

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.81213

磨粉方式对苦荞叶粉理化特性的影响

冯瑜霞 曲美霖 程 哲 李云龙

(山西农业大学山西功能食品研究院, 山西 太原 030031)

摘要: [目的] 探讨磨粉方式对苦荞叶粉理化特性的影响。[方法] 以黑丰 1 号苦荞叶为原料, 利用电动石磨、超微粉碎机、钢磨粉碎机和五谷杂粮磨粉机 4 种方式对其进行粉碎, 通过测定叶粉的粒径、比表面积、密度、休止角以及营养成分和水合特性等指标, 探究不同磨粉方式对苦荞叶粉理化特性的影响。[结果] 超微粉碎制备的苦荞叶粉中蛋白质、可溶性膳食纤维、叶绿素含量以及功能性成分 GABA、芦丁、槲皮素含量显著高于其他方式; 电动石磨制备的苦荞叶粉粒径最小, 超微粉碎的次之, 且色泽最亮; 五谷杂粮磨粉的苦荞叶粉粒径最高, 其 D_{50} 为其他磨粉方式的 3~5 倍, 其比表面积和细胞破碎率最低, 流动性最好; 五谷杂粮磨粉的苦荞叶粉持水力最高, 水溶性最小; 常温条件下, 苦荞叶粉的溶胀性随着粉粒径的减小而降低。4 种磨粉方式的苦荞叶粉的红外吸收光谱基本相同, 均含有 O—H、C—H、C=O、N—H、C—O—C 键。[结论] 磨粉方式对苦荞叶粉特性存在影响, 可根据终端用途来选择磨粉方式, 其中超微粉碎对苦荞叶粉的功能成分保留最好。

关键词: 苦荞叶粉; 磨粉方式; 理化特性; 红外光谱

Effects of different milling methods on the physicochemical properties of tartary buckwheat leaf powder

FENG Yuxia QU Meilin CHENG Zhe LI Yunlong

(Institute of Functional Food of Shanxi, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: [Objective] The effect of milling methods on tartary buckwheat leaves was discussed. [Methods] Tartary buckwheat leaves (Heifeng 1) were used as raw materials and the effects of the different grinding treatments (electric stone mill, ultra-microcrushing, steel grinding, grainmill) on the physical-chemical characteristics such as particle size, specific surface area, density, angle of repose, nutrient composition and hydration characteristics of tartary buckwheat leaf powder were investigated. [Results] The contents of protein-soluble dietary fiber, chlorophyll and functional components GABA, rutin and quercetin in tartary buckwheat leaf powder prepared by ultrafine grinding were significantly higher than those of other methods. The particle size of tartary buckwheat leaf powder was small when prepared by the electric stone mill, followed by ultrafine grinding, and the color was the brightest. The D_{50} was three to five times more than that of previous grinding techniques, the specific surface area and cell breakage rate were the lowest, and the fluidity was the highest after the grains were ground. The water-holding capacity of grain mill leaf powder was the highest, and the water solubility was the lowest. At room temperature, the swelling property of tartary buckwheat leaf powder decreased with the decrease in powder particle size. Fourier transform infrared spectroscopy analysis showed that the infrared absorption spectra of tartary buckwheat leaf powder by four milling methods were the same, all of which contained O—H, C—H, C=O, N—H and C—O—C bonds. [Conclusion] Different grinding methods affect the characteristics of tartary buckwheat leaf powder, and the grinding method can be selected according to the terminal use. Among them, ultrafine grinding has the best retention of functional components of tartary buckwheat leaf powder.

Keywords: tartary buckwheat leaf powder; grinding methods; physical and chemical properties; infrared spectrum

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (编号: CARS-07-E-2); 山西省现代农业杂粮产业技术体系建设 (编号: 2023-03)

