

# 不同粒径小麦全粉的营养及加工特性比较

周晚霞<sup>1</sup>, 黎怡红<sup>1</sup>, 陈炎<sup>1</sup>, 刘芳梅<sup>2</sup>, 赵雷<sup>1</sup>, 胡卓炎<sup>1</sup>, 王凯<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 安化县茶旅产业发展服务中心, 湖南益阳 413500)

**摘要:** 本研究探讨不同粒径范围小麦全粉的化学成分及黏度变化, 并对小麦全粉的加工特性进行评价, 以为小麦全粉在食品加工中的应用提供理论依据。结果表明, 不同粒径小麦全粉的灰分含量差异不明显, 但其蛋白质、脂肪及淀粉含量存在差异。蛋白质和脂肪含量最高(分别为 15.34%和 2.25%)的为粒径<100 μm 的小麦全粉, 含量最低的分别是 300~600 μm (10.91%)和>1430 μm (0.81%)。淀粉含量最高(66.23%)的是最大粒径(>1430 μm)的小麦全粉, 而其它粒径的样品间无显著差异。此外, 小麦全粉的破损淀粉含量随其粒径的减小而逐渐升高, 当粒径由>1430 μm 减小到<100 μm 时, 其破损淀粉含量由 0.28%升高至 4.79%。在加工特性方面, 粒径由>1430 μm 减小到<100 μm 使小麦全粉的黏度升高, 持水性和持油性分别提高了 33.19%和 39.32%, 溶解度和膨胀度也明显提高。同时, 粒径降低还有利于提高小麦全粉的冻融稳定性, 使其冻融初期的析水率从 68.67%(>1430 μm)降低到 48.69%(<100 μm)。这说明小麦全粉的粒径过大或过小均会对其营养及加工特性产生不利影响, 而通过精准控制小麦全粉的粒径范围, 可在保证小麦制品营养性的同时提高其加工品质。

**关键词:** 小麦全粉; 粒径; 营养特性; 加工特性

文章编号: 1673-9078(2020)09-172-180

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.9.0151

## Comparison of Nutrition and Processing Characteristics of Whole Wheat Flours with Different Particle Sizes

ZHOU Wan-xia<sup>1</sup>, LI Yi-hong<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>, LIU Fang-mei<sup>2</sup>, ZHAO Lei<sup>1</sup>, HU Zhuo-yan<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China)

(2. Anhua County Tea and Tourism Industry Development Service Center, Yiyang, 413500, China)

**Abstract:** This study investigated the chemical composition, viscosity changes and processing characteristics of the whole wheat flours with different particle sizes, in order to provide a theoretical basis for the application of whole wheat flour in food processing. The results showed that the whole wheat flour samples with various particle sizes had insignificantly different ash contents but significantly different protein, fat and starch contents. The whole wheat flour with the particle size <100 μm had the highest protein and fat contents (15.34% and 2.25%, respectively), with the four with the particle size of 300~600 μm having the lowest protein content (10.91%), and the flour with the particle size >1430 μm having the lowest fat content (0.81%), respectively. The highest starch content (66.23%) was found in the sample with the largest size (>1430 μm), with the others flour samples showing in significant differences. In addition, the content of damaged starch in whole wheat flour increased gradually with the decrease in particle size. When the particle size was reduced from >1430 μm to <100 μm, the content of damaged starch in whole wheat flour increased from 0.28% to 4.79%. In terms of processing characteristics, the reduction of particle size from >1430 μm to <100 μm increased the viscosity of whole wheat flour, and raised the water-holding and oil-holding abilities by 33.19% and 39.32%, respectively, and increased the solubility and swelling degree. In the meantime, the decrease in particle size of whole wheat flour could improve its freeze-thaw stability, and made the water separation rate at the initial stage of a freeze-thaw cycle reduce effectively from 68.67%

引文格式:

周晚霞,黎怡红,陈炎,等.不同粒径小麦全粉的营养及加工特性比较[J].现代食品科技,2020,36(9):172-180

ZHOU Wan-xia, LI Yi-hong, CHEN Yan, et al. Comparison of nutrition and processing characteristics of whole wheat flours with different particle sizes [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(9): 172-180

收稿日期: 2020-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31801490)

作者简介: 周晚霞(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工

通讯作者: 王凯(1985-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工

(>1430  $\mu\text{m}$ ) to 48.69% (<100  $\mu\text{m}$ ). These results indicate that inappropriate particle size of whole wheat flour (too large or too small) could have negative influences on the nutrition and processing characteristics of whole wheat flour, and it is possible to ensure the nutritional properties while improving the processing quality of wheat products through monitoring precisely the particle size of whole wheat flour.

**Key words:** whole wheat flour; particle size; nutrition characteristics; processing characteristics

小麦是世界上最早栽培的禾本科植物之一,与玉米、水稻并称为世界“三大谷物”。它在全球范围内被众多国家的人民作为主粮食用,在口粮中具有绝对的优势地位<sup>[1]</sup>。小麦籽粒的结构一般分为胚乳、胚芽以及麸皮三个部分,其中胚乳作为主要部分,占籽粒重量的85%,胚芽约占3%,麸皮约占12%<sup>[2]</sup>。胚乳的主要成分是淀粉和蛋白质,胚芽富含生物活性物质,而麸皮中则含有丰富的膳食纤维、维生素和矿物质<sup>[3]</sup>。通常,小麦籽粒经过碾磨、筛分制成小麦粉后加以利用,而一般的精加工会去除麸皮,造成营养成分的损失。随着人民生活水平不断提高,人们对于食物的要求不只是解决温饱,而是更加追求食物的全面营养。小麦全粉因保留了小麦籽粒的所有营养成分,具有较高的营养价值,越来越受到消费者欢迎。

小麦全粉相比于其它精加工面粉,保留了小麦麸皮中的膳食纤维、维生素及矿物质等营养物质。近年来的研究发现全麦饮食具有预防肥胖症、糖尿病以及一些心血管疾病的功效<sup>[4]</sup>。Adam等<sup>[5]</sup>的研究发现,摄入全麦食品可以显著的降低血清低密度脂蛋白胆固醇以及总胆固醇的浓度,改善机体血脂代谢。但由于小麦全粉生产技术与传统面粉的研磨工序存在一定的差异,造成其粒度分布及功能特性与传统小麦粉不同,并且不同粒度范围小麦全粉的营养成分及其加工性能也各异,这影响了小麦全粉加工品的质构及营养性质。

