

# 大麦超微粉的营养品质及物理特性分析

朱爽, 宋莉莎, 张佰清\*, 马凤鸣, 孙肇敏, 宋蕾, 李文娟

(沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866)

**摘要:** 大麦粉可以单独或添加到小麦粉中制作食品, 其营养和物性指标会影响食品品质。该研究以大麦粉为研究对象, 以 60 目粗粉为对照, 探讨了超微粉碎对大麦粉的营养品质及物理特性的影响, 采用相关性分析及主成分分析对粉体进行综合评价, 优化大麦加工的最优粉体参数。结果表明: 随着粉碎粒径减小, 大麦粉的蛋白质和淀粉的溶出率增加; 多酚类溶出率从 964.10 mg/100 g 显著增加到 1396.00 mg/100 g, 黄酮溶出率增加了 1.90 mg/100 g; 大麦粉物理性质随粉碎粒径减小发生明显变化, 粒径由 93.07  $\mu\text{m}$  减小到 20.33  $\mu\text{m}$ , 亮度不断增强, L 值从 87.73 增加到 95.00 ( $p<0.05$ ), 休止角从 30.56  $^\circ$  增加到 56.84  $^\circ$  ( $p<0.05$ ), 滑角从 41.85  $^\circ$  增加到 79.93  $^\circ$  ( $p<0.05$ ), 其水溶性从 49.45% 增加到 85.13% ( $p<0.05$ ), 持水力先增大后降低, 与粗粉相比, 持水力降低了 0.95% ( $p<0.05$ ), 持油力降低了 2.68% ( $p<0.05$ ), 溶胀力提高了 2.90 mL/g ( $p<0.05$ ), 而堆积密度从 0.42 g/mL 变为 0.24 g/mL ( $p<0.05$ ); 主成分分析提取的 2 个主成分累计方差贡献率达到 95.526%, 200 目超微粉综合评分最高, 为 0.8368, 在 7 种粒径大麦粉中综合表现最佳。综上, 超微粉碎可改变粉体性质, 其变化与粒径有关, 该结果对大麦超微粉产品开发具有一定的参考价值。

**关键词:** 大麦; 超微粉碎; 营养品质; 物理特性; 主成分分析

文章编号: 1673-9078(2022)01-289-295

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.1.0386

## Analysis of Nutritional Quality and Physical Properties of Barley Ultrafine Powder

ZHU Shuang, SONG Lisha, ZHANG Baiqing\*, MA Fengming, SUN Zhaomin, SONG Lei, LI Wenjuan

(College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** Barley flour can be used alone or added to wheat flour to make foods, and its nutrition and physical properties will affect food quality. In this study, barley flour was used as the research object, 60 mesh coarse flour was used as the control, and the effects of ultrafine grinding on the nutritional quality and physical properties of barley flour were investigated. Correlation analysis and principal component analysis were used to evaluate comprehensively the powder, and the optimal powder parameters for barley processing were optimized. The results showed that the dissolution rates of protein and starch in barley powder increased with the decrease of particle size. The dissolution rate of polyphenols increased significantly from 964.10 mg/100 g to 1396.00 mg/100 g, and the dissolution rate of flavonoids increased by 1.90 mg/100 g; the physical properties of barley flour changed significantly with the decrease of grinding particle size. The particle size decreased from 93.07  $\mu\text{m}$  to 20.33  $\mu\text{m}$ , the brightness increased continuously; the L value increased from 87.73 to 95.00 ( $p<0.05$ ), the angle of repose increased from 30.56  $^\circ$  to 56.84  $^\circ$  ( $p<0.05$ ), and the angle of slip increased from 41.85  $^\circ$  to 79.93  $^\circ$  ( $p<0.05$ ). Its water solubility increased from 49.45% to 85.13% ( $p<0.05$ ), and the water holding capacity first increased and then decreased. Compared with the coarse powder, the water holding capacity decreased by 0.95% ( $p<0.05$ ), the oil holding capacity decreased by 2.68% ( $p<0.05$ ), the swelling power increased by 2.90 mL/g ( $p<0.05$ ), and the bulk density changed from 0.42 g/mL to 0.24 g/mL ( $p<0.05$ ). The cumulative variance contribution rate of the two principal components extracted by the principal component analysis reached 95.526%, and the 200-mesh ultrafine powder had the highest

引文格式:

朱爽,宋莉莎,张佰清,等.大麦超微粉的营养品质及物理特性分析[J].现代食品科技,2022,38(1):289-295,+93

ZHU Shuang, SONG Lisha, ZHANG Baiqing, et al. Analysis of nutritional quality and physical properties of barley ultrafine powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 289-295, +93

收稿日期: 2021-04-08

基金项目: 辽宁省凤城市食品加工科技特派团 (2020JH5/10400121)

作者简介: 朱爽 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, Email: 1842253673@qq.com

通讯作者: 张佰清 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 农产品加工, Email: zbzqfood@126.com

comprehensive score (0.8368) and the best overall performance among the seven barley flours with different particle sizes. To sum up, ultrafine pulverization can change the properties of the powder, and the change is related to the particle size. The results have a certain reference value for the development of barley ultrafine powder products.

