

西藏光核桃超微粉粉体特性及活性成分研究

左力旭^{1,2}, 吕健¹, 毕金峰¹, 陈芹芹¹, 金鑫¹, 李旋¹

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

(2. 天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457)

摘要: 为探究超微粉碎技术对西藏光核桃粉体特性及活性成分的影响, 本研究以西藏光核桃为试材, 真空冷冻干燥后, 粗粉碎 3 min 再超微粉碎 5、10、15 min, 对比分析粉体粒径、微观结构、流动性、吸湿性等粉体特性, 多酚、多糖、水溶性果胶 (WSP) 等活性成分及其抗氧化活力。结果表明: 随超微粉碎时间延长, 光核桃粉粒径变小, 离散度由 6.58 ± 0.54 减小到 2.86 ± 0.09 , 粉体均匀性提高。随超微粉碎时间延长, 光核桃粉容密度增大, 压缩性减小, 基本流动能增加。水合特性随超微粉碎时间延长逐渐增强, 相对湿度小于 50% 时吸湿性无显著变化。光核桃经超微粉碎, 多酚、多糖的抗氧化活力无显著变化; WSP 含量显著降低, 但抗氧化活力显著提高 ($p < 0.05$)。综合分析发现, 超微粉碎技术可以制备品质优良的光核桃粉, 较好地保留其主要活性成分及抗氧化活力, 为光核桃深加工提供新途径。

关键词: 西藏光核桃; 超微粉碎; 粉体特性; 活性成分; 抗氧化活力

文章编号: 1673-9078(2019)04-182-189

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.4.025

Research on Powder Characteristics and Active Components of *Prunus mira* Koehne Powder Prepared by Superfine Grinding Technology

ZUO Li-xu^{1,2}, LYU Jian¹, BI Jin-feng¹, CHEN Qin-qin¹, JIN Xin¹, LI Xuan¹

(1. Institute of Food Science and Technology, CAAS, Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

(2. College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: To investigate the effect of superfine grinding on powder characteristics and active components of *Prunus mira* Koehne, freeze-drying combined with coarse grinding (3 min) and superfine grinding (5, 10 and 15 min, respectively) were employed to prepare the powder of *Prunus mira* Koehne. The powder characteristics (including particle size, microstructure, flowability and hygroscopicity) and the contents and antioxidant capacity of active components (including polyphenol, polysaccharide and water soluble pectin) of *Prunus mira* Koehne powder were determined. Results showed that with increasing superfine grinding time, the particle size of *Prunus mira* Koehne powder became smaller than coarse powder, and the size distribution span decreased from 6.58 ± 0.54 to 2.86 ± 0.09 . A significant decline in the compressibility was observed, while both bulk density and basic fluidity energy increased. Superfine grinding technology could improve hydration characteristics of the powder. When relative humidity was less than 50%, the powder hygroscopicity had no significant change. The antioxidant activity of polyphenol and polysaccharide extracted from *Prunus mira* Koehne powder prepared by superfine grinding technology show no significant difference. Content of water soluble pectin extracted from *Prunus mira* Koehne powder was decreased, however, its antioxidant activity was significantly increased ($p < 0.05$). Therefore, the superfine grinding technology could be a deep processing method to improve the quality of *Prunus mira* Koehne powder and preserve its active components.

Key words: *Prunus mira* Koehne; superfine grinding; powder characteristics; active components; antioxidant activity

西藏光核桃 (*Prunus mira* Koehne) 属蔷薇科桃属落叶乔木, 是西藏地区分布较广的野生果树之一。果

收稿日期: 2018-12-24

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-30-5-02)

作者简介: 左力旭 (1991-), 女, 硕士, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程

通讯作者: 毕金峰 (1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬食品制造与营养科学

实近球形, 表皮覆盖绒毛, 成熟时果皮呈黄绿色, 因果核表面光滑, 又称之为“光核桃”^[1,2]。光核桃富含矿物质、维生素、纤维素和有机酸等物质^[1], 但多酚、多糖、水溶性果胶等活性成分含量及其抗氧化活力尚不清楚。受交通、信息和地域等因素的限制, 光核桃资源浪费严重, 仅有少部分用于鲜食, 产业化程度极低。目前关于光核桃的研究主要集中在果酒^[2]、凉果^[3]、