在传统的小麦粉制作过程中,为了满足不同的用途和需求,会加工不同精度的小麦粉。有研究表明,不同加工精度的小麦粉所含脂类、蛋白、灰分等含量存在差异,造成其储藏稳定性也会不同<sup>[6]</sup>。此外,小麦粉的加工精度对面团及面制品的加工特性有重要影响。宋琛琛等<sup>[7]</sup>通过研究加工精度与小麦粉品质、面团特性的关系以及存在的规律性,发现小麦粉加工精度的降低,对小麦粉的品质以及面团的发酵特性、吹泡稠度特性均造成负面影响。而王远辉等<sup>[8]</sup>则通过研究不同粒度小麦粉对面团及馒头品质的影响,发现不同粒度小麦粉的理化性质和流变学特性间存在显著差异,并且用不同粒度小麦粉制成的馒头,其白度、比容及质构也存在差异。目前,有关于小麦粉的营养及加工性质的研究较为充分,但对于小麦全粉的粒径对于其营养特性的影响、及其在食品加工中的性能研究和应用的研究仍非常有限。因此,研究小麦全粉的营养

成分和加工特性,对于其在多种食品中的应用及加工工艺优化有重要的意义。

本研究以“周麦27”品种小麦为原料,通过机械分离的方法制得不同粒径范围的小麦全粉,分析不同粒径小麦全粉之间基本成分的差异,测定其粒径分布、黏度变化,并对小麦全粉的物理化学特性进行评价,以为小麦全粉在食品加工中的应用提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验材料与试剂

“周麦27”品种小麦,产地河南周口,食用油为食品级;氯化钠、焦亚硫酸钠、甲苯、无水乙醇等化学试剂均为分析纯,总淀粉含量试剂盒(Total Starch Assay Kit)、破损淀粉含量试剂盒(Starch Damage Assay Kit)购于爱尔兰Megazyme International有限责任公司。

### 1.2 实验设备及仪器

BJ-100型粉碎机,德清拜杰电器有限公司;MR Hei-Tec(CN)磁力搅拌器,德国Heidolph公司;离心分离机,德国Eppendorf公司;Mastersizer 3000激光粒度分析仪,英国Malvern Panalytical公司;Visco-Amylo-Graph布拉班德黏度仪,德国布拉班德公司;可见分光光度计,上海佑科仪器仪表有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 不同粒径小麦全粉的制备

将小麦籽粒用粉碎机进行研磨处理,得到不同大小粒径混合状态的物料,将研磨后的材料分别通过100-1430  $\mu\text{m}$ 孔径的筛,得到粒径范围为<100、100~300、300~600、600~1430和>1430  $\mu\text{m}$ 的小麦全粉。

#### 1.3.2 粒径分布的测定

采用Mastersizer 3000智能激光粒度分析仪测量小麦全粉的粒径分布。测量条件为:蒸馏水折射率1.33、淀粉折射率1.52、淀粉颗粒吸光值0.10。在测量结果中,D(4,3)表示体积加权平均值,D(3,2)表示表面积加权平均值,Dx(10)、Dx(50)、Dx(90)分别表示样品颗粒中有10%、50%、90%的颗粒粒径小于此值,

剩余的颗粒粒径均大于此值。通过公式(1)计算得特殊表面积 SSA(Special Surface Area)。

$$SSA = \frac{6}{D(3,2)} \quad (1)$$

通过公式(2)计算得分布跨度 Span, 以表征淀粉样品粒径分布宽度。

$$Span = \frac{[Dx(90) - Dx(10)]}{Dx(50)} \quad (2)$$

### 1.3.3 化学成分的测定

水分含量测定: 按照国标方法 GB5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》进行测定; 灰分含量测定: 采用 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准食品中灰分的测定》来测定; 蛋白质含量测定: 采用 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》的凯氏定氮法测定; 脂肪含量测定: 采用 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》的索氏抽提法测定; 总淀粉含量测定: 采用 Megazyme 试剂盒 (Total Starch Assay Kit) 进行测定<sup>[9]</sup>。

### 1.3.4 破损淀粉含量

用 Megazyme 破损淀粉试剂盒 (Starch Damage Assay Kit) 对小麦全粉的破损淀粉含量进行测定。称取  $100 \pm 10$  mg (干基) 样品于离心管中, 加入 1.0 mL 预热的真菌  $\alpha$ -淀粉酶溶液 (50 units/mL), 充分混匀后在 40 °C 水浴中保温 10 min。随后加入 8.0 mL 稀硫酸溶液 (0.2%, V/V) 并剧烈搅拌, 反应结束后在 3000 r/min 离心 5 min。取 0.1 mL 上清液置于离心管中, 加入 0.1 mL 淀粉葡萄糖苷酶溶液 (20 units/mL), 充分混匀后置于 40 °C 水浴中保温 10 min。在离心管中加入 4.0 mL GOPOD 溶液, 并在 40 °C 水浴中保温 20 min, 同时准备葡萄糖标样和空白对照, 在 510 nm 处测定样品的吸光度, 计算破损淀粉的含量<sup>[10]</sup>。

### 1.3.5 黏度

参照 Ahmed 等<sup>[11]</sup>的方法测定小麦全粉的黏度。称取 6 g (干基) 样品, 加入 94 g 蒸馏水, 震荡混匀后移入布拉班德黏度仪测量杯中, 在 50 °C 的条件下平衡 5 min, 测定程序设定为: 从 50 °C 升温到 95 °C, 95 °C 保温 5 min, 再从 95 °C 冷却至 50 °C, 50 °C 保温 5 min, 记录此过程中样品的黏度变化。

### 1.3.6 持水性和持油性的测定

参考 Workineh Abebe 等<sup>[12]</sup>的方法并稍作改动。分别称取 1.0 g 的样品于离心管中, 分别记录离心管质量和样品质量, 加入 15 mL 蒸馏水并振荡混匀。将离心管置于沸水浴中搅拌加热 20 min, 取出冷却至室温后, 于 3500 r/min 离心 20 min。倒掉水层并用滤纸吸净多余的水分, 称量此时物料与离心管总质量, 按下式计