**Key words:** barley; ultrafine pulverization; nutritional quality; physical characteristics; principal component analysis

大麦是全球的第五大粮食作物,富含蛋白质、矿物质、维生素、多酚及黄酮等营养物质,是一种兼备食疗功能的粮食作物,大麦食品已成为发达国家近年来消费增长量最快的谷物食品之一,也是啤酒工业和畜牧业的主要原料<sup>[1]</sup>。粒度会影响粉体的理化性质,粒度减小会导致粉体各种特性的改变,并具有一些不同于粗颗粒的特性<sup>[2]</sup>。与粗颗粒相比,超微粉具有表面性能更强、食品加工性能更好、水溶性更强、生物活性化合物含量及抗氧化活性更高等特点。超微粉还有良好的溶解性、吸附性、分散性等,不但有利于消化吸收,还能最大程度保留粉体的活性成分<sup>[3]</sup>。彭国泰等<sup>[4]</sup>研究表明,超微粉碎可以改善糙米粉的性质,为制作良好的米制品提供基础。杨茉等<sup>[5]</sup>将超微粉碎技术应用于笋壳粉粉碎,不仅可以提高其感官性能,还能改善其品质。

近年来,有研究报道了超微粉碎对大麦膳食纤维含量变化的影响<sup>[6]</sup>,而对大麦超微粉理化性质及加工的应用研究较少。本论文选取大麦粉为研究对象,通过比较常规粉碎处理的粉体和超微粉碎技术处理的不同粒径粉体的营养成分和加工特性的差异性,利用相关性分析和主成分分析法建立综合评价体系,确定大麦超微粉加工的最优工艺参数,促进大麦在食品领域的加工利用。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与试剂

大麦,购于河北石家庄蓓芽食品有限公司。福林酚、芦丁、没食子酸为标准品;甲基红及溴甲酚绿为指示剂;硫酸铜、石油醚、碘化钾、碘等其他试剂为分析纯;均购于鼎国生物技术有限公司。

### 1.2 仪器与设备

超声波清洗机 SB25-12DTN,上海三申器械有限公司;恒温水浴锅 DK-S22,常州国华科技有限公司;紫外-可见分光光度计 UV-5100,上海谱元仪器有限公司;电热恒温鼓风干燥箱 DHG-9030A,上海一恒科学仪器有限公司;高速冷冻离心机 2-16KL, Sigma 公司;半自动凯氏定氮仪 K9840,山东海能科学仪器有限公司;高速万能粉碎机 FW100,上海楚定分析仪器有限

公司;电子分析天平 JD400-3,沈阳龙腾电子有限公司;色差仪 NH310,深圳市三恩时科技有限公司;超微粉碎振动磨 KCE-10,北京锟捷玉诚机械设备有限公司;激光粒度仪 A22,德国 FRITSCH 公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品制备

将大麦进行普通粉碎过 60 目筛,作为对照。而后进行超微粉碎并通过筛分,依次通过 100、150、200、250/300 及 350 目标准检验筛进行分级。最终得到 7 种不同粒径的粉体,分别设为粗粉、微粉 I、微粉 II、微粉 III、微粉 IV、微粉 V、微粉 VI。

#### 1.3.2 粉体的粒径测定

将大麦粉置于激光粒度仪内,室温下测定粉体的粒径及其分布。 $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$  分别代表累计分布百分数达到 10%、50%和 90%时对应的粒径值, $D_{(4,3)}$ 代表粉体体积的平均直径。跨度(Span)表示粒径分布的宽度,计算公式如下:

$$Span = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}}$$

#### 1.3.3 营养品质测定

##### 1.3.3.1 蛋白质和淀粉

蛋白质测定<sup>[7]</sup>: GB/T 5009.5-2010; 淀粉测定<sup>[8]</sup>: GB/T 5009.9-2010。

##### 1.3.3.2 多酚和黄酮测定

称取样品粉末 1.0 g 放入 50 mL 锥形瓶中,加入 30 mL 80%的乙醇溶液,在 40 °C 下超声提取 40 min,放入离心管内,在 4000 r/min 下离心 30 min,取上清液待测。黄酮含量的测定方法参考亚硝酸钠-硝酸铝比色法<sup>[9]</sup>,以芦丁为标准品,其标准曲线方程为: $y=9.2014x-0.0034$  ( $R^2=0.9964$ )。总酚含量的测定采用福林酚比色法<sup>[10]</sup>,并以没食子酸作为标准品,其标准曲线方程为: $y=0.9329x+0.0176$ ,决定系数 ( $R^2=0.9973$ )。结果以 mg/100 g 表示。

