量的青稞粉，混合至盆内无干粉。在蛋清中加入白醋和塔塔粉，分三次加糖，用打蛋器打发至蛋白呈直立尖状（干性发泡）。将蛋黄糊轻倒入蛋白糊，用橡皮刮刀从底部往上缓缓翻拌至混合均匀。

将烤箱内温度调整至 150 °C，提前预热 10 min。将蛋糕面糊放入模具中（30 g/个，8 个/次，荷载量  $6.25 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ ），震荡模具，排出面糊中的气泡，放入烤箱烘烤 37 min，随后将蛋糕倒扣并冷却至室温。

### 1.3.4 粉料特性的测定

参考 GB/T 5506.1-2008、GB 5009.3-2016、GB 5009.4-2016、GB 5009.5-2016、GB 5009.6-2016、GB 5009.7-2016、AOAC 985.29 测定粉料的湿面筋、水分、灰分、粗蛋白、粗脂肪、总糖及膳食纤维含量。参考 Beuchat 等人<sup>[10]</sup>的方法测定粉料的吸水能力。参考 Abbey 等人<sup>[11]</sup>的方法测定粉料的吸油能力。采用扫描电子显微镜在 400×和 1000×放大水平下观察小麦粉及青稞粉的微观结构。

### 1.3.5 面糊特性的测定

参考张弛<sup>[12]</sup>的方法测定面糊的比重。将新鲜制备的面糊放于光学显微镜下观察并拍摄，使用 Nano Measurer 软件对面糊的气泡分布进行分析。

参考郝月慧<sup>[13]</sup>的方法测定面糊的黏度，并略加修改。面糊的黏度测定采用 DHR-2 旋转流变仪流动模式

下的动态应力扫描，选择具体测试条件为：平板直径选用 40 mm，夹缝距离为 1 mm，温度为 25 °C，样品的剪切速率从  $0.1 \text{ s}^{-1}$  线性增加到  $100 \text{ s}^{-1}$ 。将得到的数据按照式（1）的幂律方程拟合到 Ostwald 模型中：

$$\mu = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

式中：

$\mu$ ——表观黏度，Pa·s；

$K$ ——稠度指数，Pa·s<sup>n</sup>；

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率，s<sup>-1</sup>；

$n$ ——流动指数。

### 1.3.6 蛋糕品质的测定

蛋糕经室温冷却后，参照 GB/T 24303-2009，采用菜籽置换法测定蛋糕的比容。采用 Rodríguez-García 等<sup>[14]</sup>的方法对蛋糕芯进行气孔成像分析。取蛋糕中心（2.0 cm×2.0 cm×2.0 cm），采用物性测试仪 P/36R 探头对其进行质构分析：测前速度 1.0 mm/s，测试速度 1.0 mm/s，测后速度 3.0 mm/s，压缩比 50%，触发力 5 g。

### 1.3.7 蛋糕的感官评价

参考 GB/T 20977-2007 并稍作修改，由 10 名食品专业人员对蛋糕的色泽、外形、内部结构、弹性、风味五个角度进行感官评价，评价标准如表 2 所示。

### 1.3.8 数据处理方法

所有数据平行测定 3 次，结果取平均值；数据结果采用 SPSS 24.0、Excel 2019 和 Origin 2021 处理，采用 Duncan 新复极差分析法，取 95% 置信区间（ $p < 0.05$ ）。

表 2 戚风蛋糕感官评定表

Table 2 Sensory evaluation of Qifeng cake

评价项目	评价标准	得分
色泽（20分）	表面油润、有光泽，总体呈金黄色，无烤焦痕迹	16~20分
	表面油润、光泽较弱，总体呈淡黄色，有些许烤焦	8~15分
	表面干燥、无光泽，总体呈暗色，大面积焦糊	1~7分
外形（20分）	表面光滑无斑点、环纹，上部有较大弧度	16~20分
	表面略有气泡、环纹、稍有收缩变形，上部有一定弧度	8~15分
	表面有深度环纹，收缩变形且凹陷、上部弧度很小	1~7分
内部结构（20分）	有光泽，气孔较均匀、光滑细腻	16~20分
	无光泽，气孔略大稍粗糙、不均匀	8~15分
	气孔较大且粗糙、底部气孔紧密	1~7分
弹性（20分）	柔软有弹性，按下去后复原很快	16~20分
	柔软较有弹性，按下去后复原较快	8~15分
	柔软性、弹性差，按下去后难复原	1~7分
风味（20分）	味纯正、绵软、细腻稍有潮湿感	16~20分
	绵软略有坚韧感、稍干	8~15分
	松散发干、坚韧、粗糙或较粘牙	1~7分

表3 小麦粉及不同粒径青稞粉的基本营养成分含量 (%)

指标	Control	QKF80	QKF100	QKF120
湿面筋	19.50±0.30	/	/	/
水分	13.25±0.05 <sup>a</sup>	10.24±0.02 <sup>d</sup>	10.36±0.05 <sup>c</sup>	10.78±0.07 <sup>b</sup>
灰分	1.40±0.02 <sup>c</sup>	2.89±0.01 <sup>a</sup>	2.50±0.04 <sup>b</sup>	2.56±0.01 <sup>b</sup>
总糖	25.33±0.26 <sup>d</sup>	42.10±1.63 <sup>a</sup>	33.91±0.44 <sup>b</sup>	29.93±0.26 <sup>c</sup>
脂肪	2.41±0.15 <sup>a</sup>	2.52±0.12 <sup>a</sup>	2.51±0.05 <sup>a</sup>	1.86±0.04 <sup>b</sup>
蛋白质	8.16±0.50 <sup>b</sup>	14.28±0.87 <sup>a</sup>	13.40±0.00 <sup>a</sup>	7.95±0.22 <sup>b</sup>
总膳食纤维	2.24±0.01 <sup>c</sup>	17.20±0.13 <sup>a</sup>	14.93±0.06 <sup>b</sup>	15.05±0.06 <sup>b</sup>
可溶性膳食纤维	1.15±0.01 <sup>d</sup>	4.38±0.03 <sup>a</sup>	3.27±0.01 <sup>c</sup>	3.89±0.03 <sup>b</sup>
不溶性膳食纤维	1.09±0.01 <sup>d</sup>	12.82±0.01 <sup>a</sup>	11.65±0.03 <sup>b</sup>	11.16±0.01 <sup>c</sup>

注: 表中同一行的上标字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 粉料的基本营养成分

小麦粉和不同粒径青稞粉的基本营养成分及膳食纤维含量如表3所示。低筋小麦粉中湿面筋含量约为19.5%，青稞粉中则不含湿面筋，因为青稞中麦醇溶蛋白含量少，不能形成面筋网络结构<sup>[15]</sup>。青稞粉的水分含量略低于小麦粉，灰分含量则高于小麦粉。