通信作者: 程哲 (1985—), 女, 山西农业大学副研究员, 硕士。E-mail: chengzhe31@163.com

李云龙 (1979—), 男, 山西农业大学研究员, 硕士。E-mail: liyunlong125@126.com

收稿日期: 2023-12-07 **改回日期:** 2024-04-28

苦荞(*Fagopyrum esculentum* Moench)属于蓼科荞麦属。作为药食同源作物,苦荞除含有丰富的营养物质(蛋白质、氨基酸、不饱和脂肪酸等)外,还富含黄酮、酚酸、生物碱、三萜、蒽醌等生物活性物质,具有降“三高”、消炎、抗氧化、抗病毒、抗动脉硬化和抗癌防癌等多种保健功能^[1-2]。目前,关于苦荞的研究及开发应用主要集中于苦荞籽粒,Krzysztof等^[3]对苦荞花、叶、茎、根中的多酚进行研究,发现叶中芦丁含量最高。虽然苦荞叶中含有大量的芦丁、类胡萝卜素、叶黄素^[4]、D手性肌醇^[5]等功能性成分,营养健康价值较高,但苦荞叶仍未被较好地开发利用,大多直接与秸秆一起用作生物肥^[6],造成资源的浪费,即使被利用也多以制茶的方式直接饮用^[7-10],形式较为单一且可食性低。研究拟以黑丰1号苦荞叶为原料,试图解析电动石磨、超微粉碎机、钢磨粉碎机和五谷杂粮磨粉多种机械磨粉方式对其内部理化特性的影响,为苦荞叶进一步的新产品创制及其高效综合利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

苦荞叶:黑丰1号,山西农业大学功能食品研究院提供;

膳食纤维试剂盒:上海安谱实验科技股份有限公司;

芦丁标准溶液:纯度91.5%,中国食品药品检定研究院;

没食子酸标准品:纯度91.5%,中国食品药品检定研究院;

紫外分光光度仪:A380型,翱艺仪器(上海)有限公司;

激光粒度分布仪:BT2001型,丹东百特仪器有限公司;

电动石磨:青石45*65型,泉州磨缘电动石磨有限公司;

超微粉碎:RTUF26型,荣聪精密科技有限公司;

钢磨粉碎机:LG30型,天津市泰斯特仪器有限公司;

五谷杂粮磨粉机:HK860型,广州市旭朗机械设备有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 苦荞叶粉的制备 将采摘的新鲜黑丰1号苦荞叶清洗、沥水、烘干、杀青后,60℃烘干3h,分别用电动石磨、超微粉碎机、钢磨粉碎机和五谷杂粮磨粉机进行粉碎,过80目筛,保存备用。

1.2.2 基本成分测定

(1) 灰分含量:参照GB 5009.3—2016。

(2) 蛋白质含量:参照GB 5009.5—2016。

(3) 膳食纤维含量:参照GB 5009.88—2013。

(4) 芦丁、槲皮素、 γ -氨基丁酸、叶绿素含量:采用高

效液相色谱法^[11]。

1.2.3 粒度分布及比表面积测定 根据Zhao等^[12]的方法。

1.2.4 密度测定 将1.5g苦荞叶粉轻轻倒入10mL量筒中,记录量筒刻度,计算样品的堆积密度;于涡流振荡器上保持1min,以获得恒定体积的样品。根据圆筒上的刻度计算样品的振实密度。密度值为粉末的质量与筒体所占体积之比^[13]。按式(1)计算压缩度。

$$C = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C ——压缩度,%;

ρ_t ——振实密度,g/mL;

ρ_b ——堆积密度,g/mL。

1.2.5 休止角测定 参照王大为等^[14]的方法,按式(2)计算休止角。

$$\tan \theta = \frac{H}{R}, \quad (2)$$

式中:

θ ——休止角,°;

H ——圆锥高度,cm;

R ——圆锥半径,cm。

1.2.6 水合特性测定 参照Zhang等^[15]的方法并修改。称取0.5g样品,加入20mL去离子水,充分摇匀,于50、90℃水浴30min,每隔10min摇匀搅拌一次。4000r/min离心15min,取出上清液,105℃烘干至恒重,按式(3)~式(5)分别测定持水力、水溶性和溶胀性。

$$A = \frac{m_2}{m}, \quad (3)$$

式中:

A ——持水力,g/g;

m_2 ——离心管中膨胀叶粉质量,g;

m ——样品干重,g。

$$B = \frac{m_1}{m} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

B ——水溶性,%;

m_1 ——上清干重,g;

m ——样品干重,g。

$$C = \frac{m_2}{m(1-B)}, \quad (5)$$

式中:

C ——溶胀性,g/g;

m_2 ——离心管中膨胀叶粉质量,g;

m ——样品干重,g。

1.2.7 傅里叶红外图谱测定 将苦荞叶粉样品和溴化钾研磨混匀,分别置于60、120℃烘干备用。精确称取2mg

样品和 200 mg KBr, 压片后使用傅里叶红外光谱进行测试。扫描范围 $4\ 000\sim 400\text{ cm}^{-1}$, 分辨率 4 cm^{-1} , 扫描次数 32。利用 Peakfit 软件进行数据处理^[16]。

1.2.8 数据处理 采用 SPSS 17.0 进行数据统计分析, 差异性分析采用 Duncan's 多重检验, $P<0.05$ 判断为显著差异, 结果以“平均值 $\pm$ 标准偏差”表示。采用 Origin 等软件作图。