果脯和果汁^[4]等方面,关于果粉的研究鲜有报道。

将新鲜果蔬干燥,加工成果蔬粉,是近几年果蔬加工的一大趋势^[5]。果蔬粉水分含量低,能有效抑制微生物繁殖,降低氧化酶活性,延长货架期^[6]。果蔬粉产品体积小,重量轻,便于包装,利于运输,可突破地域限制^[7]。目前,果蔬粉作为一种耐贮性、便捷性、可调性的高附加值产品,几乎可应用到食品加工的各个领域。

超微粉碎是利用机械力或流体动力将物料颗粒粉碎至微米级甚至纳米级的加工技术^[8]。相比较常规粉碎,超微粉碎能有效改善果蔬粉的均一性、流动性、持水性、持油性等粉体特性^[9],最大限度保留果蔬粉的营养物质及活性成分,促进高品质产品的研发及生产^[10]。光核桃富含多酚、黄酮、果胶、多糖等活性成分,以及糖类、膳食纤维、矿物质、维生素等营养物质,因此,采用超微粉碎技术制备光核桃粉极具应用前景。

果蔬粉物化特性将会影响其加工及食用品质,其中粉体流动性、吸湿性是影响粉体加工和产品货架期的重要指标。相比较休止角^[11]、卡尔指数^[12]等静态表征方法,FT4 粉质分析仪能够动态计算粉体流动过程中所需的流动能,从而更精确、可靠地表征粉体流动性。相比较固定相对湿度的静态吸附法^[13],DVS 水分动态吸附仪可以动态监测粉体在相对湿度持续变化过程中的重量,精确绘制粉体吸附曲线,客观反映粉体吸湿性和解吸性。多酚、多糖、果胶等生物活性物质在加工过程中极易被破坏,通过测定其含量及活性变化,既能衡量加工技术对营养物质的破坏程度又能评价产品品质。

本研究旨在运用超微粉碎技术制备光核桃超微粉,通过 FT4 粉质分析和 DVS 动态吸附技术检测光核桃粉的流动性、压缩性、吸湿性等粉体特性,采用 DPPH 自由基清除能力评价光核桃粉中活性成分的抗氧化活力,从而系统探讨超微粉碎技术对光核桃粉粉体特性及主要活性成分的影响,以期对光核桃的精深加工提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

光核桃采自西藏林芝地区,冷链空运至北京国际机场,运回实验室立即贮藏于 4℃ 冷库。

1.1.2 主要试剂

无水碳酸钠、氢氧化钠、亚硝酸钠、九水合硝酸

铝、无水乙醇、浓硫酸、甲醇、盐酸、过硫酸钾、三氯化铁等均为分析纯试剂,购自国药集团化试剂有限公司;溴化钾为光谱级,购自 Pike Technologies Inc 公司;福林酚、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ)等分析纯试剂及奎诺二甲基丙烯酸酯(Trolox)、没食子酸、芦丁、半乳糖醛酸等标品,购自 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

CPA-125 万分之一天平,德国 Sartorius 公司;Alpha1-4Lplus 真空冷冻干燥机,德国 CHRIST 公司;JYL-C51V 料理机,中国 Joyoung 股份有限公司;KCW-10 超微粉碎振动磨,北京银捷玉诚机械设备有限公司;S3500 激光粒度分析仪,美国 Microtrac 公司;S-570 扫描电子显微镜,日本 Hitachi 公司;CM-700D1 手持分光测色仪,日本 KONICA MINOLTA 公司;FT4 粉质分析仪,英国 Freeman Technology 公司;DVS-Intrinsic 水分动态吸附仪,美国 SMS 公司;TENSOR27 傅里叶红外仪,德国 Bruker 公司;5804R 型离心机,德国 Eppendorf 公司;UV1800 紫外-可见分光光度计,日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 果粉制备