算样品的持水性 (WHC)。

$$WHC(g/g) = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad (3)$$

式中:  $m_0$  为样品质量, g;  $m_1$  为样品和离心管总质量, g;  $m_2$  为沥干水分后物料和离心管的总质量, g。

称取 2.0 g 的样品于离心管中, 分别记录离心管质量和样品质量。在离心管中精确加入 10 mL 金龙鱼一级压榨豆油振荡混匀, 在沸水浴中搅拌加热 25 min 后, 取出冷却至室温, 然后在 3500 r/min 离心 20 min。弃去油层并用滤纸吸净多余的油, 称量此时物料与离心管总质量, 每个处理均重复 3 次。用 1.0 g 样品所吸油的质量来表示样品的持油性 (OHC), 按下式计算:

$$OHC(g/g) = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad (4)$$

式中:  $m_0$  为样品质量, g;  $m_1$  为样品和离心管总质量, g;  $m_2$  为沥干油分后物料和离心管的总质量, g。

### 1.3.7 溶解度和膨胀度的测定

称取约 1.0 g 的样品于离心管中, 记录离心管质量和样品质量, 在离心管中加入 30 mL 蒸馏水后振荡混匀。将离心管分别置于 55、65、75、85 和 95 °C 水浴中振摇加热 30 min, 取出冷却至室温后于 3500 r/min 离心 30 min。将上清液倒入干燥至恒重的铝盒中, 在沸水浴中蒸干, 然后在 105 °C 干燥至恒重, 称取质量, 按式(5)计算得到样品的溶解度。把去除上清液的离心管倒置在滤纸上沥干, 称取质量, 按式(6)计算得样品的膨胀度, 每个处理均重复 3 次<sup>[13]</sup>。

$$\text{溶解度} / \% = \frac{m_3}{m_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{膨胀度} / \% = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $m_0$  为样品质量, g;  $m_1$  为离心管质量, g;  $m_2$  为去除上清液后离心管质量, g;  $m_3$  为干燥恒重后上清液质量, g。

### 1.3.8 冻融稳定性的测定

称取 1.5 g 的样品于离心管中, 记录离心管质量和样品质量。在离心管中准确加入 25 mL 蒸馏水后振荡混匀, 置于 100 °C 水浴中糊化 30 min 并不断搅拌。取出冷却至室温后称重, 接着将其置于 -18 °C 冷冻 22 h, 随后取出在 30 °C 水浴中解冻 2 h。将离心管在 3500 r/min 条件下离心 20 min, 弃去上清液并吸干多余水分后称重, 按照下式计算析水率 S, 上述冻融过程重复四次<sup>[14]</sup>。

$$S = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $m_1$  为离心管的质量, g;  $m_2$  为糊化后离心管及其内容物的总质量, g;  $m_3$  为去除上清液沥干后离心管及其内容物

的总质量, g。

### 1.3.9 数据统计分析

所有试验均重复至少两次, 采用 SPSS Statistics 16.0 进行数据统计分析, 运用方差分析方法(ANOVA)进行显著性分析, 当  $p < 0.05$  认为有显著性差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 小麦全粉的形态特征及粒径分布

面粉的粒径大小和粒径均匀性被认为是影响其加工性能的重要因素。采用激光粒度分析仪对小麦全粉的粒径进行表征, 结果见表 1。从表中的数据可以看出, 粒径最小的小麦全粉( $<100 \mu\text{m}$ )的  $D_{(4,3)}$ 、 $D_{(3,2)}$ 、

$D_x(10)$ 、 $D_x(50)$ 及  $D_x(90)$ 均最小, 分别为 73.76、27.49、16.78、65.40 及 144.12  $\mu\text{m}$ 。随着筛分粒径的增加, 样品各粒径指标值也随之增大, 且差异显著。粒径为 600~1430  $\mu\text{m}$  的小麦全粉的  $D_{(4,3)}$ 、 $D_{(3,2)}$ 、 $D_x(10)$ 、 $D_x(50)$ 和  $D_x(90)$ 最大, 分别达到 1641.53、121.13、950.01、1616.10 及 2519.95  $\mu\text{m}$ 。而 Span 值与小麦全粉的粒径大小呈负相关,  $<100 \mu\text{m}$  的小麦全粉的 Span 值最大 (1.95), 而 600~1430  $\mu\text{m}$  的小麦全粉 Span 值最小 (0.97)。Span 值越大则表示该小麦全粉的粒径分布宽度越广, 且颗粒大小不均匀, 大颗粒和小颗粒并存于体系中。以上数据说明本实验所采取的制备方法能对样品进行有效分离, 且分离所得不同大小范围的小麦全粉其粒径和形态之间存在显著差异。

表 1 小麦全粉粒径分布

Table 1 Particle size distribution of whole wheat flour

样品/ $\mu\text{m}$	$D_{4,3}/\mu\text{m}$	$D_{3,2}/\mu\text{m}$	$D_x(10)/\mu\text{m}$	$D_x(50)/\mu\text{m}$	$D_x(90)/\mu\text{m}$	Span
$<100$	$73.76 \pm 2.20^d$	$27.49 \pm 1.41^c$	$16.78 \pm 0.98^d$	$65.40 \pm 2.45^d$	$144.12 \pm 2.99^d$	$1.95 \pm 0.05^a$
100~300	$282.78 \pm 6.53^c$	$68.60 \pm 10.65^b$	$32.73 \pm 9.39^c$	$270.79 \pm 6.15^c$	$513.06 \pm 5.07^c$	$1.78 \pm 0.07^b$
300~600	$747.18 \pm 5.62^b$	$128.91 \pm 9.30^a$	$379.91 \pm 12.56^b$	$738.81 \pm 5.87^b$	$1214.60 \pm 19.70^b$	$1.13 \pm 0.03^c$
600~1430	$1641.53 \pm 14.25^a$	$121.13 \pm 19.26^a$	$950.01 \pm 27.32^a$	$1616.10 \pm 14.44^a$	$2519.47 \pm 95.91^a$	$0.97 \pm 0.09^d$
$>1430$	-	-	-	-	-	-

注:  $D_x(10)$ 、 $D_x(50)$ 和  $D_x(90)$ 表示小麦全粉的累计粒度分布数达到 10%、50%和 90%时所对应的粒径  $D_x(50)$ 即中位粒径, 其数值代表平均粒径。 $D_{4,3}$ 表示体积加权平均值,  $D_{3,2}$ 表示表面积加权平均值, Span 表示淀粉样品粒径分布宽度。同一列之间, 不同小写字母表示不同数据之间具有显著性差异,  $p < 0.05$ 。“-”表示未检出。