青稞粉的粒径越大，蛋白质含量越高，QKF120的蛋白质含量与小麦粉无显著性差异；青稞粉的总糖含量和膳食纤维含量均显著性高于小麦粉。其中，QKF80中总膳食纤维（DF）、可溶性膳食纤维（SDF）和不溶性膳食纤维（IDF）含量均为最高，而QKF100和QKF120中三者含量的差异较小。有研究指出，青稞中SDF的主要成分为 $\beta$ -葡聚糖，该物质具有很强的水结合能力，可形成高黏度溶液，具有降低血清胆固醇水平、改善脂质代谢、增强免疫系统等多种生理功能<sup>[16]</sup>。同时，青稞中含有的水溶性阿拉伯木聚糖也能够形成黏性溶液，可能具有与 $\beta$ -葡聚糖相似的生理作用<sup>[17]</sup>。

### 2.2 粉料的吸水吸油能力

食物成分吸水、膨胀和改善其稠度的能力称为吸水能力（WAC）。在烘焙过程中，水合作用会影响原料成分的性质和成分间相互作用，并通过改变面糊的流变行为影响蛋糕的成型<sup>[18]</sup>。

由图1可知，青稞粉的WAC均高于小麦粉，QKF80、QKF100及QKF120的WAC分别为小麦粉的2.5、2.2和1.4倍，与其粒径呈显著正相关。Bressiani等<sup>[19]</sup>也发现，粉料粒径对其吸水能力有较显著的影响，且无论品种如何，粗颗粒粉料的吸水率都更高。

Holtækjølén等<sup>[20]</sup>将不同品种的大麦粉与小麦粉混合制作含40%大麦粉的面包时，发现WAC越高的混合粉中 $\beta$ -葡聚糖含量更多，且混合粉的WAC值会影响面团在发酵和烘焙过程中的流动特性和面包的品质。小麦粉中吸收水分的主要成分为蛋白质和淀粉，而青稞粉中除了含有蛋白质和淀粉外，还含有其他亲水性成分，如 $\beta$ -葡聚糖、阿拉伯木聚糖等非淀粉多糖，能通过氢键结合大量的水分<sup>[21]</sup>。因此，青稞粉会比小麦粉表现出更强的吸水能力，并且可能会对面包性能及蛋糕品质产生影响，不同粒径的青稞粉WAC不同则可能与其所含亲水性物质的类型、含量及大小存在差异有关。

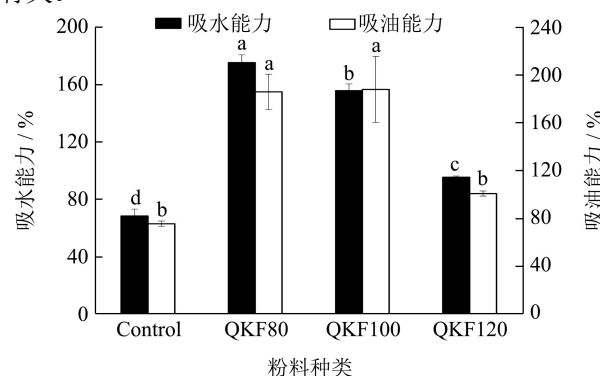


图1 小麦粉及不同粒径青稞粉的吸水吸油能力

Fig.1 Water and oil absorption capacity of wheat flour and highland barley flour

粉料的吸油能力（OAC）主要由粉料中疏水性氨基酸和其它非极性侧链与脂质结合的能力决定<sup>[22]</sup>。由图1可知，不同粒径青稞粉的OAC均高于小麦粉。其中，QKF80及QKF100的OAC不存在显著性差异，约为小麦粉的2.5倍，QKF120的OAC和小麦粉之间也不存在显著性差异，约为小麦粉的1.3倍。Huang等<sup>[23]</sup>认为，粉料良好的吸油能力有助于提高面糊体系的稳定性。

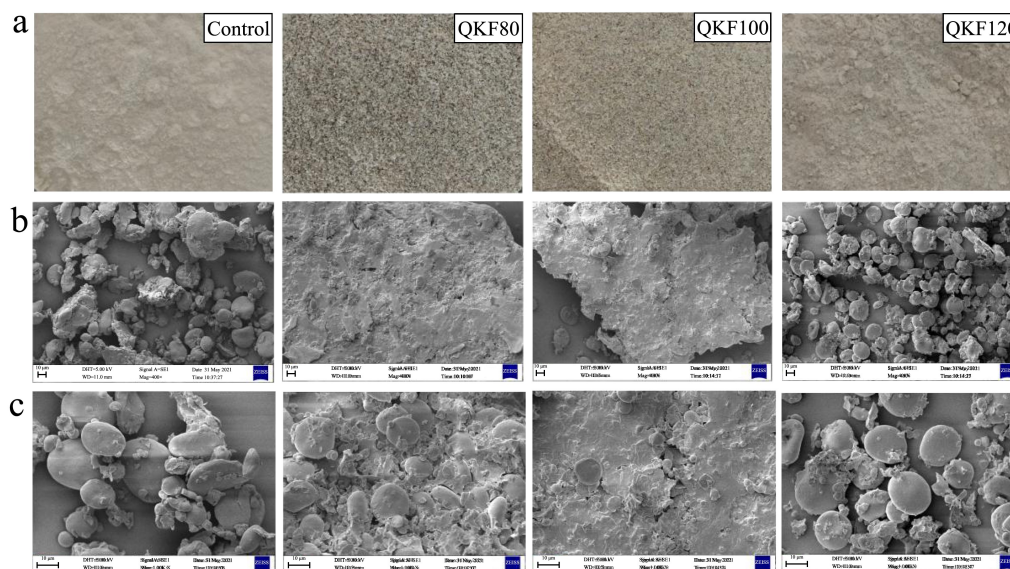


图 2 小麦粉与不同粒径青稞粉的扫描电子图像

Fig.2 Scanning electronic images of wheat flour and highland barley flour

注：图片中每一列为同一种粉；每一行中：(a)为小麦粉与不同粒径青稞粉的图片；(b)为放大水平 400×；(c)为放大水平 1000×。

### 2.3 粉料的微观结构

粉料的微观结构如图 2 所示，表面光滑的卵球状部分为淀粉，无规则形状部分为蛋白质和纤维素。青稞粉的微观结构因粒径不同出现了较大差异。QKF80 和 QKF100 的微观结构较为相似，其淀粉颗粒被大量结构不规则、表面粗糙的纤维结构覆盖。QKF120 的微观结构则与小麦粉较为接近，淀粉颗粒表面光滑，蛋白质及膳食纤维粘附在淀粉颗粒表面或填充在淀粉颗粒之间，与 Su 等<sup>[24]</sup>观察的结果一致。与大粒径青稞粉相比，QKF120 中的纤维粒径更小，分布更松散，对应 WAC 及 OAC 最低。Sangnark 等<sup>[25]</sup>也发现，膳食纤维的结构大小与其 WAC 和 OAC 呈显著正相关，即膳食纤维颗粒越大或纤维状膳食纤维越多时，WAC 和 OAC 越大。由此可见，不同粒径大小的青稞粉所含膳食纤维的类型和结构均存在差异，会影响其吸水吸油能力。

### 2.4 面糊的比重

面糊的比重代表搅拌时混入面糊中气体的保持率，面糊的比重越小，其气体含量越高，等质量面糊烤出的蛋糕体积越大，组织更松软<sup>[26]</sup>。由图 3 可知，对照组面糊的比重为 0.34，青稞粉添加量为 50%时，三种粒径对应的面糊比重与对照组无显著性差异。当青稞粉添加量达 75%后，面糊比重随着青稞粉粒径的减小而减小，与青稞粉的 WAC 呈现出相同的变化规律。QKF80、QKF100 和 QKF120 完全替代小麦粉后面糊的比重分别为 0.46、0.38 和 0.36，均显著大于对