#### 1.3.4 大麦粉物理特性的测定

##### 1.3.4.1 持水及持油力

持水力:参考何运等<sup>[11]</sup>方法稍作修改,称取 1 g 大麦粉。计算公式如下:

$$\text{粉体持水力}/\% = \frac{M_2 - M_1}{M} \times 100\%$$

式中:

$M$ —样品质量, g;

$M_1$ —样品与离心管的总质量, g;

$M_2$ —离心后的样品与离心管的总质量, g。

持油力: 参考 He 等<sup>[12]</sup>的方法, 稍作修改。准确称取 1 g 大麦粉, 加入 20 mL 大豆油。计算公式如下:

$$\text{粉体持油力}/\% = \frac{M_2 - M_1}{M} \times 100\%$$

式中:

$M$ —样品质量, g;

$M_1$ —样品与离心管的总质量, g;

$M_2$ —离心后的样品与离心管的总质量, g。

### 1.3.4.2 水溶性

参考 Liu 等<sup>[13]</sup>的方法, 稍作修改。准确称取 0.5 g 样品。计算公式如下:

$$\text{水溶性}/\% = \frac{M_2}{M_1} \times 100\%$$

式中:

$M_1$ —样品质量, g;

$M_2$ —离心后的样品质量, g。

### 1.3.4.3 溶胀力

参考 Meng 等<sup>[14]</sup>方法, 稍作修改, 准确称取 1 g 样品。计算公式:

$$\text{溶胀力}/(\text{mL}/\text{g}) = \frac{V_2 - V_1}{M}$$

式中:

$M$ —样品质量, g;

$V_1$ —样品粉体积, mL;

$V_2$ —充分溶胀后的物料体积, mL。

### 1.3.4.4 休止角和滑角

休止角和滑角测定<sup>[15]</sup>: 根据 Zhao 和 Du 的方法。

### 1.3.4.5 堆积密度

参考 Zhao 等<sup>[16]</sup>方法, 稍作修改, 称取 1 g 样品。计算公式如下:

$$\text{堆积密度}/(\text{g}/\text{mL}) = \frac{M}{V}$$

式中:

$M$ —样品重量, g;

$V$ —粉末在量筒中占据的体积, mL。

### 1.3.4.6 色差测定

根据色差仪, 用光源对样品进行 L、a、b 测定。其中 L (Luminance) 为明度; a 为红绿色度; b 为黄蓝色度。

## 1.4 数据处理

试验数据均用平均数±标准差表示, 数据及显著性均采用 SPSS 软件分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 超微粉碎对大麦粉粒径的影响

大麦粉粒径分布如表 1, 与粗粉相比, 大麦粉的  $D_{50}$  由 34.57  $\mu\text{m}$  减小到 16.83  $\mu\text{m}$ ; 大麦超微粉的  $D_{10}$  由 4.40  $\mu\text{m}$  降低到 2.83  $\mu\text{m}$ ; 大麦超微粉的  $D_{90}$  由 130.27  $\mu\text{m}$  减小到 43.17  $\mu\text{m}$ 。随着粒径减小, 大麦粉的体积平均粒径  $D(4,3)$  显著降低, 由 93.07  $\mu\text{m}$  减小至 20.33  $\mu\text{m}$ ; 大麦粉的跨度也显著减小, 由 6.95  $\mu\text{m}$  减小至 1.76  $\mu\text{m}$ 。超微粉碎可减小颗粒尺寸, 增加表面积; 跨度 (Span) 表示粒径分布的宽度。跨度越小, 粒度分布越窄, 越均匀<sup>[17]</sup>。与粗粉相比, 大麦超微粉的跨度逐渐减小。微粉 VI 的跨度值最小, 与粗粉具有明显的差异, 不同粉体间跨度值差异明显。