2 结果与分析

2.1 对苦荞叶粉基本成分的影响

由表 1 可知, 磨粉方式对苦荞叶粉的基本成分影响显著 ($P<0.05$)。五谷杂粮磨粉碎叶粉灰分含量最多, 其次

为石磨粉碎、超微粉碎和钢磨粉碎制备的。超微粉碎叶粉蛋白含量略高于其他 3 种磨粉方式, 与五谷杂粮磨粉碎的无显著差异。同时, 可溶膳食纤维含量在超微粉碎时显著高于其他磨粉方式, 依次为超微粉碎叶粉>五谷杂粮磨粉碎叶粉>石磨粉碎叶粉>钢磨粉碎叶粉; 不溶膳食纤维含量则与之相反; 总膳食纤维在同一水平上为可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维的总和, 即可认为超微粉碎时有一定量的不溶性膳食纤维向可溶性膳食纤维转化。超微粉碎时较大的机械力会导致木质素部分降解^[17], 使得苦荞叶粉中不溶性膳食纤维含量降低, 降解木质素转化为可溶性膳食纤维, 因此可溶性膳食纤维含量较高。

表 1 不同磨粉方式下苦荞叶粉的基本成分[†]

Table 1 Basic components of tartary buckwheat leaf powder by different milling methods

磨粉方式	灰分/%	蛋白质/%	可溶膳食纤维/%	不溶膳食纤维/%	芦丁/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	槲皮素/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	GABA/ ($10^{-2}\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	叶绿素/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
石磨粉碎	11.37 ± 0.03^b	23.00 ± 0.27^{bc}	6.06 ± 0.03^c	22.44 ± 0.07^b	43.10 ± 0.57^c	0.11 ± 0.00^b	112.00 ± 0.87^{bc}	4.54 ± 0.00^{bc}
超微粉碎	11.05 ± 0.01^c	24.11 ± 0.31^a	6.95 ± 0.07^a	21.58 ± 0.10^d	48.53 ± 0.59^a	0.16 ± 0.00^a	119.00 ± 1.17^a	5.40 ± 0.09^a
钢磨粉碎	10.60 ± 0.05^d	22.37 ± 0.24^c	5.39 ± 0.09^d	22.84 ± 0.04^a	44.89 ± 0.67^b	0.11 ± 0.00^b	107.00 ± 3.09^b	4.69 ± 0.00^b
五谷杂粮磨粉碎	11.79 ± 0.04^a	23.53 ± 0.25^{ab}	6.29 ± 0.02^b	22.17 ± 0.02^c	43.33 ± 0.51^{bc}	0.12 ± 0.00^b	114.00 ± 0.18^b	4.43 ± 0.09^c

[†] 字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

功能性成分 GABA 在超微粉碎时含量最高, 钢磨粉碎时最低; 而芦丁和槲皮素在超微粉碎时含量高, 石磨粉碎时最低; 叶绿素含量在超微粉碎时显著高于其他 3 种磨粉方式。说明超微粉碎方式对芦丁、槲皮素、GABA 和叶绿素等功能因子的保持较好, 含量较高, 可能是由于超微粉碎的高剪切与摩擦作用有助于将物质磨碎成更小的颗粒, 苦荞叶的细胞壁被破坏, 细胞内功能成分更易溶出。此外, 超微粉碎可以改变和细化样品中蛋白质和纤维结构, 促进活性成分的释放, 使得苦荞叶粉中活性成分含量增加^[18]。

2.2 对苦荞叶粉粒度分布及比表面积的影响

粉体粒径被认为是影响谷物粉品质的一个重要因素, 一定程度上可以反映出谷物研磨时所受到的机械强度大小^[19]。由图 1 和表 2 可知, D_{50} 由大到小为五谷杂粮磨粉碎叶粉>钢磨粉碎叶粉>超微粉碎叶粉>电动石磨粉碎叶粉。其中, 五谷杂粮磨制备的叶粉的粒径 (D_{50}) 为其他 3 种磨粉方式的 3~5 倍。五谷杂粮磨粉碎叶粉的颗粒明显区别于其他 3 种, 其颗粒偏大, 存在一些可见的纤维结构, 说明此方式对苦荞叶内部结构的损伤小, 与破碎率远远低于其他方式的结果一致。其通过内设的齿轮之间碰撞产生的摩擦力进行粉碎, 在 4 种磨粉方式中机械力相对较小, 研磨得不够充分, 导致苦荞叶粉粒径较大。石磨粉碎叶粉呈现出最小的粒径 [D_{50} 为 $(2.59\pm 0.05)\text{ }\mu\text{m}$], 且细胞破碎率最高, 可能与此方式的磨粉作用时间长于其