预处理:新鲜光核桃→清洗→切分去核→80℃ 冰箱预冻 12 h→真空冷冻干燥约 48 h,水分含量低于 5.0%

粗粉碎(对照组):将冻干光核桃置于 JYL-C51V 料理机中粉碎 3 min,得到光核桃粗粉,密封,4℃ 冷藏保存。

超微粉碎:将上述粗粉置于超微粉碎振动磨中,在低温条件下(10~15℃)分别粉碎 5、10、15 min,得到不同粒径的光核桃超微粉,密封,4℃ 冷藏保存。

1.3.2 粒径及离散度测定

采用激光粒度分析仪 Dry 模式测定光核桃果粉的粒径分布情况并计算粒径分布的离散度^[14]。

$$\text{离散度} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}}$$

式中: D_n 表示有 $n\%$ 的颗粒粒径小于该数值。

1.3.3 微观结构观察

将待测样品平铺于双面粘有导电胶的载物台上,喷金处理后,置于扫描电子显微镜下观察光核桃粉 400 倍和 5K 倍的微观结构。

1.3.4 色泽测定

手持分光测色仪经标准黑板、白板校正后,对置

于样品池中的样品进行色泽检测, 获得 L^* 、 a^* 和 b^* 值。

1.3.5 容积密度、压缩性和流动性测定

选用 FT4 粉质分析仪的 Compressibility 模式测定粉体容积密度和压缩性。设定螺旋搅拌角度 5° , 搅拌速度 40 mm/s, 压力参数 6 kPa, 施压时间 1 min。样品杯 (25 mm×25 mL) 固定在测定台上, 重量清零后, 加满样品, 搅拌桨将样品搅拌均匀, 剥离溢出样品杯的样品, 此时测定的 CBD (Conditioned Bulk Density) 值即为容积密度。然后将搅拌桨换成施压活塞, 测定的 CPS (Compressibility) 值即为压缩性。

粉体流动性选用 FT4 粉质仪 Flowability 模式进行测定: 设定螺旋搅拌角度 5° , 预处理搅拌速度 40 mm/s, 测定搅拌速度 10、40、70、100 mm/s。测定过程中改变搅拌速度, 每个速度测定 3 次后变速, BFE (Basic Flowability Energy) 值的平均值即为粉体基本流动能, 表示粉体流动时所需外界提供的能量。

1.3.6 吸湿性测定

粉体吸湿性通过 DVS 水分动态吸附仪进行测定^[15]。托盘重量清零后, 放入约 20 mg 样品, 设定氮气流速为 200 cm³/min、温度为 25 ℃。吸附过程设定相对湿度由 0%到 90%, 每个阶段增加 10%, 粉体吸湿性通过动态吸附曲线表示。

1.3.7 水合特性测定

持水力、水溶性和溶胀性的测定参照 Zhang^[16]的方法。

1.3.8 多酚、多糖、WSP 含量及抗氧化活力测定

多酚提取参照 Jeng^[17]的方法, 含量测定采用 Folin-Ciocalteu 法^[18], 以没食子酸为标准品绘制标准曲线, 多酚含量以每克干样品中所含没食子酸当量表示 (mg GAE/g d.b.)。

多糖提取参照 Li^[19]的方法, 粗多糖用 3500D 透析袋透析 72 h, 得多糖待测液。含量测定采用苯酚硫酸法^[20], 以葡萄糖作为标准品绘制标准曲线, 多糖含量以每克干样品中所含葡萄糖当量表示 (mg Glu/g

d.b.)。

WSP 的提取及含量测定参考 Christiaens^[21]的方法, 以半乳糖醛酸为标准品绘制标准曲线, 结果以每克醇不溶性物质中所含半乳糖醛酸当量表示 (mg GalA/g AIR)。

抗氧化活力的测定采用 DPPH 自由基清除能力法, 参考 Zhang^[22]的方法并稍作修改。将 2 mL 多酚、多糖、WSP 待测液或 Trolox 标准液 (0, 20, 40, 60, 80, 100 μmol/L) 与 4 mL 100 μmol/L DPPH 混匀, 暗处静置 30 min, 于 517 nm 处测定吸光值, 以 80%甲醇 (V/V) 作为空白。DPPH 自由基清除能力以每克干样品中所含 Trolox 当量表示 (μmol Trolox/g)。