表 1 不同粉体的粒径分布

Table 1 Particle size distribution of different powder

粉体	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$D_{(4,3)}/\mu\text{m}$	Span
粗粉	4.60±0.10 <sup>a</sup>	34.57±0.93 <sup>a</sup>	242.70±1.40 <sup>a</sup>	93.07±0.61 <sup>a</sup>	6.95±0.49 <sup>a</sup>
微粉 I	4.40±0.10 <sup>ab</sup>	24.87±0.12 <sup>b</sup>	130.27±1.10 <sup>b</sup>	48.27±0.38 <sup>b</sup>	5.21±0.09 <sup>b</sup>
微粉 II	4.37±0.15 <sup>ab</sup>	24.43±0.06 <sup>b</sup>	49.87±0.06 <sup>c</sup>	26.17±0.06 <sup>c</sup>	2.38±0.06 <sup>c</sup>
微粉 III	4.20±0.10 <sup>b</sup>	24.33±1.35 <sup>b</sup>	47.57±0.38 <sup>d</sup>	26.13±0.06 <sup>c</sup>	1.85±0.02 <sup>d</sup>
微粉 IV	3.63±0.35 <sup>c</sup>	22.23±0.15 <sup>c</sup>	45.10±0.36 <sup>e</sup>	23.50±0.10 <sup>d</sup>	1.83±0.01 <sup>d</sup>
微粉 V	3.27±0.12 <sup>d</sup>	21.13±0.21 <sup>c</sup>	43.50±0.10 <sup>f</sup>	22.50±0.10 <sup>e</sup>	1.82±0.01 <sup>d</sup>
微粉 VI	2.83±0.15 <sup>e</sup>	16.83±0.55 <sup>d</sup>	43.17±0.64 <sup>f</sup>	20.33±0.45 <sup>f</sup>	1.76±0.01 <sup>d</sup>

注: 同一列不同字母代表样品间的显著差异 ( $p < 0.05$ )。表 2、3 同。

### 2.2 超微粉碎对大麦粉营养成分及色泽的影响

由表 2 可知, 与 60 目粗粉相比, 超微粉的蛋白质、

淀粉、多酚、黄酮的溶出率均有提高, 且不同粉体间具有明显的差异; 其中, 蛋白质的溶出率由 6.52% 提高到 16.14%; 可能是由于超微粉碎的强烈冲击力, 使

蛋白质的高级结构发生改变, 蛋白质疏水性上升, 原因可能是超微粉碎使蛋白质的疏水基团暴露出来导致的<sup>[18]</sup>。而淀粉的溶出率由 9.97% 提高到 12.41%, 可能是随着超微粉碎程度加强, 导致淀粉部分糊化的同时, 淀粉表面结构被破坏, 引起淀粉降解及渗出, 使颗粒团聚<sup>[19]</sup>。因此, 随着粒径减小, 淀粉含量会逐渐增加。

超微粉碎处理后大麦粉多酚溶出量由 964.10 mg/100 g 增加到 1396.00 mg/100 g, 黄酮溶出量由 11.10 mg/100 g 增加到 21.50 mg/100 g; 分别提高了 431.90 mg/100 g 和 10.40 mg/100 g; 是因为超微粉碎使其平均粒径减小, 粉体均匀性增加, 黄酮与提取溶剂接触表面积增大、接触更充分, 可提高其中黄酮的提取率; 而超微粉的多酚溶出率显著高于对照, 说明超微粉碎能促使细胞破碎, 有助于多酚的溶出<sup>[20]</sup>。

食品色泽是影响消费者对产品可接受度的感官指标。大麦粉的 L 值从 87.73 增加到 95.00 ( $p < 0.05$ ), 且 a 值和 b 值明显低于大麦粗粉, 超微粉碎处理使大麦粉亮度显著增加。可能是随着粒径减小, 比表面积不断增大, 光反射随之增加, 从而使其亮度显著变强。因此, 超微粉碎提高了大麦粉的感官质量。

### 2.3 超微粉碎对大麦粉加工特性的影响

由表 3 可知, 与 60 目粗粉相比, 大麦粉的水溶性整体呈逐渐增加趋势, 微粉 I 的水溶性由 49.45% 增加到 64.93%, 微粉 VI 增加了 35.68%; 随着粉碎目数增

加, 粒径减小更有利于可溶性组分的溶出<sup>[21]</sup>。超微粉碎降低了大麦粉的持水和持油力。大麦粉的持水力呈先增后降趋势, 其中微粉 II 的持水力最高为 3.95%, 微粉 VI 的持水力最低为 2.35%, 可能是随着平均粒径减小, 比表面积不断增加, 颗粒更充分的与水接触, 导致持水能力增强。然而, 随着粒径进一步减小, 强大的机械力破坏了粉体内部多孔网络结构, 使持水能力下降<sup>[22]</sup>。

研究表明, 堆积密度越大越有利于压片成型<sup>[23]</sup>。随着粒径减小, 其堆积密度逐渐下降; 与 60 目粗粉相比, 微粉 VI 的堆积密度最小为 0.24 g/mL, 但不利于压片成型。溶胀力是反映水合能力的重要参数<sup>[24]</sup>。大麦超微粉溶胀力由粗粉的 9.17 mL/g 先是增加到微粉 I 的 9.95 mL/g, 又持续减小到微粉 VI 的 6.27 mL/g; 可能是由于随着粉碎目数增加, 破坏了大麦粉膳食纤维结构, 使其颗粒变小, 吸水膨胀后相互间产生的阻力增大, 阻碍了粉体膨胀。