照组，面糊的持气性能可能变差。Premi 等<sup>[27]</sup>采用辣木叶粉替代 2%、5%及 10%的小麦粉，发现面糊的比重随着蛋糕配方中辣木叶粉含量的增加而增加，且均显著性大于对照组面糊的比重。有研究指出，在蛋糕配方中加入一定量的亲水性成分，虽然会增加面糊的比重，但亲水成分形成高黏度溶液的特性也会增加面糊黏度，从而可降低面糊中气体向外逃逸的速率，有利于蛋糕在焙烤前期的品质改善<sup>[28]</sup>。由此可知，在蛋糕配方中加入青稞粉后，面糊中的亲水性成分增加是面糊比重增加的主要原因，但青稞粉粒径较大、替代量较多时，会导致面糊比重过大，可能会对面糊的持气能力和蛋糕体积产生负面影响。

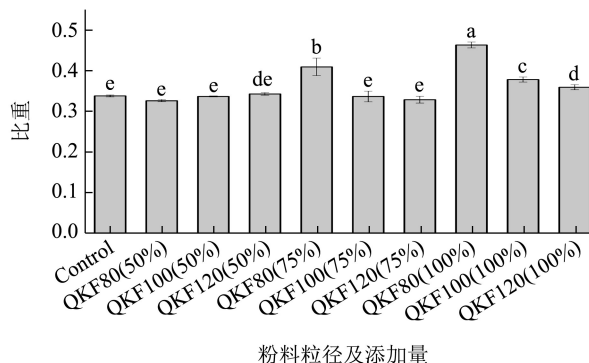


图 3 青稞粉不同粒径及添加量对面糊比重的影响

Fig.3 Effects of different grain size and addition amount of highland barley powder on specific gravity of batter

注：Control 代表小麦粉，QKF80 (50%) 指 80~100 目粒径青稞粉的添加量为 50%，下文同上。

### 2.5 面糊的黏度

图 4 显示, 随着剪切速率的增加, 面糊的黏度逐渐降低, 表现出剪切稀化行为。由幂律方程可得出面糊的稠度系数  $K$  和流动指数  $n$ , 如表 4 所示。 $K$  值反映面糊的黏度大小,  $K$  越大, 黏度越大;  $n$  的值离 1 越远, 流体越偏离理想状态, 其黏度随着剪切速率变化而变化的程度越大<sup>[29]</sup>。

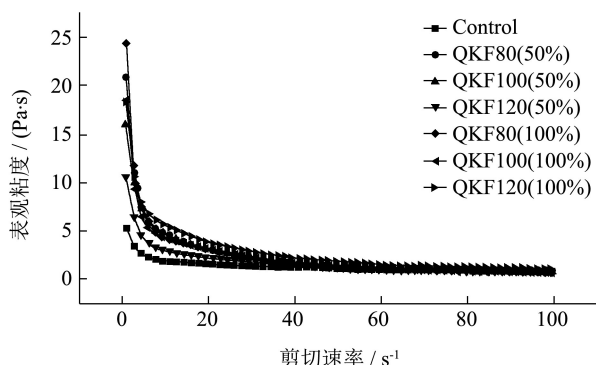


图 4 青稞粉不同粒径及添加量对面糊表观粘度的影响

Fig.4 Effects of different grain size and addition amount of highland barley powder on apparent viscosity of batter

表 4 不同青稞粉粒径及添加量的面糊流变学参数

Table 4 The rheological properties of batter with different size and addition amount of highland barley powder

蛋糕种类	稠度系数 $K$ / (Pa·s <sup>n</sup> )	流动指数 $n$	相关系数 $R^2$
Control	6.38±0.05 <sup>f</sup>	0.53±0.02 <sup>a</sup>	0.963
QKF80 (50%)	23.86±0.18 <sup>b</sup>	0.28±0.01 <sup>d</sup>	0.991
QKF100 (50%)	21.35±0.24 <sup>d</sup>	0.32±0.02 <sup>c</sup>	0.969
QKF120 (50%)	16.31±0.12 <sup>e</sup>	0.37±0.02 <sup>b</sup>	0.930
QKF80 (100%)	26.29±0.37 <sup>a</sup>	0.23±0.00 <sup>e</sup>	0.993
QKF100 (100%)	23.61±0.22 <sup>b</sup>	0.30±0.01 <sup>cd</sup>	0.975
QKF120 (100%)	22.91±0.25 <sup>c</sup>	0.36±0.02 <sup>b</sup>	0.984

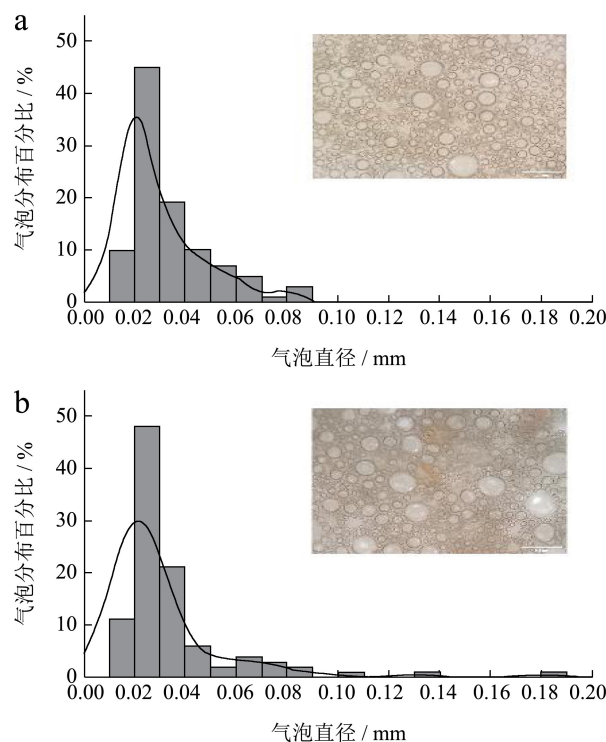
面糊黏度会影响面糊搅打过程中气体的融入和移动, 对比重及气泡分布产生影响, 还会影响气泡在整个烘焙过程中的膨胀和稳定性<sup>[30]</sup>。由表 4 可知, 青稞粉粒径越大、对应粒径大小的青稞粉添加量越多, 面糊的  $K$  值越大,  $n$  值越低, 面糊黏度大小与青稞粉中 DF 的含量及 WAC 的变化一致, 即在蛋糕配方中添加青稞粉时, 面糊的黏度与青稞粉的 DF 含量及 WAC 有关<sup>[31]</sup>。Jaskari 等<sup>[32]</sup>利用全麦粉代替部分小麦粉制作海绵蛋糕时也发现, 随着全麦粉比例的增加, 面糊中  $\beta$ -葡聚糖含量增加, 当面糊被加热时,  $\beta$ -葡聚糖溶解并增加了面糊的黏度。可见, 加入青稞粉后, 面糊中的  $\beta$ -葡聚糖及可溶性阿拉伯木聚糖吸水形成高黏度溶液的特性显著性增加了面糊的黏度。面糊适当的黏度可降低面糊中气体向外逃逸的速率, 有利于蛋糕在焙烤前期的品质改善, 但若黏度过大, 搅打过程中空气