表 2 小麦全粉的化学组成及破损淀粉含量

Table 2 Chemical composition and damaged starch content of whole wheat flour

样品/ $\mu\text{m}$	蛋白含量/%	脂肪含量/%	灰分含量/%	淀粉含量/%	破损淀粉含量/%
$<100$	$15.34 \pm 0.25^a$	$2.25 \pm 0.07^a$	$2.07 \pm 0.16^a$	$63.25 \pm 0.06^{ab}$	$4.79 \pm 0.08^a$
100~300	$12.60 \pm 0.16^c$	$1.40 \pm 0.03^b$	$2.05 \pm 0.18^a$	$58.77 \pm 0.27^b$	$1.99 \pm 0.03^b$
300~600	$10.91 \pm 0.25^d$	$0.84 \pm 0.01^d$	$1.55 \pm 0.10^b$	$58.73 \pm 1.81^b$	$0.99 \pm 0.01^c$
600~1430	$13.51 \pm 0.12^b$	$1.12 \pm 0.03^c$	$1.92 \pm 0.06^a$	$58.56 \pm 3.12^b$	$0.51 \pm 0.03^d$
$>1430$	$12.92 \pm 0.37^c$	$0.81 \pm 0.01^d$	$1.60 \pm 0.11^b$	$66.23 \pm 0.95^a$	$0.28 \pm 0.06^e$

注: 同一列之间, 不同小写字母表示不同数据之间具有显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 所有数据以干重计。

### 2.2 化学组成

小麦全粉的水分含量为 11.98%, 蛋白、脂肪、灰分和淀粉含量(干重)见表 2。结果显示, 不同粒径的小麦全粉之间蛋白质含量存在显著差异, 其中粒径  $<100 \mu\text{m}$  的小麦全粉的蛋白质含量最高 (15.34%), 其次为 600~1430  $\mu\text{m}$  的小麦全粉 (13.51%), 而粒径 300~600  $\mu\text{m}$  的小麦全粉蛋白含量最低 (10.91%)。小麦粉的蛋白质含量与其粒径大小存在一定的关系, Wang<sup>[15]</sup>的研究发现 38~75  $\mu\text{m}$  范围的硬质小麦粉的蛋白含量比较细颗粒和较粗颗粒的高, 达到 12.5%左右, 而  $<38 \mu\text{m}$  粒度范围的硬质小麦粉比其它范围拥有更

多低分子量的蛋白质。

脂肪在小麦中的含量较低, 可以称为小麦中的微量成分, 但却对其加工品质有很大的影响。从表 2 中可以看出, 不同粒径的小麦粉的脂肪含量差异显著, 粒径  $<100 \mu\text{m}$  的小麦全粉的脂肪含量最高, 约为 2.25%, 而粒径 300~600  $\mu\text{m}$  和  $>1430 \mu\text{m}$  的小麦全粉含量最低, 分别为 0.84%和 0.81%。

小麦全粉的灰分含量在 1.5%~2.0%之间, 不同粒径小麦全粉差异不显著。粒径最小的小麦全粉 ( $<100 \mu\text{m}$ ) 灰分含量最高 (2.07%), 而粒径  $>1430 \mu\text{m}$  及 300~600  $\mu\text{m}$  的小麦全粉灰分含量较低, 分别为 1.60%和 1.55%。张剑等<sup>[16]</sup>对不同粒度小麦粉的研究发现,

粒度越小的面粉中含有较多靠近皮层部分的粉粒导致蛋白质与灰分含量较高；而粒度较大的面粉中则含较多的位于胚乳中心的粉粒，从而蛋白质与灰分含量较低。

不同粒径范围的小麦全粉的淀粉含量不同，但均在 55%~70% 范围内。其中粒径最大的小麦全粉 (>1430 μm) 淀粉含量最高 (66.23%)，其次是粒径最小的面粉 (<100 μm，淀粉含量 63.25%)，而粒径为 100~300 μm、300~600 μm、600~1430 μm 的小麦粉的淀粉含量差异不显著 (分别为 58.77%、58.73% 和 58.56%)。淀粉含量会对小麦粉及其制品的品质产生影响。张雪娇等<sup>[17]</sup>研究发现除了蛋白质以外，小麦粉的淀粉含量 (60%~74%) 对饺子皮的品质也有明显影响，饺子皮在蒸煮过程中的吸水率和膨胀率与小麦粉的淀粉含量显著正相关，而饺子皮的咀嚼度和硬度则与淀粉含量呈显著负相关。此外，小麦粉中的淀粉含量越高，制成的饺子皮色泽越好。

### 2.3 破损淀粉含量

由表 2 可知，不同粒径的小麦全粉中破损淀粉含量差异显著，且与粒径呈负相关，即粒径最小的组分 (<100 μm) 的破损淀粉含量最高 (4.79%)，而粒径最大的组分 (>1430 μm) 的破损淀粉含量最低 (0.28%)。这与前人的研究结果一致，石磊等<sup>[18]</sup>对不同粒度玉米粉的破损淀粉含量等指标进行了测定，结果表明，随着玉米粉体积平均粒径的降低，其破损淀粉含量呈上升趋势。而罗幸等<sup>[19]</sup>分析了 5 种不同粒径泰国香米米粉的理化指标，发现随着米粉粒径减小，

其破损淀粉含量升高。这是由于小粒径的小麦粉受到的机械损伤较严重，其淀粉颗粒被破坏的程度较大，因而破损淀粉的含量较高。而受损的淀粉颗粒相对于未受损的淀粉颗粒，能够吸收更多的水分，并且更易于酶解，面团的流变特性和最终用途都极易受到淀粉破坏程度的影响。

### 2.4 黏度

黏度是判断淀粉制品质量的重要依据。由图 1 可知，粒径 >1430 μm 的小麦全粉黏度几乎为零。这是由于其粒径较大，比表面积小且结构紧密，淀粉颗粒不易吸水膨胀导致难以糊化，因此黏度几乎为零。而其它小麦全粉样品随着粒径逐渐降低，比表面积逐渐增大，与水分子接触越来越充分，淀粉越来越容易吸水膨胀引起黏度升高，因此其黏度随粒径减小而逐渐升高。

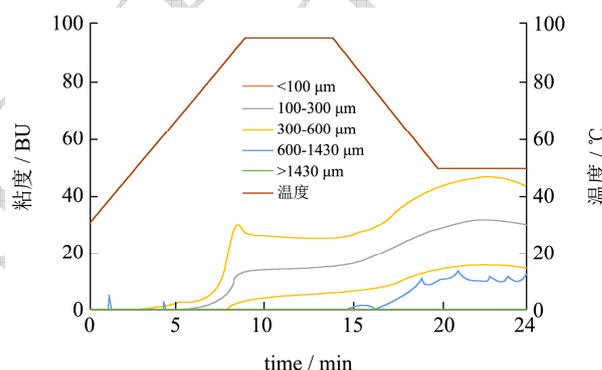


图 1 不同粒径小麦全粉的黏度曲线

Fig.1 The viscosity curves of whole wheat flour with various particle sizes

表 3 小麦全粉黏度曲线特征值

Table 3 Characteristic values of the viscosity curves of whole wheat flour samples