休止角和滑角表示粉体流动性能。休止角越小, 粉体流动性越好, 反之则越差<sup>[25]</sup>。随着粒径减小, 其休止角和滑角显著增加; 休止角由 30.56° 增加到 56.84°, 而滑角由 41.85° 增加到 79.93°; 超微粉滑角显著增大, 表明粉体之间具有良好的吸附力和凝聚性。这是由于大麦粉粒径越小, 比表面积越大, 静电作用力增强, 使表面聚合力增大, 更易吸附和凝聚, 而引起流动性变差<sup>[26]</sup>。

表 2 不同粒径大麦粉中营养成分含量 (干基)

Table 2 Nutrient content of barley flour with different particle size (dry base)

粉体	蛋白质/%	淀粉/%	多酚/(mg/100 g)	黄酮/(mg/100 g)	L	a	b
粗粉	6.52±0.32 <sup>e</sup>	9.97±0.43 <sup>de</sup>	964.10±0.30 <sup>e</sup>	11.10±0.01 <sup>d</sup>	87.73±0.60 <sup>d</sup>	0.68±0.04 <sup>a</sup>	9.58±0.45 <sup>a</sup>
微粉 I	11.08±0.28 <sup>d</sup>	10.15±0.51 <sup>cde</sup>	993.50±0.55 <sup>de</sup>	15.90±0.01 <sup>c</sup>	90.53±0.59 <sup>c</sup>	0.35±0.03 <sup>b</sup>	8.41±0.24 <sup>b</sup>
微粉 II	11.90±0.40 <sup>cd</sup>	9.56±0.31 <sup>e</sup>	1033.80±0.44 <sup>cde</sup>	16.00±0.01 <sup>c</sup>	93.44±0.57 <sup>b</sup>	0.14±0.03 <sup>c</sup>	7.45±0.39 <sup>c</sup>
微粉 III	12.10±0.62 <sup>cd</sup>	10.82±0.32 <sup>bc</sup>	1048.00±0.31 <sup>cd</sup>	19.30±0.01 <sup>b</sup>	94.28±0.39 <sup>ab</sup>	0.04±0.04 <sup>d</sup>	7.09±0.20 <sup>c</sup>
微粉 IV	12.20±0.46 <sup>c</sup>	10.43±0.53 <sup>cd</sup>	1142.00±0.55 <sup>c</sup>	18.90±0.01 <sup>b</sup>	94.35±1.32 <sup>ab</sup>	0.01±0.05 <sup>d</sup>	6.90±0.37 <sup>c</sup>
微粉 V	14.10±0.68 <sup>b</sup>	11.36±0.24 <sup>b</sup>	1281.20±0.38 <sup>b</sup>	19.60±0.01 <sup>b</sup>	94.55±0.55 <sup>ab</sup>	-0.07±0.05 <sup>e</sup>	6.26±0.43 <sup>d</sup>
微粉 VI	16.14±0.99 <sup>a</sup>	12.41±0.56 <sup>a</sup>	1396.00±0.33 <sup>a</sup>	21.50±0.01 <sup>a</sup>	95.00±0.18 <sup>a</sup>	-0.09±0.03 <sup>e</sup>	6.29±0.24 <sup>d</sup>

表 3 不同粒径粉体的加工特性

Table 3 Processing characteristics of powders with different particle sizes

粉体	水溶性/%	堆积密度/(g/mL)	溶胀力/(mL/g)	持水力/%	持油力/%	休止角/°	滑角/°
粗粉	49.45±4.74 <sup>d</sup>	0.42±0.01 <sup>a</sup>	9.17±0.43 <sup>b</sup>	3.30±0.26 <sup>c</sup>	4.04±0.16 <sup>a</sup>	30.56±2.00 <sup>d</sup>	41.85±2.58 <sup>e</sup>
微粉 I	64.93±3.76 <sup>c</sup>	0.41±0.01 <sup>a</sup>	9.95±0.44 <sup>a</sup>	3.76±0.09 <sup>ab</sup>	3.57±0.17 <sup>b</sup>	36.33±1.77 <sup>cd</sup>	56.16±2.82 <sup>d</sup>
微粉 II	67.25±2.22 <sup>c</sup>	0.38±0.01 <sup>b</sup>	8.47±0.40 <sup>c</sup>	3.95±0.20 <sup>a</sup>	3.69±0.07 <sup>c</sup>	39.17±2.04 <sup>c</sup>	61.89±2.94 <sup>c</sup>
微粉 III	76.78±4.71 <sup>b</sup>	0.36±0.01 <sup>b</sup>	7.33±0.57 <sup>d</sup>	3.60±0.08 <sup>bc</sup>	3.00±0.12 <sup>c</sup>	45.90±2.36 <sup>b</sup>	61.93±2.48 <sup>c</sup>
微粉 IV	75.9±3.06 <sup>b</sup>	0.34±0.03 <sup>b</sup>	8.41±0.45 <sup>c</sup>	3.51±0.22 <sup>bc</sup>	2.53±0.15 <sup>d</sup>	48.26±1.53 <sup>b</sup>	75.10±2.45 <sup>b</sup>
微粉 V	79.93±2.20 <sup>ab</sup>	0.30±0.03 <sup>c</sup>	7.52±0.38 <sup>d</sup>	2.63±0.14 <sup>d</sup>	1.65±0.11 <sup>e</sup>	55.49±1.93 <sup>a</sup>	73.25±3.39 <sup>b</sup>
微粉 VI	85.13±3.19 <sup>a</sup>	0.24±0.02 <sup>d</sup>	6.27±0.44 <sup>e</sup>	2.35±0.17 <sup>d</sup>	1.36±0.12 <sup>f</sup>	56.84±1.66 <sup>a</sup>	79.93±1.89 <sup>a</sup>