难以进入面糊, 面糊持气性能又会降低<sup>[28]</sup>。因此, 青稞粉粒径过大时, 可能会破坏面糊的持气性能, 与比重的实验结果一致。

## 2.6 面糊的气泡大小及分布

面糊中气泡的存在和分布主要影响产品的口感、质构和体积等<sup>[33]</sup>。面糊气泡大小和气泡分布的均匀性如图 5 所示, 直径处于 0.02~0.04 mm 的气泡均占多数。对照组面糊气泡大小及分布较为均匀, 气泡直径均处于 0.01~0.09 mm 之间。QKF80 及 QKF100 相应添加量下气泡的分布情况则基本一致, 且都出现了少量直径较大的异常气泡。在蛋糕烘烤的过程中, 这些异常气泡容易上浮破裂, 导致面糊体系不稳定, 造成蛋糕塌陷、体积变小、气孔粗糙且不均匀<sup>[34]</sup>。出现异常气泡可能与青稞粉增大了面糊体系黏度, 导致大气泡在面糊中无法逸出有关。QKF120 的面糊中气泡直径均处于 0.01~0.12 mm 之间, 气泡分布也比较均匀一致。可见青稞粉粒径较小时, 面糊中的气泡状态不会受到较大影响。

当青稞粉添加量达 100%时, QKF80 及 QKF100 的面糊中气泡分布变得稀疏, 比重显著增加, 面糊持气量下降。虽然 QKF100 与 QKF120 对应面糊的黏度相近, 但 QKF100 的面糊气泡数量及均匀性不及 QKF120。Gómez 等<sup>[35]</sup>认为原料颗粒过大会造成面糊中气泡过大、分布不规则, 面糊呈现出不连续性, 影响其稳定性和蛋糕最终的体积。因此, 认为青稞粉粒径过大会影响面糊中气泡的大小和气泡分布的均匀性, 而加入粒径较小的青稞粉不会对面糊的持气性能产生负面影响。



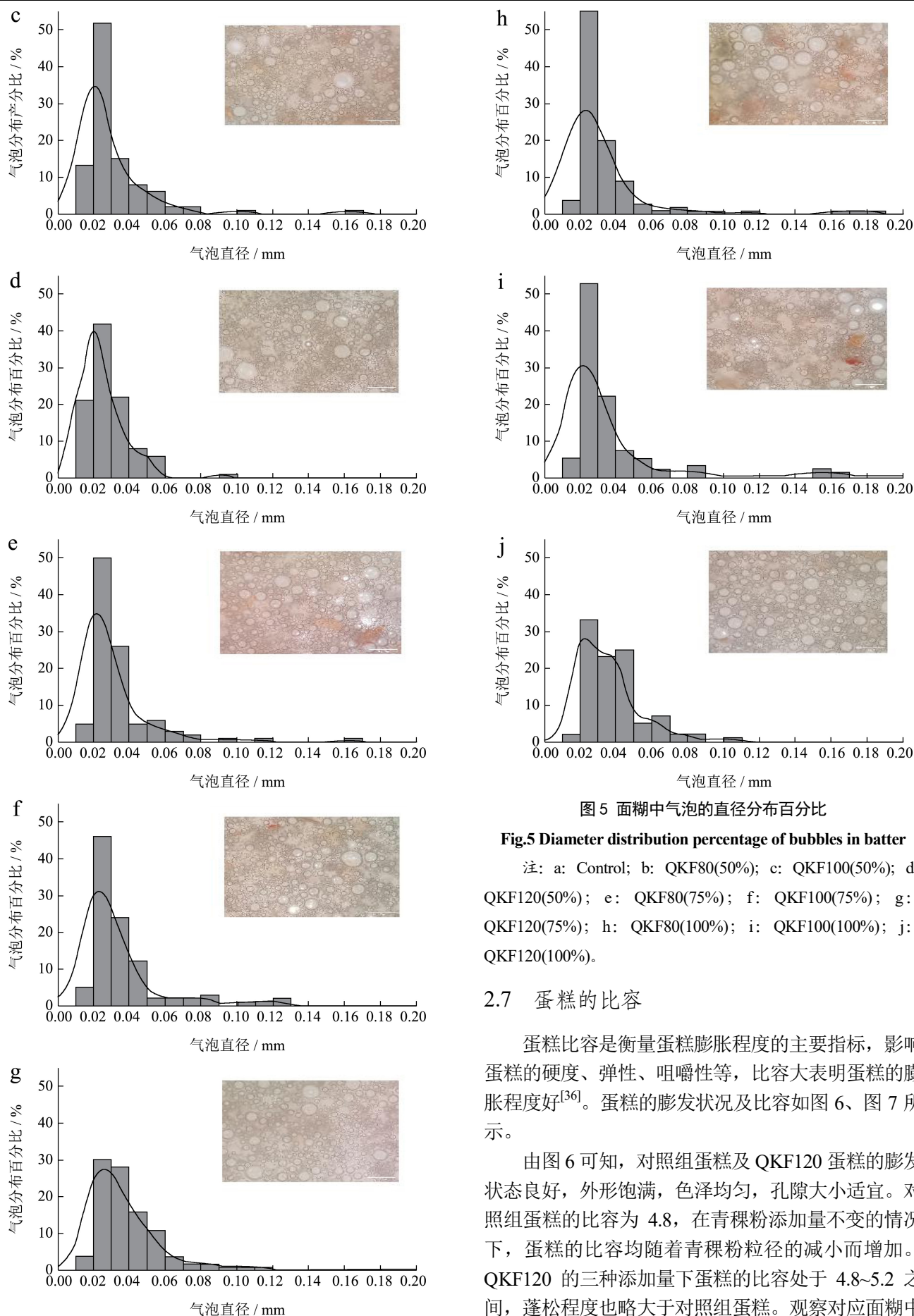


图5 面糊中气泡的直径分布百分比

Fig.5 Diameter distribution percentage of bubbles in batter

注: a: Control; b: QKF80(50%); c: QKF100(50%); d: QKF120(50%); e: QKF80(75%); f: QKF100(75%); g: QKF120(75%); h: QKF80(100%); i: QKF100(100%); j: QKF120(100%)。

### 2.7 蛋糕的比容

蛋糕比容是衡量蛋糕膨胀程度的主要指标,影响蛋糕的硬度、弹性、咀嚼性等,比容大表明蛋糕的膨胀程度好<sup>[36]</sup>。蛋糕的膨发状况及比容如图6、图7所示。

由图6可知,对照组蛋糕及QKF120蛋糕的膨发状态良好,外形饱满,色泽均匀,孔隙大小适宜。对照组蛋糕的比容为4.8,在青稞粉添加量不变的情况下,蛋糕的比容均随着青稞粉粒径的减小而增加。QKF120的三种添加量下蛋糕的比容处于4.8~5.2之间,蓬松程度也略大于对照组蛋糕。观察对应面糊中