样品/μm	A/°C	B/BU	C/BU	D/BU	E/BU	F (BU)	BD/BU	ED/BU
<100	51.0±1.3 <sup>a</sup>	87.0±0.0 <sup>a</sup>	81.0±0.0 <sup>a</sup>	73.5±2.1 <sup>a</sup>	124.0±0.0 <sup>a</sup>	125.5±2.1 <sup>a</sup>	13.0±1.4 <sup>a</sup>	50.5±2.1 <sup>a</sup>
100~300	64.1±3.2 <sup>b</sup>	43.0±0.0 <sup>b</sup>	38.0±0.0 <sup>b</sup>	43.0±0.0 <sup>b</sup>	85.5±2.1 <sup>b</sup>	87.0±0.0 <sup>b</sup>	-	42.0±1.4 <sup>ab</sup>
300~600	84.5±2.8 <sup>c</sup>	17.0±0.0 <sup>c</sup>	10.5±2.1 <sup>c</sup>	17.0±0.0 <sup>c</sup>	41.0±0.0 <sup>c</sup>	42.0±1.4 <sup>c</sup>	-	23.0±0.0 <sup>b</sup>
600~1430	-	27.0±12.1 <sup>bc</sup>	-	-	33.7±10.1 <sup>c</sup>	35.7±8.7 <sup>c</sup>	-	33.7±10.1 <sup>ab</sup>
>1430	-	-	-	-	-	-	-	-

注：A：起糊温度，°C；B：峰值黏度，BU；C：升温至 95 °C 时的黏度值，BU；D：95 °C 保温结束时的黏度，BU；E：降温至 50 °C 时的黏度，BU；F：终黏度，BU；BD：崩解值，BU；ED：回生值，BU；“-”表示未检出。同一列之间，不同小写字母表示不同数据之间具有显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

由表 3 可以看出，小麦全粉的起糊温度与其粒径呈正相关，粒径最小的面粉 (<100 μm) 起糊温度最低 (51.0 °C)，最易糊化；随着小麦全粉粒度的增大，小麦全粉的糊化温度逐渐升高，即越来越难糊化。起糊温度反映黏度开始上升时的温度，其值容易受淀粉的粒径大小、浓度等因素的影响<sup>[20]</sup>。粒径较小的小

麦全粉能更充分地与水分子接触而吸水膨胀，因此更容易糊化。而小麦全粉的峰值黏度以及其他特征黏度均与其粒径大小呈现出负相关，这可能是因为粒径较小的小麦全粉破损程度较高，破损的淀粉颗粒更容易吸水膨胀，导致其黏度值较高。崩解值为峰值黏度与 95 °C 保温结束时的黏度之差，表征淀粉的耐剪切性

能。粒径 $<100\ \mu\text{m}$ 的小麦全粉崩解值为13.0 BU,说明其中淀粉具有较好耐剪切性。而其它粒径的小麦全粉在加热过程中,黏度呈逐渐升高的趋势,说明淀粉较难糊化,不发生淀粉颗粒崩解和剪切变稀,故无法得到崩解值。糊化后降温过程中的终黏度和回生值常用来衡量淀粉糊短期老化程度。回生值也可表示冷却形成的凝胶强弱,回生值越大即凝胶性越强,淀粉越容易老化<sup>[20]</sup>。从表3可以看出,随着粒径的增大,小麦全粉的终黏度和回生值逐渐降低,说明其中的淀粉老化程度降低。

## 2.5 持水性和持油性

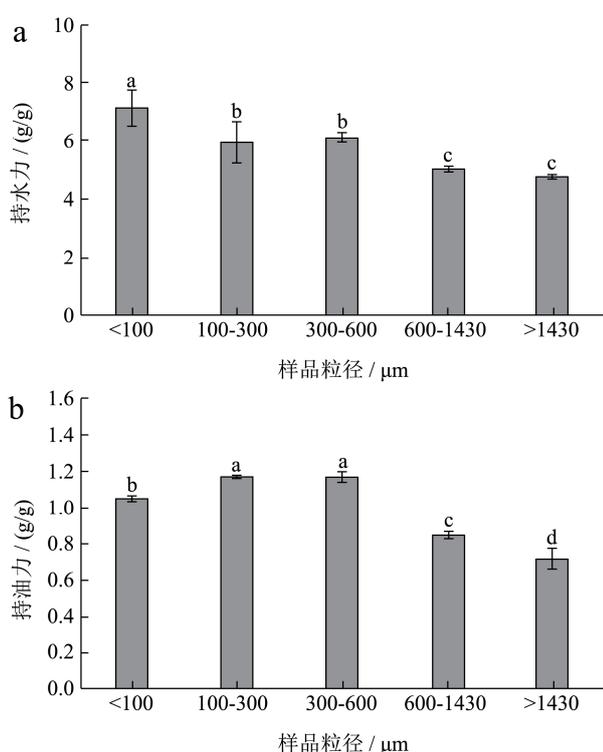


图2 不同粒径小麦全粉的持水性和持油性

Fig.2 Water-holding and oil-holding abilities of whole wheat flour in different particle sizes

注: 不同小写字母表示差异性显著,  $p<0.05$ 。

持水性和持油性是小麦全粉的重要性质,对确定食品配方比例具有重要的参考价值。由图2a可知,随着小麦全粉粒径增大,其持水性呈降低趋势。粒径 $<100\ \mu\text{m}$ 小麦全粉的持水性约为7.17 g/g,显著高于粒径100~300  $\mu\text{m}$ 和300~600  $\mu\text{m}$ 的小麦全粉(分别为5.91 g/g和6.16 g/g),而粒径600~1430  $\mu\text{m}$ 与 $>1430\ \mu\text{m}$ 的小麦全粉的持水性最低(分别为5.03 g/g和4.79 g/g)。这可能跟不同粒径的小麦全粉中破损淀粉含量有关。如表2所示,粒径 $<100\ \mu\text{m}$ 小麦全粉的破损淀粉含量最高(达到4.79%),而当粒径增大至100~300  $\mu\text{m}$ 和300~600  $\mu\text{m}$ 时,破损淀粉含量显著降低至

1.99%和0.99%,显著高于粒径更大的两个小麦全粉(分别为0.51%和0.28%)。这说明小麦全粉的持水性与破损淀粉含量呈正相关,这与魏春红等<sup>[21]</sup>的研究结果一致,对不同粒径小米粉持水性的研究发现,随着小米粉中破损淀粉含量的上升,其持水性增大。这是由于破损淀粉具有较强的吸水能力,可增加小麦全粉的吸水能力进而增加其持水性。此外,小麦全粉的持水性还与其比表面积相关,粒度越小的小麦全粉比表面积越大,其颗粒与水的接触也越充分,从而持水性越大<sup>[22]</sup>。