表4 不同粒径粉体品质指标的相关性

Table 4 Correlation of quality indexes of powders with different particle sizes

指标	蛋白质	淀粉	多酚	黄酮	堆积密度	水溶性	溶胀力	持水力	持油力	滑角	休止角	L	a	b
蛋白质	1.000													
淀粉	0.762	1.000												
多酚	0.860	0.908	1.000											
黄酮	0.950	0.768	0.803	1.000										
堆积密度	-0.893	-0.902	-0.987	-0.857	1.000									
水溶性	0.960	0.767	0.823	0.997	-0.877	1.000								
溶胀力	-0.751	-0.830	-0.816	-0.779	0.884	-0.793	1.000							
持水力	-0.545	-0.896	-0.873	-0.494	0.820	-0.515	0.698	1.000						
持油力	-0.871	-0.913	-0.972	-0.873	0.967	-0.887	0.802	0.833	1.000					
滑角	0.933	0.702	0.864	0.935	-0.894	0.945	-0.710	-0.527	-0.894	1.000				
休止角	0.915	0.850	0.930	0.938	-0.955	0.953	-0.840	-0.716	-0.976	0.937	1.000			
L	0.898	0.570	0.705	0.938	-0.787	0.950	-0.757	-0.324	-0.761	0.917	0.880	1.000		
a	-0.934	-0.635	-0.764	-0.963	0.829	-0.976	0.754	0.404	0.825	-0.945	-0.923	-0.991	1.000	
b	-0.939	-0.684	-0.820	-0.955	0.874	-0.973	0.787	0.494	0.872	-0.952	-0.954	-0.976	0.993	1.000

表5 各主成分初始因子载荷矩阵、特征向量及方差贡献率

Table 5 Initial factor load matrix, eigenvector and variance contribution rate of each principal component

指标	初始因子载荷矩阵		特征向量	
	主成分 1	主成分 2	主成分 1	主成分 2
蛋白质	0.844	0.466	0.141	0.647
淀粉	0.399	0.883	0.067	1.223
多酚	0.547	0.817	0.092	1.134
黄酮	0.889	0.415	0.149	0.576
堆积密度	-0.632	-0.763	-0.106	-1.059
水溶性	0.893	0.430	0.150	0.597
溶胀力	-0.574	-0.668	-0.096	-0.927
持水力	-0.107	-0.988	-0.018	-1.371
持油力	-0.624	-0.762	-0.104	-1.058
滑角	0.863	0.436	0.145	0.605
休止角	0.764	0.630	0.128	0.874
L	0.966	0.223	0.162	0.310
a	-0.952	-0.300	-0.160	-0.416
b	-0.912	-0.389	-0.153	-0.540
特征值( $\lambda$ )	11.933	1.441	11.933	1.441
解释方差/%	85.234	85.234	85.234	85.234
累计解释方差/%	10.292	95.526	10.292	95.526

## 2.4 相关性分析

通过对不同粒径粉体的多酚、黄酮、水溶性、持水力、持油力、堆积密度、溶胀力等 14 个指标进行相关性分析。相关性分析如表 4 所示，由表 4 可知，这 14 项指标具有相关性，因此需要对指标进行主成分分析。

## 2.5 主成分分析

### 2.5.1 各指标的主成分因子分析

对不同粒径粉体的多酚、黄酮、水溶性、持水力、持油力、堆积密度、溶胀力等 14 (X1-X14) 个指标进行主成分分析。根据累积方差贡献率大于 85%和特征值大于 1 是达到降维目的的前提，只选取范围内的

前几个主成分, 主成分贡献率多少可以用主成分矩阵来衡量, 其绝对值的大小关系代表了该变量对这一主成分的贡献多少<sup>[27]</sup>。从表 5 看出, 提取第二主成分时, 累计方差贡献率达到 95.526%, 累计贡献率大于 85%, 且特征值均大于 1。可认为提取的前两个主成分代表不同粒径粉体理化性质的绝大部分信息。第一主成分贡献为 85.234%, 主要综合了蛋白质、黄酮、水溶性、滑角、休止角、L 值、a、b 的信息, 其中水溶性、L 值具有较大载荷; 第二主成分贡献为 10.292%。主要综合了淀粉、多酚、堆积密度、持水力及持油力的信息, 其中淀粉、多酚具有较大载荷。