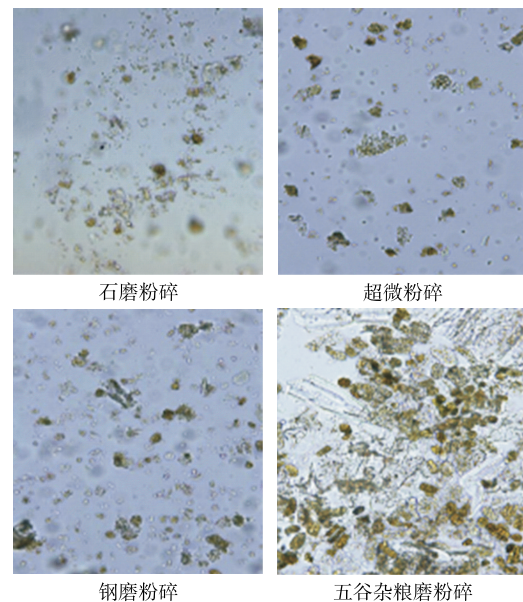


图 1 不同磨粉方式下苦荞叶粉的光学显微镜

Figure 1 Optical microscope of tartary buckwheat leaf powder under different grinding methods ($\times 20$)

他 3 种方式有关, 也与石磨自身较重且各部位受力均匀有关, 研磨时面积大、时间长、受力均匀共同作用致使苦荞叶粉的粒径较小。4 种磨粉方式的叶粉颗粒越细, 对应的

比表面积越大。郭慧珍等^[20]研究发现,超微青稞粉粒径小于石磨青稞粉,与试验结果相反,可能是因为物料不同。Zhao 等^[21]认为比表面积的增加可能暴露出活性基团,可以显著改善样品的口感,使其不再具有粗糙的颗粒感。

表 2 不同磨粉方式下苦荞叶粉粒度及比表面积[†]
Table 2 Particle size and specific surface area of tartary buckwheat leaf powder by different grinding methods

磨粉方式	D ₅₀ /μm	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	细胞破 碎率/%
石磨粉碎	2.59±0.05 ^d	1 057.7	386.8
超微粉碎	3.27±0.03 ^c	868.9	305.7
钢磨粉碎	4.37±0.02 ^b	683.8	296.7
五谷杂粮磨粉碎	13.65±0.06 ^a	496.2	73.6

† 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

由图 2 可知,粉末颗粒是各种粒径的集合,每种磨粉方式均为双峰,即大致存在两种粒径分布;最大粒径的五谷杂粮磨粉碎叶粉小粒径和大粒径分布相差较小;D₅₀越小,小粒径叶粉分布越多;在大粒径分布区域,超微粉碎叶粉的分布最高峰所在粒径位置明显小于其他 3 种。

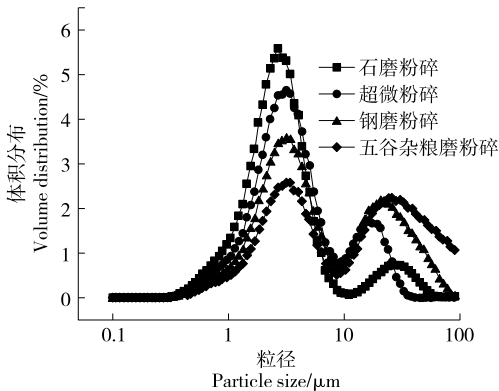


图 2 不同磨粉方式下苦荞叶粉的粒径分布曲线
Figure 2 Particle size distribution curve of tartary buckwheat leaf powder under different milling methods

2.3 对苦荞叶粉色度及叶绿素含量的影响

颜色是食品粉末的重要品质^[22]。由表 3 可知,超微粉碎叶粉的 L 值最高,即亮度最亮;石磨粉碎叶粉的 a 值最低,即色泽最绿,但此时的叶绿素含量并不是最高(表 1),说明叶绿素的绿色并不是 a 值(绿色)的唯一来源,而是多种因素的综合结果,也可能是叶粉颗粒表面积不同,以及暴露的纤维素和半纤维素的内部结构不一的结果,从而影响了粉末的颜色^[22-23]。

表 3 不同磨粉方式下苦荞叶粉的色度及叶绿素含量[†]

Table 3 Chromaticity and chlorophyll content of tartary buckwheat leaf powder by different milling methods