由图2b可知,小麦全粉的持油性呈先增大后降低的趋势。粒径大小为100~300  $\mu\text{m}$ 和300~600  $\mu\text{m}$ 的小麦全粉的持油性最高(分别为1.17 g/g和1.16 g/g),其次是粒径 $<100\ \mu\text{m}$ 的小麦全粉(1.06 g/g),而粒径为600~1430  $\mu\text{m}$ 与粒径为 $>1430\ \mu\text{m}$ 的小麦全粉持油性更低,分别为0.84 g/g和0.71 g/g。随着粒径的减小,小麦全粉中的膳食纤维暴露出更多的非极性末端,从而使得小麦全粉的持油能力得到提升<sup>[23]</sup>。此外,最小粒径的小麦全粉由于其所含蛋白结构被破坏,影响其和脂肪形成络合物,从而导致其持油性稍有下降<sup>[24]</sup>。

## 2.6 溶解度和膨胀度

溶解度和膨胀度是反映淀粉和水相互作用大小的重要指标。从图3a可知,小麦全粉的溶解度与温度紧密相关。当温度由55  $^{\circ}\text{C}$ 升高到65  $^{\circ}\text{C}$ ,所有粒径小麦全粉的溶解度均显著升高,而在75  $^{\circ}\text{C}$ 时,小麦全粉的溶解度显著降低。当温度由75  $^{\circ}\text{C}$ 进一步提高至85  $^{\circ}\text{C}$ 和95  $^{\circ}\text{C}$ 时,小麦全粉的溶解度又逐渐升高。这与小麦全粉中的主要成分淀粉和蛋白质在不同温度下的溶解度有关。小麦淀粉的溶解度随温度的升高而增大,这是由于随着温度升高,淀粉吸水膨胀,淀粉分子逐渐析出溶于水中,引起溶解度提高<sup>[25]</sup>。除淀粉外,小麦全粉中还含有谷蛋白、醇溶蛋白等蛋白质组分。当温度低于蛋白质的变性温度时,适当提高温度可使蛋白质立体结构伸展,有利于蛋白质与水分子相互作用使得溶解度升高。蛋白质与水的相互作用又会阻碍淀粉吸收水分,对淀粉溶解产生一定的抑制作用。而当温度高于变性温度时,蛋白质发生变性,分子空间结构破坏,内部的疏水性集团暴露,分子凝沉而引起蛋白质溶解度降低<sup>[26]</sup>。有文献报道小麦中醇溶蛋白和谷蛋白的变性温度约为68.01  $^{\circ}\text{C}$ 和66.81  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[27]</sup>。因此,75  $^{\circ}\text{C}$ 时小麦全粉中的蛋白质已变性,在水中的溶解度较65  $^{\circ}\text{C}$ 时降低,从而引起小麦全粉的溶解度显著低于65  $^{\circ}\text{C}$ 。当温度升高至85  $^{\circ}\text{C}$ 和95  $^{\circ}\text{C}$ ,蛋白质与水的相互作用减弱,丧失对淀粉溶解的抑制作用。因此,

此阶段小麦全粉溶解度随温度逐渐升高的现象，主要是由淀粉溶解度提高引起的。此外，小麦全粉的溶解度与其粒径呈负相关，粒径大的小麦全粉溶解度较低。这是因为小粒径的小麦全粉更容易与水结合，在加水搅拌糊化过程中吸水膨胀，更多的直链淀粉和短支链淀粉脱离束缚，从膨胀的淀粉颗粒中逸出溶解到水中，导致溶解度增大<sup>[28]</sup>。

小麦全粉的膨胀度表示每千克干淀粉在一定温度下吸水的质量数，是研究小麦淀粉糊化特性的一个重要指标，与产品的食用品质息息相关<sup>[13]</sup>。由图 3b 可知，小麦全粉的膨胀度与加热温度呈现正相关关系，即随着温度的升高，小麦全粉的膨胀度逐渐增大。这是因为随着温度的增加小麦全粉的吸水能力提高。同时小麦全粉的膨胀度还与粒径大小呈负相关，粒径越大的小麦全粉膨胀度越低，这可能是因为粒径较大的小麦全粉与水的接触面积较小，吸水能力较差。因此提高加热温度以及降低小麦全粉的粒径都能有效地提高小麦全粉的膨胀度。

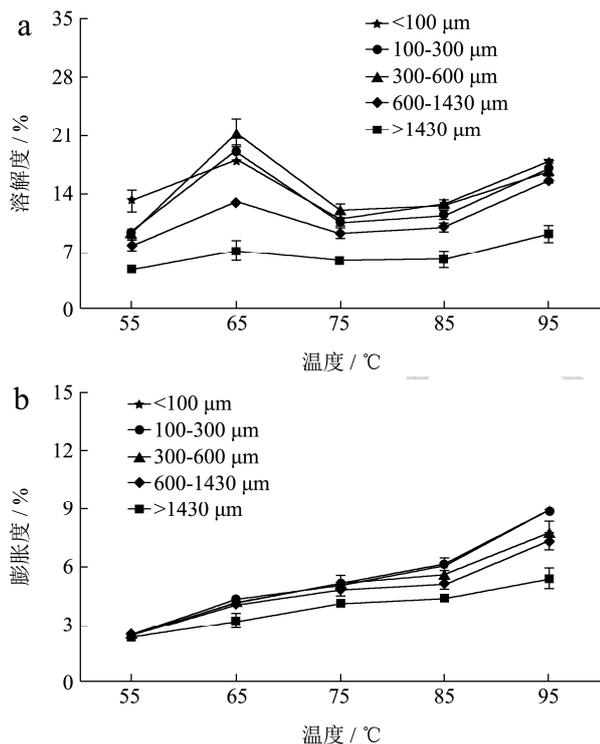


图3 不同粒径小麦全粉在不同温度的溶解度和膨胀度

Fig.3 Solubility and swelling power of whole wheat flour in different particle sizes at different temperatures

### 2.7 冻融稳定性

对于淀粉类冷冻食品，冻融稳定性是一项重要的性能指标。小麦粉的冻融稳定性可用析水率来衡量，析水率越低其冻融稳定性越好，反之则冻融稳定性越差<sup>[14]</sup>。由图 4 可知，第一个冻融循环后，小麦全粉的