1.3.9 傅里叶红外光谱测定

傅里叶红外光谱的测定参考 Athmaselvi^[23]的方法并稍作修改, 将样品与干燥 KBr (1:200, W/W) 置于玛瑙研钵中混合研磨, 压制成片后于扫描波长 4000~400 cm⁻¹、分辨率 2 cm⁻¹ 条件下进行扫描。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel、SPSS 20 对数据进行处理, Origin 8.5 进行作图。每组试验重复 3 次, 试验结果以平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 超微粉碎对光核桃粉粒径特性的影响

粒径大小 (D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90}) 和离散度是衡量超微粉碎效果的直接指标。在研究生物材料的活性时, 通常将超微粉粒径规定为 1 nm~100 μm^[24]。由表 1 可知, 相比较对照组, 光核桃粗粉经超微粉碎后, D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 和离散度显著降低 ($p<0.05$), 其中, D_{50} 均小于 25 μm, D_{90} 均小于 100 μm, 因此超微粉碎后的光核桃粉均达到超微粉级别。随超微粉碎时间延长, 光核桃粉 D_{90} 降低幅度高达 105.90 μm, D_{10} 和 D_{50} 降低幅相对较小 (分别为 3.19 μm 和 10.38 μm), 说明超微粉碎主要作用于光核桃粉中的大颗粒^[25]。

表 1 制粉时间对光核桃粉粒径的影响

Table 1 Effect of grinding time on particle size of *Prunus mira* Koehne powder

制粉时间/min	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	离散度
对照组	7.95±0.03 ^a	25.77±0.14 ^a	156.20±10.79 ^a	6.58±0.54 ^a
5	7.24±0.27 ^b	22.37±0.34 ^b	99.93±4.71 ^b	3.91±0.06 ^b
10	5.51±0.12 ^c	17.89±0.13 ^c	62.53±0.06 ^c	3.19±0.03 ^c
15	4.76±0.14 ^d	15.93±0.58 ^d	50.30±2.11 ^d	2.86±0.09 ^c

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($p<0.05$)。 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别表示 10%、50%、90%的粉体可以通过的粒径。

离散度表征粉体粒径的分布跨度，其数值越趋近于 0，说明粉体均一性越好^[26]。相比较对照组，超微粉碎能够显著降低光核桃粉的离散度 ($p<0.05$)，且随制粉时间延长，光核桃粉离散度呈下降趋势；超微粉碎 10 min 和 15 min 时，光核桃粉离散度无显著差异，表明随粉碎时间不断延长，粉体均一性变化趋于平稳。

2.2 超微粉碎对光核桃粉微观结构的影响

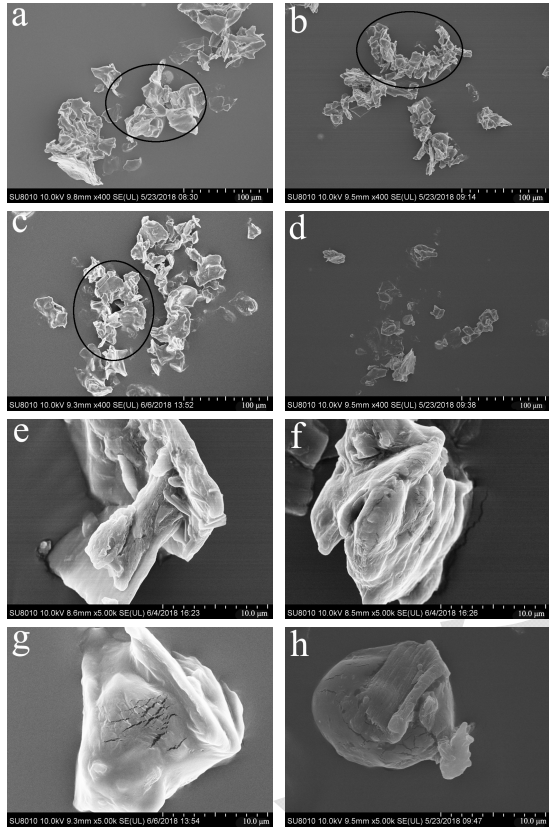


图 1 制粉时间对光核桃粉微观结构的影响

Fig.1 Effect of grinding time on microstructure of *Prunus mira* Koehne powder

注: a: 对照组, b~d: 分别为超微粉碎 5、10、15 min($\times 400$); e: 对照组, f~h: 分别为超微粉碎 5、10、15 min($\times 500$)。