磨粉方式	L	a	b
石磨粉碎	60.40±0.39 ^b	-3.10±0.21 ^d	27.32±0.17 ^b
超微粉碎	61.54±0.19 ^a	-2.22±0.12 ^c	31.66±0.29 ^a
钢磨粉碎	58.04±0.47 ^c	-1.62±0.23 ^b	27.00±0.23 ^c
五谷杂粮磨粉碎	53.68±0.25 ^d	0.18±0.13 ^a	25.18±0.07 ^d

† 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.4 对苦荞叶粉密度和休止角的影响

粉体填充性主要由堆积密度和振实密度反映,堆积密度和振实密度越大,粉体填充性越好^[24]。由表 4 可知,超微粉碎叶粉的堆积密度和振实密度均显著低于其他叶粉的($P<0.05$),说明超微苦荞叶粉填充性较差,与赵萌萌等^[25]的研究结果一致。

表 4 不同磨粉方式苦荞叶粉的密度和休止角[†]

Table 4 Density and angle of repose of tartary buckwheat leaf powder with different milling methods

磨粉方式	堆积密度/ (g·mL ⁻¹)	振实密度/ (g·mL ⁻¹)	压缩 度/%	休止角/(°)
石磨粉碎	0.46±0.01 ^b	0.62±0.00 ^b	25.46	1.10±0.01 ^{ab}
超微粉碎	0.35±0.00 ^c	0.44±0.00 ^d	19.45	1.13±0.03 ^a
钢磨粉碎	0.52±0.01 ^a	0.66±0.01 ^a	20.26	0.99±0.01 ^b
五谷杂粮磨粉碎	0.50±0.01 ^a	0.56±0.00 ^c	10.26	0.75±0.01 ^c

† 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

不同磨粉方式下苦荞叶粉的堆积密度小于振实密度,说明粉体颗粒内部有较大的孔隙,当未振实的样品振实后,内部颗粒空间排布发生不同程度的改变。其中五谷杂粮磨粉碎叶粉的堆积密度值和振实密度值比较接近,压缩度也最低,颗粒空间排布变化不明显,颗粒间的摩擦较小,流动性好。同时,五谷杂粮磨叶粉的休止角显著低于其他叶粉的,说明其流动性最好。此外,将 4 种叶粉的粒径 D₅₀与粉体压缩度进行相关性分析,其皮尔逊相关系数 $r=-0.940$, $P=0.06$,说明苦荞叶粉的粒径大小和粉体的压缩性能、颗粒摩擦性能和流动性无关。

2.5 对苦荞叶粉水合特性的影响

由表 5 可知,五谷杂粮磨粉碎叶粉的持水力在常温和高温条件下均显著高于其他 3 种磨粉方式。研究^[21,26]表明,颗粒尺寸减小能够增加样品的表面积,提高与水的接触面积,而超微粉碎会改变纤维物质的空间结构,增加孔隙,容易与水结合。但试验结果与其相反,可能是因为超微粉碎过程中苦荞叶中不溶性膳食纤维的多糖链被破坏,维持多糖链的氢键减少,水合能力降低,与 Zhu 等^[17]的

研究结果一致。水溶性则与持水力呈相反的结果,五谷杂粮磨粉碎叶粉水溶性低于其他3种磨粉方式,是由于五谷杂粮磨制备的苦荞叶粉的粒度较大,比表面积小,与溶剂的接触面积相对较小,导致水溶性组分不能完全溶解^[27]。不同磨粉方式制备的苦荞叶粉的溶胀性之间差异

显著($P<0.05$),常温时,随着苦荞叶粉粒径的减小,溶胀性降低,可能是粉碎过程中苦荞叶粉的长纤维链被破坏断裂成短纤维链,而短的纤维链可能发生堆叠,从而无法形成大的膨胀空间^[28]。

表5 不同磨粉方式苦荞叶粉的水合特性[†]

Table 5 Hydration characteristics of tartary buckwheat leaf powder with different milling methods

磨粉方式	持水力/($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)		水溶性/%		溶胀性/($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	
	25 °C	100 °C	25 °C	100 °C	25 °C	100 °C
石磨粉碎	5.28 ± 0.01^b	6.81 ± 0.05^b	20.42 ± 0.05^a	30.95 ± 0.24^b	3.25 ± 0.00^d	3.06 ± 0.00^c
超微粉碎	4.45 ± 0.05^c	4.78 ± 0.00^c	19.82 ± 0.04^c	29.37 ± 0.14^c	3.43 ± 0.00^c	3.12 ± 0.00^d
钢磨粉碎	4.24 ± 0.26^c	4.86 ± 0.29^c	20.10 ± 0.03^b	32.27 ± 0.20^a	4.08 ± 0.00^b	4.64 ± 0.00^b
五谷杂粮磨粉碎	6.65 ± 0.07^a	9.87 ± 0.65^a	18.06 ± 0.08^d	24.43 ± 0.20^d	5.23 ± 0.00^a	7.15 ± 0.00^a