析水率与其粒径大小呈正相关，粒径最大(>1430 μm)的小麦全粉析水率最高(68.67%)；而粒径最小(<100 μm)的小麦全粉析水率最低(48.69%)。闫巧珍等<sup>[26]</sup>研究马铃薯全粉与小麦粉混合比例对混粉冻融稳定性的影响，发现增加小麦粉的比例会降低混粉的冻融稳定性。这说明小麦全粉的冻融稳定性可能与其组成成分有关，由于小麦全粉中的淀粉颗粒表面包裹着具有疏水性的脂肪和蛋白质，减弱了小麦全粉与水分子的相互结合的作用，所以在冻融过程中水分容易析出。而粒径越大的小麦全粉的析水率越高可能是因为大粒径的小麦全粉颗粒大且结构坚固，在糊化过程中很难糊化使得淀粉糊的黏度低，在室温下不能形成凝胶，降低冻融稳定性<sup>[29]</sup>。随着冻融循环次数的增加，较小粒径的小麦全粉(<100 μm 及 100~300 μm)的析水率变化幅度较大，分别从 48.69%和 50.88%增加到 69.44%和 65.84%；300~600 μm 的小麦全粉的变化幅度次之(从 53.81%增加到 62.75%)；而 600~1430 μm 及 >1430 μm 的小麦全粉本身析水率较高，显示出较小的变化，分别从 60.95%和 68.67%增加到 65.58%和 71.86%。这些结果表明，随着冻融次数的增加，各粒径小麦全粉的析水率趋于稳定，多次冻融可以使小麦全粉在低温下更好地发挥其增稠作用。

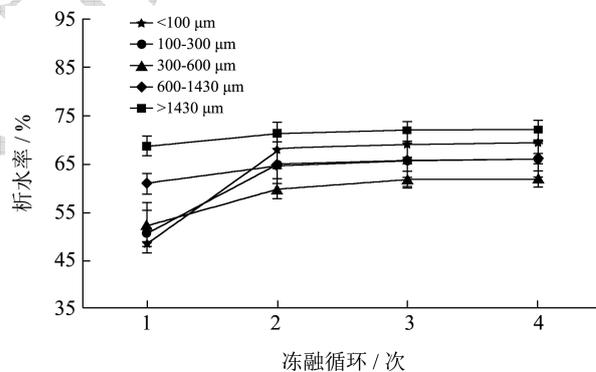


图4 不同粒径小麦全粉的冻融稳定性

Fig.4 Freeze-thaw stability of whole wheat flour in different particle sizes

### 3 结论

本文研究了小麦全粉的粒径对其营养成分及加工特性的影响。结果表明，不同粒径小麦全粉的蛋白质含量、脂肪含量、淀粉含量存在一定差异，其中最小粒径小麦全粉(<100 μm)的蛋白质和脂肪含量最高，分别是 15.34%和 2.25%；最大粒径小麦全粉(>1430 μm)的淀粉含量最高，为 66.23%。而小麦全粉的灰分含量差异不大，均在 1.5%~2.0%范围内。此外，小麦全粉的破损淀粉含量与其粒径大小呈显著负相关，最小粒径(<100 μm)小麦全粉的破损淀粉含量约为

最大粒径 (>1430  $\mu\text{m}$ ) 的 17 倍。这些差异使得不同粒径小麦全粉的加工特性有明显区别。随着小麦全粉的粒径逐渐减小, 其黏度逐渐升高, 持水性和持油性呈升高趋势。粒径<100  $\mu\text{m}$  的小麦全粉的持水性和持油性分别由粒径>1430  $\mu\text{m}$  的 4.79 和 0.71 g/g 提高至 7.17 和 1.06 g/g。粒径减小使其溶解度和膨胀度提高, 同时使冻融初期的析水率从 68.67% (>1430  $\mu\text{m}$ ) 降低到 48.69% (<100  $\mu\text{m}$ ), 说明小麦全粉的冻融稳定性提高。这些结果说明小麦全粉的粒径大小会对其制品的加工特性产生明显影响。而根据加工需求来合理调整加工精度, 得到一定粒径范围的小麦全粉, 可在保证制品营养性的同时, 提高其加工品质。这将对全麦粉的科学加工和合理利用以及全麦食品的品质提升提供理论支持和技术指导。而不同粒径的小麦全粉中麸皮和胚芽含量可能存在差异, 这可能会对小麦全粉的贮藏性等产生一定的影响, 将在后续研究中进行深入探讨。

## 参考文献

- [1] 刘彬, 陈柳, 高艳琼, 等. 三大粮食作物基础研究: 中国开始引领世界[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(3): 224-243  
LIU Bin, CHEN Liu, GAO Yan-qiong, et al. Basic research on three grain crops: China is beginning to lead the world [J]. Journal China Agricultural University, 2019, 24(3): 224-243
- [2] 张勇, 马传喜. 软质小麦与硬质小麦的籽粒结构比较研究[J]. 粮食与饲料工业, 1998, 3: 5-6  
ZHANG Yong, MA Chuan-xi. Studies on the comparison of kernel structure of soft wheat and hard wheat [J]. Cereal & Feed Industry, 1998, 3: 5-6
- [3] 王鑫, 黄韬睿, 黄丽娟, 等. 粒径对小麦麸皮矿物元素含量及其吸附有害元素的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(15): 93-96  
WANG Xin, HUANG Tao-rui, HUANG Li-juan, et al. Effect of particle size on mineral element content and binding of harmful element of wheat bran [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(15): 93-96
- [4] Slavin. J. Why whole grains are protective: biological mechanisms [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2003, 62(1): 129-134
- [5] Adam A, Lopez H W, Tressol J C, et al. Impact of whole wheat flour and its milling fractions on the cecal fermentations and the plasma and liver lipids in rats [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2002, 50(22): 6557-6562
- [6] 陈聪聪, 王新伟, 赵仁勇. 不同加工精度小麦粉储藏过程中脂类变化规律研究[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 159-164  
CHEN Cong-cong, WANG Xin-wei, ZHAO Ren-yong. Changes in lipids of wheat flour samples with different processing degree during storage [J]. Food Science, 2020, 41(3): 159-164
- [7] 宋琛琛, 韩小贤, 田小慧, 等. 加工精度对小麦粉品质及面团特性的影响[J]. 食品科技, 2017, 7: 159-164  
SONG Chen-chen, HAN Xiao-xian, TIAN Xiao-hui, et al. The influence on the quality and dough properties of wheat flour with different processing precision [J]. Food Science and Technology, 2017, 7: 159-164
- [8] 王远辉, 余晓宇, 王皎洁. 不同粒度小麦粉对面团及馒头品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(10): 208-215  
WANG Yuan-hui, YU Xiao-yu, WANG Jiao-jie. Effect of different particle size of wheat flour on the quality of steamed bread and its dough [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(10): 208-215
- [9] El-Khayat G H, Samaan J, Brennan C S. Evaluation of vitreous and starchy Syrian durum (*Triticum durum*) wheat grains: the effect of amylose content on starch characteristics and flour pasting properties [J]. Starch - Stärke, 2003, 55(8): 358-365
- [10] Hatcher D W, Anderson M J, Desjardins R G, et al. Effects of flour particle size and starch damage on processing and quality of white salted noodles [J]. Cereal Chemistry, 2002, 79(1): 64-71
- [11] Ahmed R, Ali R, Khan M S, et al. Effect of proteases & carbohydrases on dough rheology and end quality of cookie [J]. American Journal of Food Science and Nutrition Research, 2015, 2(2), 62-66
- [12] Abebe W, Collar C, Ronda F. Impact of variety type and particle size distribution on starch enzymatic hydrolysis and functional properties of tef flours [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 260-268
- [13] 马梦苹, 张来林, 王彦波, 等. 马铃薯全粉和小麦粉基本特性的对比研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 52-56  
MA Meng-ping, ZHANG Lai-lin, WANG Yan-bo, et al. The comparison of basic characteristics of potato and wheat flour [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(6): 52-56
- [14] 代蕾, 姬娜, 熊柳, 等. 魔芋胶对小麦淀粉理化性质影响研究[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(7): 32-34  
DAI Lei, JI Na, XIONG Liu, et al. Study on effect of konjac gum on physicochemical properties of wheat starch [J]. Cereals & Oils, 2013, 26(7): 32-34
- [15] Wang L, Flores R A. Effects of flour particle size on the