在同等放大倍数条件下，对照组粉体的颗粒粒径较大、表面粗糙且形状不规则（图 1a、1e）。随超微粉碎时间延长，光核桃粉粒径逐渐变小（图 1a~d），粉体颗粒由片层状趋向球形（图 1e~h），表面变光滑。Ming 等人^[27]研究发现香菇粗粉经超微粉碎后，粒径变小，颗粒由不规则网状片层变为表面光滑的球形。Athmaselvi 等人^[23]发现冻干后的番石榴和山榄果经超微粉碎后，粉体颗粒同样由薄层片状变为球形。Jiang 等人^[28]研究表明青木叶粉也有相似结果，不规则的多边形大颗粒经超微粉碎后变成球形小颗粒。

光核桃粉对照组（图 1a）、超微粉碎 5 min（图 1b）和 10 min（图 1c），均出现了部分团聚现象；超微粉

碎 15 min（图 1d）时，团聚现象消失。这是因为片层状颗粒间作用面积大，范德华力、吸附作用以及静电作用力强，导致粉体聚集成团，产生团聚现象^[29]。在长时间强烈机械力作用下，粉体粒径变小，颗粒近球形，颗粒间接触面积变小，物理作用力减弱，团聚粉体得以分散（图 1d），团聚现象减弱甚至消失。

2.3 超微粉碎对光核桃粉色泽的影响

表 2 制粉时间对光核桃粉色泽的影响

Table 2 Effect of grinding time on color of *Prunus mira* Koehne powder

制粉时间/min	L^*	a^*	b^*
对照组	86.53±0.37 ^a	-1.75±0.07 ^b	14.20±0.35 ^b
5	84.32±0.17 ^b	-0.33±0.03 ^a	15.30±0.24 ^a
10	84.63±0.10 ^b	-0.32±0.01 ^a	15.13±0.08 ^a
15	84.79±0.08 ^b	-0.23±0.01 ^a	14.97±0.25 ^a

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

与对照组相比，光核桃粗粉经超微粉碎后，粉体亮度 (L^* 值) 降低，绿色 (a^* 值) 变浅，黄色 (b^* 值) 加深（表 2）。有研究发现^[30,31]，超微粉碎产生的剧烈机械力能促使粉体颗粒中纤维素、半纤维素等物质暴露，导致颗粒表面孔隙增多，粉体吸光性增强， L^* 值降低。此外，在超微粉碎过程中产生的局部热量导致粉体中叶绿素降解，光核桃粉 a^* 值升高；部分酚类物质暴露在空气中，发生氧化褐变，导致光核桃粉 b^* 值升高^[32]。

随超微粉碎时间延长，光核桃粉 L^* 值和 a^* 值呈上升趋势， b^* 值呈下降趋势，但未呈现显著性差异。分析原因可能是超微粉碎产生的压力和剪切力将粉体中片层状大颗粒逐渐变为球形小颗粒^[25]，颗粒间空隙减少^[33]，吸光性减弱，亮度升高，同时有效阻止新产生的小颗粒发生氧化褐变，粉体黄色变浅。长时间机械粉碎导致叶绿素降解加重，光核桃粉绿色不断变浅。随粉体大颗粒数目减少，粉体均一性提高，粉体色泽趋于稳定。

2.4 超微粉碎对光核桃粉容积密度和压缩性的影响

由图 2 可知，随超微粉碎时间的延长，光核桃粉容积密度显著增加，压缩性显著降低 ($p<0.05$)，填充性能增强^[24]。这是由于超微粉碎后，光核桃粉粒径变小、颗粒形状趋于规则、颗粒间空隙减小造成的^[34,35]。由此可见，超微粉碎技术制备的光核桃粉便于开发成胶囊、片剂等产品，延长产品链，提升商业价值。