的气泡状态可知, 该粒径的青稞粉可起到稳定面糊气泡的作用, 有利于蛋糕的膨发。根据 Schirmer 等<sup>[37]</sup>的研究, 蛋糕气孔的膨胀程度主要取决于烘焙过程中的加热速率、CO<sub>2</sub> 生成量以及蛋白质变性和淀粉糊化引起的结构变化。在焙烤过程中, 面糊温度达到 70 °C 左右时, 面糊气泡周围和连续相中的蛋白质会发生变性、交联, 与分散其中的淀粉颗粒形成凝胶网络, 使得面糊体系获得稳定, 蛋糕开始成型<sup>[38]</sup>。研究显示, 纤维的强吸水力会使得面糊中促进颗粒运动的游离水减少, 从而影响淀粉的糊化过程和淀粉筋基质的形成<sup>[39]</sup>。因此, 青稞粉中的膳食纤维会对蛋糕烘焙时的淀粉糊化及蛋白质网络结构形成过程产生影响, 从而影响面糊中的气泡在蛋糕凝固前的膨胀及定型。

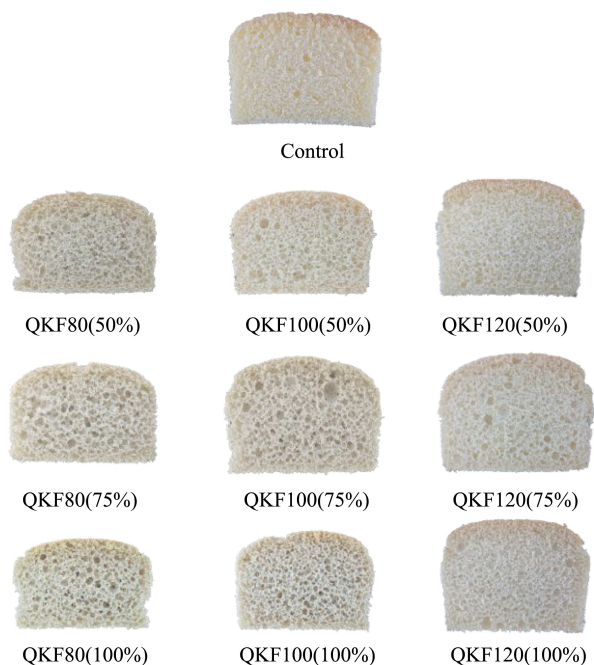


图 6 戚风蛋糕的膨发状况

Fig.6 Swelling state of Chiffon cake

图 7 表明, 青稞粉添加量达 75%后, 青稞粉粒径显著影响蛋糕的比容, QKF80 的蛋糕比容显著低于对照组及 QKF100、QKF120 蛋糕的比容。首先, QKF80 中的 SDF 会吸收大量水分, 阻碍面糊中淀粉-蛋白质凝胶网络的形成, 且部分膳食纤维颗粒过大还会加剧对面筋网络结构的破坏, 支撑面糊气泡在受热过程中膨胀所需要的力减弱, 蛋糕难以膨发, 体积变小<sup>[40]</sup>。其次, QKF80 中面糊的比容及黏度过大, 搅拌时气体难以进入面糊, 面糊中气泡含量少且分布不均匀, 蛋糕的比容变小。而 QKF100 及 QKF120 制得的面糊比重及粘度比小麦蛋糕面糊略大, 一定程度上有助于面

糊烘烤过程中气泡的保留及膨胀; 同时, 两者的 SDF 含量均比 QKF80 少, 对淀粉的糊化过程影响较小。QKF120 中尺寸较小的膳食纤维还可能因其结构特性有助于面糊形成一定量保留气泡的结构, 从而对面糊体系起到支撑作用, 有助于蛋糕体积及比容的进一步增加<sup>[41]</sup>。

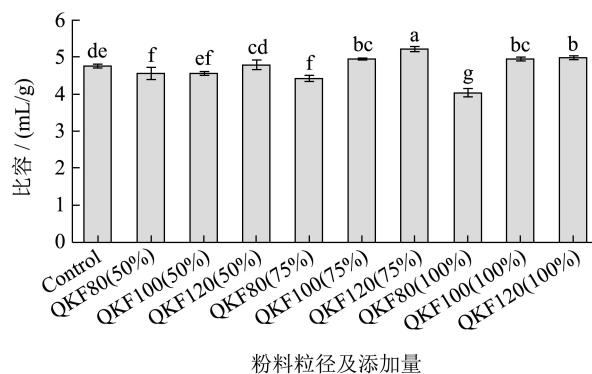


图 7 青稞粉不同粒径及添加量对戚风蛋糕比容的影响

Fig.7 Effects of different grain size and addition amount of highland barley powder on specific volume of cake

## 2.8 蛋糕的气孔结构

蛋糕内部的气孔结构源于烘焙过程中气孔的形成和增长, 多孔的蛋糕通常质地更柔软, 感官品质更高<sup>[42]</sup>。图 8 为蛋糕内部经平板扫描仪扫描及 Image J 软件处理后的蛋糕气孔结构图。对照组蛋糕和 QKF120 的蛋糕内部气孔小而细, 且分布均匀; 随着青稞粉粒径变大, 蛋糕内部气孔分布逐渐变得稀疏和不均匀, 且添加量越大, 气孔结构也越大。蛋糕中气孔结构的状态主要与烘焙过程中面糊的气泡变化程度有关<sup>[14]</sup>, 由于青稞粉粒径较大、添加量过高的面糊中气泡不稳定, 进而影响了蛋糕内部的组织状态。

表 5 为蛋糕气孔的相关参数, 其中, CD 值表示单位面积的气孔数, AF 是气孔表面积分率, CD/AF 值反映蛋糕内部气孔的大小及均匀程度, 值越大, 蛋糕内部组织结构越好。对照组蛋糕的 CD 及 CD/AF 最大, AF 值最小, 内部气孔大小及分布状态较好。采用青稞粉替代小麦粉后, 蛋糕的 CD 值和 CD/AF 值均显著性减小, AF 值增加, 蛋糕内部气孔数量减少, 而单个气孔的面积有所增加; 相同青稞粉添加量下, QKF120 蛋糕的 CD 值和 CD/AF 值均显著性高于 QKF80 及 QKF100 蛋糕, 说明含小粒径青稞粉的蛋糕内部气孔数量及分布情况更好, 与图 8 呈现的效果一致。