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.6 苦荞叶粉红外图谱分析

由图3可知,不同磨粉方式制备的苦荞叶粉的红外谱图峰型大致相似。3 000~3 600 cm^{-1} 处的宽峰是天然纤维素多糖和多酚结构中O—H的拉伸振动峰^[29],2 800, 3 000 cm^{-1} 处的吸收峰为半纤维素多糖中—CH₂或—CH₃

上C—H的拉伸振动^[30],在1 500~1 650 cm^{-1} 处的吸收峰归属于C=O的伸缩振动和N—H的弯曲振动,属于酰胺的特征吸收^[31-32],1 000~1 200 cm^{-1} 处为碳水化合物C—O的收缩振动,1 156 cm^{-1} 处的峰值是由半纤维素和纤维素C—O—C的拉伸振动引起的;1 022 cm^{-1} 处的宽

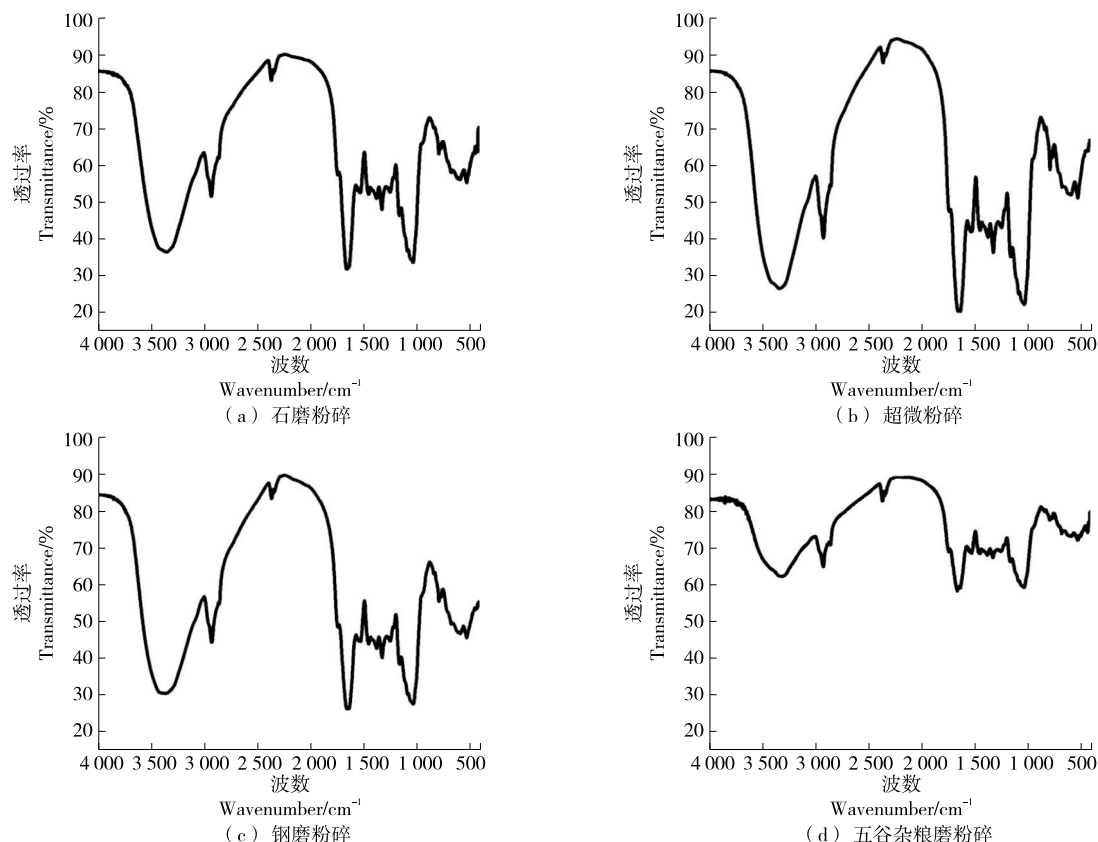


图3 不同磨粉方式下苦荞叶粉的红外谱图

Figure 3 Infrared spectra of tartary buckwheat leaf powder with different milling methods