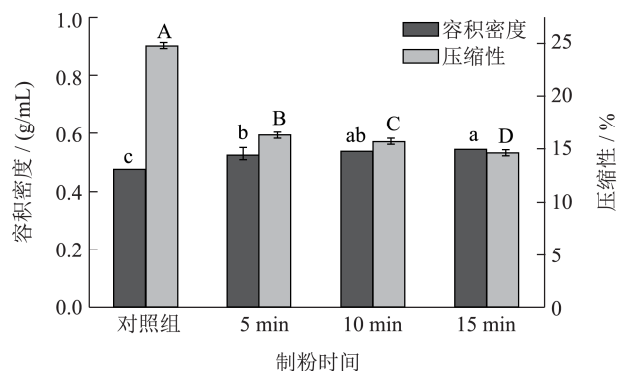


图2 制粉时间的光核桃粉的容积密度和压缩性

Fig.2 Effect of grinding time on bulk density and compressibility of *Prunus mira* Koehne powder

注：大、小写字母不同分别表示压缩性、容积密度差异显著 ($p < 0.05$)。

2.5 超微粉碎对光核桃粉流动性的影响

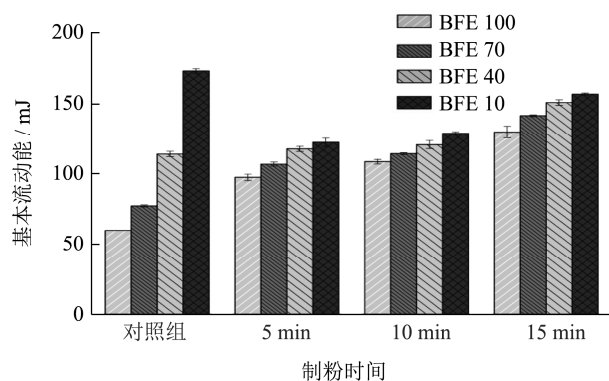


图3 制粉时间对光核桃粉流动性的影响

Fig.3 Effect of grinding time on flowability of *Prunus mira* Koehne powder

注：BFE10、40、70、100 分别表示不同的测试速度。

由图3可知，同一处理组，光核桃粉基本流动能随测试速度的增加而增加，即粉体流动速度越快，需要外界提供的能量越多。相同测试速度下，随制粉时间延长光核桃粉的基本流动能呈现增加趋势，即粉体流动时所需的能量增加，流动性变差。其原因可能是，超微粉碎降低了粉体压缩性(图2)，颗粒间空隙变小，导致颗粒表面摩擦力增加，粉体不易流动^[36]。粉体流

动性降低可能会影响加工过程，可以通过造粒等工艺进行改善。

2.6 超微粉碎对光核桃粉吸湿性的影响

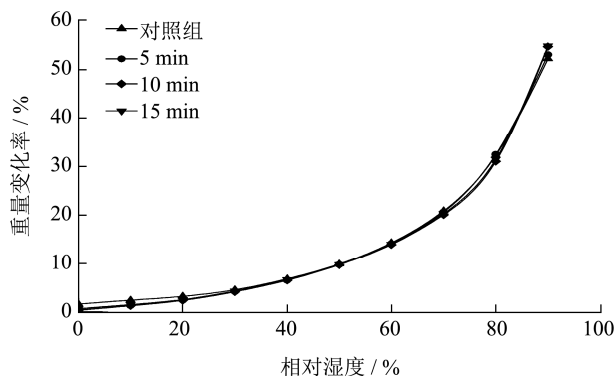


图4 制粉时间对光核桃粉吸湿性的影响

Fig.4 Effect of grinding time on hygroscopicity of *Prunus mira* Koehne powder

如图4所示，随超微粉碎时间的延长，光核桃粉的动态吸附曲线无显著变化。当相对湿度低于50%时，光核桃粉的重量变化低于10%，吸湿速度缓慢，超微粉碎对光核桃粉吸湿性的影响无显著差异；当相对湿度高于50%时，光核桃粉重量变化率急剧增加，这是因为超微粉碎产生的强烈机械力破坏了粉体中的纤维素、半纤维素、木质素等，极性基团暴露，粉体吸湿性增加^[37,38]。