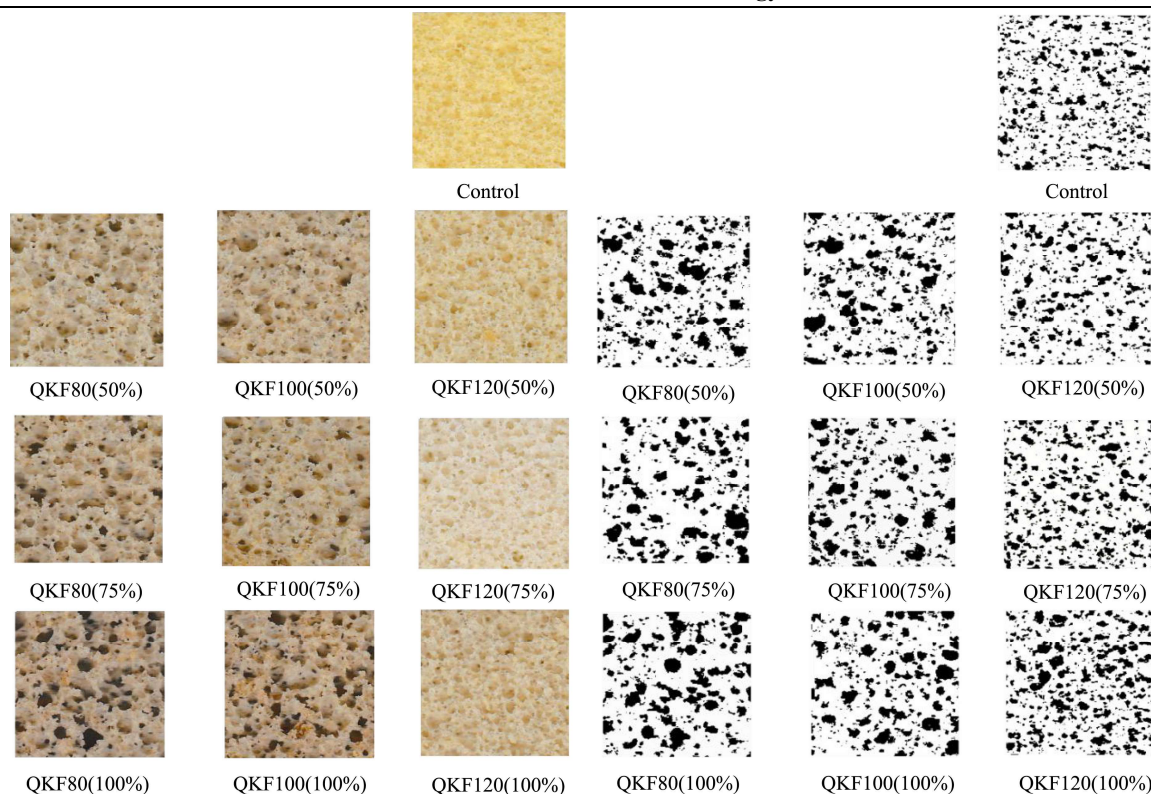


图 8 蛋糕内部气孔扫描图及阈值转化图

Fig.8 Scanning diagram and threshold transformation diagram of internal pores of cake

表 5 蛋糕芯气孔密度及气孔表面积分率

Table 5 Porosity density and area fraction of cake

蛋糕种类	CD/(cells/cm <sup>2</sup> )	AF/%	CD/AF
Control	119.25±6.01 <sup>a</sup>	16.54±1.19 <sup>d</sup>	7.24±0.77 <sup>a</sup>
QKF80 (50%)	72.25±8.02 <sup>cd</sup>	19.82±1.58 <sup>bc</sup>	3.64±0.21 <sup>cd</sup>
QKF100 (50%)	72.50±6.28 <sup>cd</sup>	18.92±0.25 <sup>bcd</sup>	3.83±0.37 <sup>c</sup>
QKF120 (50%)	94.00±12.45 <sup>b</sup>	19.00±2.90 <sup>bcd</sup>	4.96±0.14 <sup>b</sup>
QKF80 (75%)	52.58±2.98 <sup>e</sup>	17.07±0.58 <sup>cd</sup>	3.08±0.12 <sup>cde</sup>
QKF100 (75%)	61.83±6.10 <sup>de</sup>	16.50±1.37 <sup>d</sup>	3.75±0.19 <sup>cd</sup>
QKF120 (75%)	91.25±7.50 <sup>b</sup>	18.66±1.22 <sup>bcd</sup>	4.92±0.70 <sup>b</sup>
QKF80 (100%)	48.17±1.28 <sup>e</sup>	20.50±0.65 <sup>ab</sup>	2.35±0.10 <sup>e</sup>
QKF100 (100%)	54.08±10.25 <sup>e</sup>	17.75±1.84 <sup>bcd</sup>	3.05±0.57 <sup>de</sup>
QKF120 (100%)	79.67±4.91 <sup>bc</sup>	22.95±0.60 <sup>a</sup>	3.47±0.19 <sup>cd</sup>

注：表中同一列的上标字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

表 6 同。

Karp 等<sup>[41]</sup>研究发现,与对照组蛋糕相比,蛋糕的 CD 值随着燕麦纤维的增加出现了先增加后降低的趋势,认为燕麦纤维粉的添加量较少时,膳食纤维的特性有助于蛋糕形成保留气泡的结构,而纤维含量过高会破坏蛋糕定型过程中淀粉结构的形成,进而破坏气孔结构的形成。也有研究指出,蛋糕 CD 值的变化与可溶性纤维、水胶体和水形成的网络有关<sup>[43]</sup>。与上述研究比较分析可知,由于本研究中青稞粉添加量较高,会显著降低蛋糕的 CD 值。青稞粉粒径较大时,所含

膳食纤维对蛋糕结构的破坏作用更大,出现较多不均匀大气孔;青稞粉粒径较小时,膳食纤维多为颗粒状,分布更规则,可溶性膳食纤维含量也较少,适量吸水后形成的凝胶网络有助于蛋糕的膨胀定型。

## 2.9 蛋糕的质构

蛋糕的质构特性如表 6 所示。对照组蛋糕的硬度最小,为 38.49 g; QKF80 及 QKF100 蛋糕的硬度均随着添加量的增加而增加,分别为 52.93~75.80 g 和 45.96~73.31 g, QKF120 蛋糕的硬度则与对照组不存在显著性差异,为 40.96~42.55 g。蛋糕硬度变大可能与蛋糕体积减小有关, Gomez 等<sup>[44]</sup>也发现蛋糕的体积和硬度之间存在很强的相关性。QKF120 替代小麦粉时,蛋糕的胶粘性和咀嚼性与对照组蛋糕不存在显著性差异,与硬度的变化一致。硬度、胶粘性和咀嚼性与蛋糕品质呈负相关,其值越大,蛋糕的松软度及口感越差<sup>[45]</sup>。由此可知,青稞粉粒径较小时,蛋糕的品质更好。

对照组蛋糕的弹性为 0.94,实验组蛋糕的弹性均低于对照组,为 0.89~0.93。青稞粉添加量大于 75%时, QKF80 及 QKF100 蛋糕的弹性最差,其余蛋糕的弹性与对照组则不存在显著性差异。Rodríguez-García 等<sup>[14]</sup>认为弹性值的降低与蛋糕内部气孔数量的减少有关。分析青稞蛋糕的质构特性可知,青稞粉的粒径较大且