吸收峰是半纤维素糖环中 C—O—C 的特征吸收峰^[33]。这些峰共同呈现蛋白质、纤维素、半纤维素以及酚类化合物等物质的表征,说明 4 种磨粉方式未破坏苦荞叶粉中成分的表征结构。但五谷杂粮苦荞叶粉中蛋白质、纤维素、半纤维素以及酚类化合物等物质共有特征峰的强度明显低于其他 3 种磨粉方式,可能与此方式细胞破碎率最低导致相关官能团暴露较少有关(表 2)。而其他 3 种磨粉方式中,超微粉碎后苦荞叶粉的整体峰强度略高于其他两种磨粉方式叶粉,与超微粉碎下叶粉的蛋白和功能因子含量高、保持好的结果一致。

3 结论

研究分析了电动石磨、超微粉碎、钢磨粉碎以及五谷杂粮磨粉 4 种磨粉方式对苦荞叶粉的营养功能成分、粒径分布、粉体特性、水合特性等理化特性的影响。结果表明,超微粉碎叶粉的蛋白质含量较高,可溶性膳食纤维含量最高,且制备过程中部分不可溶膳食纤维向可溶性膳食纤维转化,GABA、芦丁、槲皮素和叶绿素功能性成分保持最好。超微粉碎的苦荞叶粉可通过与其他成分混合制成面制品或乳制品等,既可以提高产品的营养价值还可以增加苦荞叶在食品中的应用。电动石磨粉碎叶粉的粒径 D_{50} 最小,更容易溶解和稳定,使其更均匀地分散至饮料中,因此可以提高饮料的质量和口感。而五谷杂粮磨粉碎叶粉的粒径 D_{50} 最大,且流动性最大,流动性好的粉末可以被用作剂粉,有助于制作均匀的面糊或面团,也被用作饮料、保健品和其他易于食用的配方中。五谷杂粮磨粉碎叶粉的持水力和溶胀性均显著高于其他 3 种磨粉方式的,水溶性结果与之相反,而高溶胀性的粉体在接触到水或其他液体时会迅速膨胀。综上,不同磨粉方式对苦荞叶粉理化特性存在影响,可根据终端用途来选择磨粉方式。后续可探究不同磨粉方式对苦荞叶粉在产品加工过程中产生的影响。

参考文献

- [1] HUDA M N, LU S, JAHAN T, et al. Treasure from garden: bioactive compounds of buckwheat[J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127653.
- [2] LI H, LU Q, LIU A, et al. Comparative metabolomics study of Tartary (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn) and common (*Fagopyrum esculentum* Moench) buckwheat seeds[J]. Food Chemistry, 2021, 371: 131125.
- [3] KRZYSZTOF D, DANUTA G, ARTUR S, et al. The content of dietary fibre and polyphenols in morphological parts of buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) [J]. Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands), 2018, 73(1): 82-88.
- [4] TUAN P A, THWE A A, KIM J K, et al. Molecular characterisation and the light-dark regulation of carotenoid

- biosynthesis in sprouts of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn) [J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3 803-3 812.
- [5] CHENG F, GE X, GAO C, et al. The distribution of *D*-chiro-inositol in buckwheat and its antioxidative effect in HepG2[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 89: 102808.
- [6] 冯瑜霞,程哲,李云龙.苦荞叶营养价值分析及其应用的研究现状[J].食品研究与开发,2023,44(20):207-211.
FENG Y X, CHENG Z, LI Y L. Research status of nutritional value analysis and application of tartary buckwheat leaves[J]. Food Research and Development, 2023, 44(20): 207-211.
- [7] 郝林,丁俐,杨武德,等.半发酵结合果胶酶制备苦荞叶茶的方法:CN104585424B[P].2017-11-28.
HAO L, DING L, YANG W D, et al. The method of preparing tartary buckwheat leaf tea by semi-fermentation combined with pectinase: CN104585424B[P]. 2017-11-28.
- [8] 胡新中,张敏,李小平,等.一种苦荞叶凉茶及制备方法:CN104719567A[P].2015-06-24.
HU X Z, ZHANG M, LI X P, et al. A kind of tartary buckwheat leaf herbal tea and its preparation method: CN104719567A[P]. 2015-06-24.
- [9] 张玉珊,赵海禄,王志辉,等.一种保健苦荞叶茶的制备方法:CN105010682B[P].2018-07-13.
ZHANG Y S, ZHAO H L, WANG Z H, et al. A preparation method of health buckwheat leaf tea: CN105010682B[P]. 2018-07-13.
- [10] 马挺军,王珊,夏辅尉.一种苦荞叶复合袋泡茶及其制备方法:CN107801814A[P].2018-03-16.
MA T J, WANG S, XIA F W. A kind of tartary buckwheat leaf compound bag tea and its preparation method: CN107801814 A[P]. 2018-03-16.
- [11] 闫美姣,李云龙,李红梅,等.真空挤压对杂粮面条品质与功能的影响[J].食品与机械,2020,36(5):187-193.
YAN M J, LI Y L, LI H M, et al. Effects of vacuum extrusion on the quality and function of coarse grain noodles [J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 187-193.
- [12] ZHAO X, YANG Z, GAI G, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 217-222.
- [13] BAI Y, LI Y. Preparation and characterization of crosslinked porous cellulose beads[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64 (3): 402-407.
- [14] 王大为,吴丽娟,孙丽琴.玉米膳食纤维的粉体特性[J].食品科学,2011,32(17):65-68.
WANG D W, WU L J, SUN L Q. Powder properties of corn dietary fiber[J]. Food Science, 2011, 32(17): 65-68.
- [15] ZHANG Y, ZHANG M, GUO X, et al. Improving the adsorption characteristics and antioxidant activity of oat bran by superfine grinding[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11 (1): 216-227.