### 2.5.2 不同粒径粉体综合品质的评价

根据特征向量和标准化后的数据, 可得出前 2 个主成分因子方程表达式为:

$$PC1=0.141X1+0.067X2+0.092X3+0.149X4-0.106X5+0.150X6-0.096X7-0.018X8-0.104X9+0.145X10+0.128X11+0.162X12-0.160X13-0.153X14;$$

$$PC2=0.647X1+1.223X2+1.134X3+0.576X4-1.059X5+0.597X6-0.927X7-1.371X8-1.058X9+0.605X10+0.874X11+0.310X12-0.416X13-0.540X14;$$

以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总特征值之和的比例作为权重计算主成分综合模型<sup>[27]</sup>: 可以得出不同粒径粉体品质综合评价得分 (Dn),  $Dn=0.8923PC1+0.1077PC2$ 。

表 6 不同粒径粉体品质的主成分得分

Table 6 Principal component scores of powders with different particle sizes

粉体	主成分得分		综合得分	
	PC1	PC2	Dn	排名
粗粉	0.337	4.535	0.789	7
微粉 I	0.357	4.639	0.819	5
微粉 II	0.360	4.653	0.822	3
微粉 III	0.369	4.712	0.837	1
微粉 IV	0.364	4.690	0.830	2
微粉 V	0.355	4.668	0.820	4
微粉 VI	0.352	4.660	0.816	6

表 6 第 1 和第 2 主成分中, 与粗粉相比, 微粉 III 得分最高分别为 0.369 和 4.712, 排名第一, 微粉 IV 得分第二, 而粗粉得分最低分别为 0.337 和 4.535; 与粗粉相比, 微粉 III 的综合得分最高为 0.837, 且第 1 和第 2 主成分得分排名与综合排名完全一致, 说明蛋白、黄酮、水溶性、滑角、休止角和 L 值在综合评价大麦粉体品质中起到重要作用。因此, 微粉 III 综合得分最高, 说明其理化品质在 7 种大麦粉体中最优; 而粗粉得分最低, 说明其理化品质相对较差。

## 3 结论

3.1 本文对 7 种粒径大麦超微粉的营养品质、物理特性进行了比较分析, 结果表明: 多数指标在不同粒径间均有不同程度的差异, 经超微粉碎处理的大麦粉, 提高了蛋白质、淀粉的溶出率, 亮度增加, 休止角及滑角变大, 改善了水溶性、持水力及溶胀性, 多酚及黄酮的溶出率也显著增加。利用 SPSS 相关性分析和主成分分析对不同粒径粉体进行综合评价, 提取的 2 个主成分累计方差贡献率达到 89.297%, 表明 200 目大麦粉排名最高, 品质最佳。

3.2 综上, 超微粉碎可改善大麦粉的营养品质、物理性质等粉体性质, 其品质变化与粒径有关, 开发大麦超微粉产品时, 一定要考虑粉碎粒径的影响。此外, 对大麦超微粉的粉质性状及成团性能等也要测定分析, 深入研究。

## 参考文献

- [1] 曹文, 叶晓汀, 谢静, 等. 大麦营养品质及加工研究进展[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(2): 55-59  
CAO Wen, YE Xiaoting, XIE Jing, et al. Research progress on nutritional quality and processing of barley [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Food, 2016, 24(2): 55-59
- [2] ZHANG Min, WANG Fang, LIU Rui, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of *Lycium barbarum* polysaccharides [J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 58(2): 594-601
- [3] 杨芙莲, 王平平, 王艳莉. 超微粉碎对甜荞麦全粉理化特性的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(10): 234-238  
YANG Fulian, WANG Pingping, WANG Yanli. Effects of ultrafine grinding on physicochemical properties of sweet buckwheat whole powder [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(10): 234-238
- [4] 彭国泰, 吴娜娜, 谭斌, 等. 超微粉碎处理对糙米粉理化性质的影响[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(2): 17-21  
PENG Guotai, WU Nana, TAN Bin, et al. Effects of ultrafine grinding on the physicochemical properties of brown rice flour [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Food, 2017, 25(2): 17-21
- [5] 杨茉, 王素雅, 曹崇江, 等. 超微粉碎对竹笋壳粉理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 34-39  
YANG Mo, WANG Suya, CAO Chongjiang, et al. Effect of ultrafine grinding on physicochemical properties of bamboo shell powder [J]. Science and Technology of Food Industry,