添加量较多时,会对蛋糕的品质产生影响,当添加的量以及青稞粉粒径较小时,虽然其硬度、胶粘性、咀

嚼性、弹性与小麦蛋糕仍存在一定差异,但均处于可接受范围之内。

表6 蛋糕的质构特性

Table 6 Texture characteristics of cake

蛋糕种类	硬度/g	弹性	胶粘性	咀嚼性/g
Control	38.49±2.60 <sup>c</sup>	0.94±0.04 <sup>a</sup>	29.06±2.29 <sup>d</sup>	27.36±2.67 <sup>c</sup>
QKF80 (50%)	52.93±3.73 <sup>b</sup>	0.93±0.01 <sup>ab</sup>	39.57±2.97 <sup>b</sup>	36.87±2.27 <sup>b</sup>
QKF100 (50%)	45.96±6.74 <sup>bc</sup>	0.93±0.00 <sup>a</sup>	35.04±5.58 <sup>bcd</sup>	32.51±5.20 <sup>bc</sup>
QKF120 (50%)	42.55±3.42 <sup>c</sup>	0.93±0.03 <sup>ab</sup>	33.04±2.11 <sup>bcd</sup>	30.85±1.28 <sup>bc</sup>
QKF80 (75%)	68.79±5.40 <sup>a</sup>	0.90±0.00 <sup>c</sup>	50.41±3.69 <sup>a</sup>	45.13±3.28 <sup>a</sup>
QKF100 (75%)	52.23±8.68 <sup>b</sup>	0.89±0.01 <sup>c</sup>	37.66±7.38 <sup>bc</sup>	33.45±6.42 <sup>bc</sup>
QKF120 (75%)	43.59±1.68 <sup>bc</sup>	0.93±0.01 <sup>a</sup>	33.15±1.23 <sup>bcd</sup>	30.96±1.01 <sup>bc</sup>
QKF80 (100%)	75.80±3.79 <sup>a</sup>	0.89±0.01 <sup>c</sup>	54.33±2.92 <sup>a</sup>	48.20±2.90 <sup>a</sup>
QKF100 (100%)	73.31±4.15 <sup>a</sup>	0.88±0.01 <sup>c</sup>	53.00±3.48 <sup>a</sup>	46.68±3.18 <sup>a</sup>
QKF120 (100%)	40.96±1.27 <sup>c</sup>	0.91±0.03 <sup>abc</sup>	30.48±1.32 <sup>cd</sup>	27.78±1.94 <sup>c</sup>

## 2.10 蛋糕的感官评价

口感是影响食品质量和消费者接受度的重要参数。随着青稞粉的加入,蛋糕的口感和风味会发生显著变化,图9为对照组及实验组蛋糕色泽、外形、内部结构、弹性及风味的感官评分。

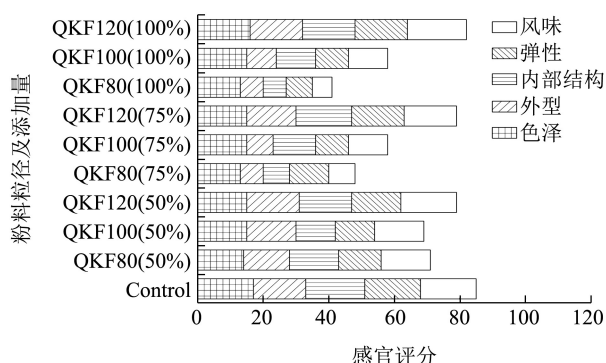


图9 戚风蛋糕的感官评分结果

Fig.9 Sensory scoring results of Chiffon cake

实验结果显示, QKF120 的蛋糕感官评分均达到了 80 分,说明该粒径下蛋糕的各项品质较好,青稞粉对蛋糕所带来的风味及色泽变化并不会对蛋糕的整体接受度产生负面影响。QKF80 及 QKF100 添加量达 75%后,蛋糕的感官评分均低于 60,外形、内部结构及弹性得分显著降低( $p<0.05$ ),说明蛋糕的比容大小、质构特性及内部气孔结构状态会降低消费者对蛋糕的喜爱程度。

## 3 结论

本实验以戚风蛋糕作为载体,通过改变不同粒径青稞粉在戚风蛋糕配方中的添加量,探究了青稞粉与面糊特性、蛋糕品质之间的关系。结果表明,青稞粉

粒径及添加量的变化对面糊比重、黏度、气泡分布和蛋糕比容、气孔结构、质构及感官品质均会产生影响。青稞粉粒径较大时,所含 DF、SDF、IDF 较多,且膳食纤维表面粗糙、结构不规则,比小粒径青稞粉具有更强的吸水吸油能力。青稞粉的加入会影响面糊的比重、黏度及面糊中气泡的分布及稳定性。当加入的青稞粉粒径较小时,面糊的比重及黏度增加,有利于面糊的稳定,在面筋含量极少的情况下也能支撑蛋糕在烘烤过程中成型;青稞粉粒径较大时,膳食纤维含量增加,其结构对面糊气泡的连续性、稳定性产生影响,面糊比重及黏度显著增加,进而影响了蛋糕的成型,蛋糕的比容减小,内部气孔结构变大,硬度增加,口感变差。比较几种蛋糕的品质特性及感官评分可知, QKF120 三种添加量下制得的蛋糕质地柔软、风味适宜,具有开发为高含量青稞戚风蛋糕的潜力。

## 参考文献

- [1] 李登峰.戚风蛋糕的制作工艺及影响因素分析[J].现代食品, 2020,16:99-101  
LI Dengfeng. Analysis on production technology and influencing factors of Qifeng cake [J]. Modern Food, 2020, 16: 99-101
- [2] 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. Study on preparation and aging characteristics of potato cake [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018
- [3] Premi M, Sharma H K. Effect of drumstick leaves powder on the rheological, micro-structural and physico-functional properties of sponge cake and batter [J]. Journal of Food