- [16] CHEN S, NI Z, THAKUR K, et al. Effect of grape seed power on the structural and physicochemical properties of wheat gluten in noodle preparation system[J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129500.
- [17] ZHU F, DU B, XU B. 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.
- [18] TAO B, YE F, LI H, et al. Phenolic profile and in vitro antioxidant capacity of insoluble dietary fiber powders from citrus (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka) pomace as affected by ultrafine grinding[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(29): 7166-7173.
- [19] 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 W X, LI Y H, CHEN Y, et al. Comparison of nutritional and processing characteristics of wheat flour with different particle sizes[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(9): 172-180.
- [20] 郭慧珍, 党斌, 张杰, 等. 不同磨粉方式对青稞粉品质特性的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(5): 988-997.
- GUO H Z, DANG B, ZHANG J, et al. Effects of different milling methods on the quality characteristics of highland barley flour[J]. Acta Agriculturae Nuclear, 2022, 36(5): 988-997.
- [21] ZHAO X, DU F, ZHU Q, et al. Effect of superfine pulverization on properties of *Astragalus membranaceus* powder[J]. Powder Technology, 2010, 203(3): 620-625.
- [22] HUANG X, DOU J, LI D, et al. Effects of superfine grinding on properties of sugar beet pulp powders[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 87: 203-209.
- [23] HU J, CHEN Y, NI D. Effect of superfine grinding on quality and antioxidant property of fine green tea powders[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 45(1): 8-12.
- [24] 易甜, 崔文文, 王明锐, 等. 锦橙皮渣膳食纤维微粉化及其功能特性分析[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 8-14.
- YI T, CUI W W, WANG M R, et al. Micronization and functional properties of dietary fiber from Jincheng orange peel residue[J]. Food Science, 2019, 40(10): 8-14.
- [25] 赵萌萌, 党斌, 张文刚, 等. 超微粉碎对青稞麸皮粉微观结构及功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 278-286.
- ZHAO M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Effects of ultrafine grinding on microstructure and functional properties of highland barley bran powder[J]. ACTA Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 278-286.
- [26] ZHONG C, ZU Y, ZHAO X, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of pomegranate peel[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(1): 212-221.
- [27] HUANG X, LIANG K, LIU Q, et al. Superfine grinding affects physicochemical, thermal and structural properties of *Moringa oleifera* leaf powders[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 151: 112472.
- [28] 洪杰, 张绍英. 湿法超微粉碎对大豆膳食纤维微粒结构及物性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(3): 90-94.
- HONG J, ZHANG S Y. Effect of wet ultrafine grinding on the structure and physical properties of soybean dietary cellulose particles[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(3): 90-94.
- [29] ZHAO X, LIU H, ZHANG X, et al. Effect of pressure grinding technology on the physicochemical and antioxidant properties of Tremella aurantialba powder[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(12): 13833.
- [30] REDDY D H K, HARINATH Y, SESHIAH K, et al. Biosorption of Pb(II) from aqueous solutions using chemically modified *Moringa oleifera* tree leaves[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 162(2): 626-634.
- [31] STANI C, VACCARI L, MITRI E, et al. FTIR investigation of the secondary structure of type I collagen: new insight into the amide III band[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 229: 118006.
- [32] ZHAO X, ZHU H, CHEN J, et al. FTIR, XRD and SEM analysis of ginger powders with different size[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 2017-2026.
- [33] ZHAO X, MENG A, ZHANG X, et al. Effects of ultrafine grinding on physicochemical, functional and surface properties of ginger stem powders[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(15): 5558-5568.