- 2019, 40(1): 34-39
- [6] ZHU Fengmei, DU Bin, XU Baojun. Superfine grinding improves functional properties and antioxidant capacities of bran dietary fibre from Qingke (hull-less barley) grown in Qinghai-Tibet plateau, China [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 65: 43-47
- [7] GB 5009.5-2016, 食品安全国家标准食品中蛋白质的测定 [S]  
GB 5009.5-2016, National Standard for Food Safety Determination of Protein in Food [S]
- [8] GB 5009.9-2016, 食品安全国家标准食品中淀粉的测定[S]  
GB 5009.9-2016, National Standard for Food Safety Determination of Starch in Food [S]
- [9] 吴瑛,王秀芳,袁守亮.响应面分析昆仑雪菊水溶性黄酮类化合物的提取工艺[J].食品科学,2013,34(6):129-133  
WU Ying, WANG Xiufang, YUAN Shouliang. Response surface analysis of extraction process of water-soluble flavonoids from Kunlun chrysanthemum [J]. Food Science, 2013, 34(6): 129-133
- [10] Ok-Ju Kang. Distribution of free, esterified, and insoluble bound forms of phenolics in tea seeds and their antioxidant activity [J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(1): 121-127
- [11] 何运,范子玮,吴雨,等.不同粒度桑叶粉的物化特性和黄酮体外溶出规律的研究[J].食品科学,2016,37(9):123-128  
HE Yun, FAN Ziwei, WU Yu, et al. Study on physicochemical properties of mulberry leaf powder with different particle size and *in vitro* dissolution of flavonoids [J]. Food Science, 2016, 37(9): 123-128
- [12] HE Shudong, TANG Mingming, SUN Hanju, et al. Potential of water dropwort (*Oenanthe javanica* DC.) powder as an ingredient in beverage: functional, thermal, dissolution and dispersion properties after superfine grinding [J]. Powder Technology, 2019, 353: 516-525
- [13] LIU Rui, LI Jian, WU Tao, et al. Effects of ultrafine grinding and cellulase hydrolysis treatment on physicochemical and rheological properties of oat (*Avena nuda* L.)  $\beta$ -glucans [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 65: 125-131
- [14] Meng Q, Fan H, Chen F, et al. Preparation and characterization of *Dendrobium officinale* powders through superfine grinding [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2017, 8: 15902-15912
- [15] ZHAO Xiaoyan, DU Fangling, ZHU Qingjun, et al. Effect of superfine pulverization on properties of *Astragalus membranaceus* powder [J]. Powder Technology, 2010, 203(3): 620-625
- [16] Zhao Xiaoyan, Yang Zaibin, Gai Guosheng, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91: 217-222
- [17] ZHANG Zipei, SONG Huige, PENG Zhen, et al. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 406-413
- [18] 于翠平,查越,吴凡,等.超微粉碎技术对蛋白质理化及功能性影响的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2018,9(2): 360-365  
YU Cuiping, ZHA Yue, WU Fan, et al. Research progress on effects of ultrafine pulverization on physicochemical and functional properties of proteins [J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2018, 9(2): 360-365
- [19] 王玮.超微粉碎麸皮的功能特性及应用研究[D].郑州:河南工业大学,2016  
WANG Wei. Study on functional characteristics and application of ultrafine grinding bran [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016
- [20] 李凤英,许瑞,刘战永,等.超微粉碎对玫瑰花营养成分及抗氧化活性的影响[J].北方园艺,2017,12:141-145  
LI Fengying, XU Rui, LIU Zhanyong, et al. Effects of ultrafine grinding on nutrient composition and antioxidant activity of rose [J]. Northern Horticulture, 2017, 12: 141-145
- [21] ZHANG Jiangtao, DONG Yushan, Tanzeela Nisar, et al. Effect of superfine-grinding on the physicochemical and antioxidant properties of *Lycium ruthenicum* Murray powders [J]. Powder Technology, 2020, 372: 68-75
- [22] Ramachandiraiah K, Chin K B. Evaluation of ball-milling time on the physicochemical and antioxidant properties of persimmon by-products powder [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 37: 115-124
- [23] 梁琪,毕阳,米兰,等.沙枣细粉超微粉碎后对物化特性的影响研究[J].食品工业科技,2012,33(11):76-78,82  
LIANG Qi, BI Yang, MI Lan, et al. Effect of ultrafine grinding on physical and chemical properties of *Zizyphus jujuba* powder [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(11): 76-78, 82
- [24] 林丽静,黄晓兵,龚霄,等.超微粉碎对菠萝皮渣理化特性的影响[J].农产品加工,2016,22:19-21,24  
LIN Lijing, HUANG Xiaobing, GONG Xiao, et al. Effect of ultrafine grinding on physicochemical properties of pineapple peel [J]. Agricultural Products Processing, 2016, 22: 19-21, 24

(下转第 93 页)