- Measurement & Characterization, 2018, 12: 11-21
- [4] Fakhreddin S, Mahdi K, Ehsan A, et al. Potential of sponge cake making using infrared-hot air dried carrot [J]. Journal of Texture Studies, 2016, 47(1): 34-39
- [5] 刘翔,董善富.蔓越莓膳食纤维蛋糕的研制[J].农产品加工, 2020,23:17-19  
LIU Xiang, DONG Shanfu. Development of cranberry dietary fiber cake [J]. Agricultural Products Processing, 2020, 23: 17-19
- [6] 卢凯玲,崔娜,韦靓,等.响应面法优化马蹄戚风蛋糕工艺的研究[J].现代食品,2020,22:112-117  
LU Kailing, CUI Na, WEI Liang, et al. Optimization of horseshoe Qifeng cake process by response surface methodology [J]. Modern Food, 2020, 22: 112-117
- [7] 张伊迪.青稞发芽过程中营养成分含量变化的研究[D].上海:上海交通大学,2015  
ZHANG Yidi. Study on the change of nutrient content of highland barley during germination [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015
- [8] 徐向波,刘婧,尤香玲,等.青稞藿香低糖蛋糕的研制与配方优化[J].粮食与油脂,2020,7:41-44  
XU Xiangbo, LIU Jing, YOU Xiangling, et al. Development and formula optimization of highland barley Huoxiang low sugar cake [J]. Grain and Oil, 2020, 7: 41-44
- [9] Donelson D H, Yamazaki W T. Soft wheat flour particle-size analysis by integrated sieve and coulter counter procedure [J]. Cereal Chemistry, 1972, 6: 641-648
- [10] Beuchat, Larry R. Functional and electrophoretic characteristics of succinylated peanut flour protein [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1977, 25(2): 258-261
- [11] B W Abbey, G O Ibeh. Functional properties of raw and heat processed cowpea (*Vigna unguiculata*, walp) flour [J]. Journal of Food Science, 1988, 53(6): 1775-1777
- [12] 张驰.发芽青稞熟粉的功能特性及其在烘焙食品中的应用研究[D].广州:华南理工大学,2020  
ZHANG Chi. Functional characteristics of germinated highland barley cooked powder and its application in baked food [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020
- [13] 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  
HAO Yuehui. Comparative study on the effects of three sugar alcohols on the quality of sugar free sponge cake [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014
- [14] Rodríguez-García 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
- [15] 臧靖巍.青稞淀粉和蛋白质的化学组成及其工艺性质研究[D].重庆:西南农业大学,2005  
ZANG Jingwei. Study on chemical composition and technological properties of highland barley starch and protein [D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2005
- [16] Rieder A, Holtekjølen A K, Sahlstrøm M S, et al. Effect of barley and oat flour types and sourdoughs on dough rheology and bread quality of composite wheat bread [J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(1): 44-52
- [17] Izydorezyk M S, Dexter J E. Barley  $\beta$ -glucans and arabinoxylans: molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products - a review [J]. Food Research International, 2008, 41(9): 850-868
- [18] Blanco Canalis M S, León A E, Ribotta P D. Incorporation of dietary fiber on the cookie dough. Effects on thermal properties and water availability [J]. Food Chemistry, 2018, 271(15): 309-317
- [19] Bressiani J, Santetti G S, Oro T, et al. Hydration properties and arabinoxylans content of whole wheat flour intended for cookie production as affected by particle size and Brazilian cultivars [D]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 150: 1-8
- [20] Holtekjølen A K, Olsen H H R, Færgestad E M, et al. Variations in water absorption capacity and baking performance of barley varieties with different polysaccharide content and composition [J]. LWT - Food Science and Technology, 2008, 41(10): 2085-2091
- [21] Ahmed J. Effect of barley-glucan concentrate on oscillatory and creep behavior of composite wheat flour dough [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 152: 85-94
- [22] Wani I A, Sultan N, Qadir N, et al. Physico-chemical, functional and antioxidant properties of wild barnyard grass (*Echinochloa crusgalli* L.) seed flour as affected by gamma-irradiation [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2021, 183: 1-7
- [23] Huang M, Yang H. Eucheuma powder as a partial flour replacement and its effect on the properties of sponge cake [J]. LWT, 2019, 110: 262-268
- [24] Su C, Saleh A, Zhang B, et al. Effects of germination followed by hot air and infrared drying on properties of naked barley flour and starch [J]. International Journal of Biological

- Macromolecules, 2020, 165: 2060-2070
- [25] Sangnark A, Noomhorm A. Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse [J]. Food Chemistry, 2003, 80(2): 221-229
- [26] 王凤,陈诚,杨紫璇,等.不同乳化剂在中日两国面粉重油蛋糕面糊体系中的比较研究[J].食品与机械,2017,33(1):1-6  
WANG Feng, CHEN Cheng, YANG Zixuan, et al. Comparative study of different emulsifiers in flour heavy oil cake batter system between China and Japan [J]. Food and Machinery, 2017, 33(1): 1-6
- [27] Premi M, Sharma H K. Effect of drumstick leaves powder on the rheological, micro-structural and physico-functional properties of sponge cake and batter [J]. Journal of Food Measurement & Characterization, 2018, 12: 11-21
- [28] Sowmya M, Jeyarani T, Jyotsna R, et al. Effect of replacement of fat with sesame oil and additives on rheological, microstructural, quality characteristics and fatty acid profile of cakes [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(7): 1827-1836
- [29] Tan M C, Chin N L, Yusof Y A, et al. Improvement of eggless cake structure using ultrasonically treated whey protein [J]. Food & Bioprocess Technology, 2015, 8(3): 605-614
- [30] S Martínez-Cervera, T Sanz, A Salvador, et al. Rheological, textural and sensorial properties of low-sucrose muffins reformulated with sucralose/polydextrose [J]. LWT - Food Science and Technology, 2012, 45(2): 213-220
- [31] Salehi F, Kashaninejad M. The effect of quince powder on rheological properties of batter and physico-chemical and sensory properties of sponge cake [J]. Journal of Food Biosciences and Technology, 2017, 7(1): 1-8
- [32] Jaskari J, Henriksson K, Nieminen A, et al. Effect of hydrothermal and enzymatic treatments on the viscous behaviour of dry-milled and wet-milled oats brans [J]. Cereal Chemistry, 1995, 72(6): 625-631
- [33] Book S, Brill R. Effects of chemical leavening on yellow cake properties 1[J]. Cereal Foods World, 2015, 60(2): 71-75
- [34] 王家宝,陈诚,王凤,等.搅拌时间和乳化剂对海绵蛋糕表面气泡的影响[J].食品与机械,2018,34(10):8-13  
WANG Jiabao, CHEN Cheng, WANG Feng, et al. Effects of mixing time and emulsifier on surface bubbles of sponge cake [J]. Food and Machinery, 2018, 34(10): 8-13
- [35] M Gómez, Ruiz E, Oliete B. Effect of batter freezing conditions and resting time on cake quality [J]. LWT - Food Science and Technology, 2011, 44(4): 911-916
- [36] 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. Study on the quality improvement of par-baking Qifeng cake by hydroxypropyl methylcellulose [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(6): 276-282
- [37] Schirmer M, Jekle M, Arendt E, et al. Physicochemical interactions of polydextrose for sucrose replacement in pound cake [J]. Food Research International, 2012, 48(1): 291-298
- [38] Foegeding E A, Luck P J, Davis J P. Factors determining the physical properties of protein foams [J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(2/3): 284-292
- [39] Aydogdu A, Sumnu G, Sahin S. Effects of addition of different fibers on rheological characteristics of cake batter and quality of cakes [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(2): 667-677
- [40] 柯旭清.正交试验优化平菇面包工艺[J].粮食与油脂,2019, 32(9):22-25  
KE Xuqing. Optimization of mushroom bread technology by orthogonal test [J]. Grain and Oil, 2019, 32(9): 22-25
- [41] Karp S, Wyrwiz J, Kurek M A, et al. The use of high-in- $\beta$ -glucan oat fibre powder as a structuring agent in gluten-free yeast-leavened cake [J]. Food Science and Technology International, 2019, 25(2): 1-12
- [42] Paraskevopoulou A, Donsouzi S, Nikiforidis C V, et al. Quality characteristics of egg-reduced pound cakes following WPI and emulsifier incorporation [J]. Food Research International, 2015, 69: 72-79
- [43] Martínez M M, Díaz A, Gómez M. Effect of different microstructural features of soluble and insoluble fibres on gluten-free dough rheology and bread-making [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 142: 49-56
- [44] M Gómez, L Manchón, Oliete B, et al. Adequacy of wholegrain non-wheat flours for layer cake elaboration [J]. LWT - Food Science and Technology, 2010, 43(3): 507-513
- [45] Schirmer M, Jekle M, Arendt E, et al. Physicochemical interactions of polydextrose for sucrose replacement in pound cake [J]. Food Research International, 2012, 48(1): 291-298