- textural properties of flour tortillas [J]. *Journal of Cereal Science*, 2000, 31(3): 263-272
- [16] 张剑,张杰,樊荻,等.小麦粉粒度对面团特性及蛋白组分的影响[J].*食品与发酵工业*,2018,44(11):124-129,137  
ZHANG Jian, ZHANG Jie, FAN Di, et al. The effect of wheat flour particle size on dough quality and protein components [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(11): 124-129, 137
- [17] 张雪娇,陈洁,吕莹果,等.小麦蛋白和淀粉含量对饺子皮品质的影响研究[J].*河南工业大学学报(自然科学版)*,2012,33(3): 40-43  
ZHANG Xue-jiao, CHEN Jie, LYU Ying-guo, et al. Effect of gluten and starch contents in wheat on the quality of dumpling wrapper [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 33(3): 40-43
- [18] 石磊,孙娟娟,栾广忠,等.颗粒度对玉米粉理化性质的影响[J].*食品工业科技*,2014,35(14):135-138  
SHI Lei, SUN Juan-juan, LUAN Guang-zhong, et al. Effect of granularity on physicochemical properties of corn flour [J]. *Science and Technology of Food Industries*, 2014, 35(14): 135-138
- [19] 罗幸,刘田子,赵鑫浩,等.米粉粗细度对米发糕品质的影响[J].*食品科技*,2019,3:164-168  
LUO Xing, LIU Tian-zi, ZHAO Xin-hao, et al. Effect of granularity of rice flour on quality of rice cake [J]. *Food Science and Technology*, 2019, 3: 164-168
- [20] Funami T, Kataoka Y, Omoto T, et al. Food hydrocolloids control the gelatinization and retrogradation behavior of starch. 2a. Functions of guar gums with different molecular weights on the gelatinization behavior of corn starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2005, 19(1): 15-24
- [21] 魏春红,李春辉,鹿保鑫,等.不同粒度小米粉性质及对馒头品质的影响[J].*粮食与油脂*,2017,30(7):65-68  
WEI Chun-hong, LI Chun-hui, LU Bao-xin, et al. Characteristics of millet flour with different size and its influence on the quality of steamed bread [J]. *Cereals & Oils*, 2017, 30(7): 65-68
- [22] 王跃,李梦琴.超微粉碎对小麦麸皮物理性质的影响[J].*现代食品科技*,2011,3:39-42  
WANG Yue, LI Meng-qin. Effects of superfine grinding on the properties of wheat bran [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2011, 3: 39-42
- [23] 舒阳,杨晓萍.不同粒径绿茶粉粉体表征与物理性质的研究[J].*食品工业科技*,2016,37(22):164-167  
SHU Yang, YANG Xiao-ping. Study on the characterization and physical property of green tea powder with different particle sizes [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(22): 164-167
- [24] Ahmed J, Al-Attar H, Arfat Y A. Effect of particle size on compositional, functional, pasting and rheological properties of commercial water chestnut flour [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 888-895
- [25] 吴桂玲,李文浩,刘立品,等.脂类和颗粒结合蛋白对小麦A、B淀粉理化性质的影响[J].*中国粮油学报*,2016,31(8):17-23  
WU Gui-ling, LI Wen-hao, LIU Li-pin, et al. Effects of lipids and granule associated proteins on physicochemical properties of A, B wheat starches [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(8): 17-23
- [26] 张鸣镝,姚惠源.玉米胚芽分离蛋白溶解性和乳化性质的研究[J].*中国油脂*,2006,31(8):36-39  
ZHANG Ming-di, YAO Hui-yuan. Solubility and emulsifying properties of corn germ protein isolate [J]. *China Oils and Fats*, 2006, 31(8): 36-39
- [27] 王洪伟,武菁菁,阚健全.青稞和小麦醇溶蛋白和谷蛋白结构性质的比较研究[J].*食品科学*,2016,37(3):43-48  
WANG Hong-wu, WU Jing-jing, KAN Tian-quan. Comparison of structure characteristics of gliadin and glutenin in highland barley and wheat [J]. *Food Science*, 2016, 37(3): 43-48
- [28] 田建珍,沈莎莎,李李佳,等.小麦制粉过程中的吸风粉淀粉与小麦粉淀粉的理化性质对比研究[J].*中国粮油学报*,2015, 30(5):1-5,18  
TIAN Jian-zhen, SHEN Sha-sha, LI Jia-jia, et al. Comparison study of physicochemical properties between starch made from filter flour and wheat flour during wheat milling [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(5): 1-5, 18
- [29] 闫巧珍,高瑞雄,邢沁滢,等.马铃薯-小麦粉混粉的理化性质与消化特性研究[J].*食品工业科技*,2016,37(22):173-177  
YAN Qiao-zhen, GAO Rui-xiong, XING Xin-hui, et al. Study on physicochemical properties and digestibility of potato and wheat flour blends [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(22): 173-177