2.7 超微粉碎对光核桃粉水合特性的影响

粉体水合特性(持水力、水溶性、溶胀性)是反映粉体食用品质的指标。如表3所示，随超微粉碎时间延长，光核桃粉的持水力、水溶性和溶胀性均显著增加 ($p < 0.05$)。粉体中长链纤维素和半纤维素在超微粉碎过程中断裂成短链纤维素和半纤维素，羟基等亲水基团暴露，与水分子结合后体积膨胀，束水能力增强^[39]。同时，粉体粒径变小，表面积增大，水合位点增多，界面活性提高，水溶性物质快速溶出，水溶性增强^[37]。粉体水合特性增强，水溶性成分溶出速度加快，食用品质随之提高。

表3 不同粉碎时间的光核桃冻干粉的水合特性

Table 3 Hydration properties of *Prunus mira* Koehne powder with different grinding time

粉碎时间/min	持水力/(g/g)	水溶性/%	溶胀性/(mL/g)
对照组	3.51±0.03 ^d	25.94±0.27 ^c	6.71±0.10 ^c
5	3.74±0.01 ^c	27.73±0.28 ^b	7.28±0.09 ^b
10	3.85±0.06 ^b	30.06±0.30 ^a	7.50±0.06 ^a
15	3.97±0.06 ^a	30.33±0.53 ^a	7.55±0.15 ^a

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

2.8 超微粉碎对光核桃粉活性成分含量及其抗氧化活力的影响

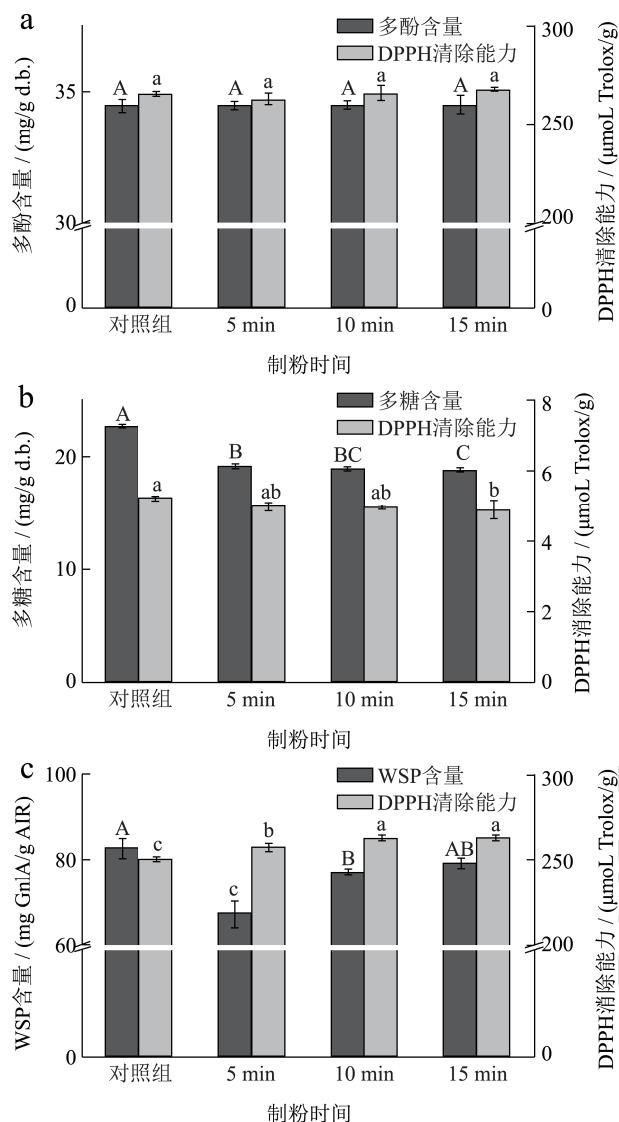


图5 不同制粉时间的光核桃粉的活性成分及其抗氧化活力
Fig.5 Functional components content and antioxidant capacity of *Prunus mira* Koehne powder with different grinding time

注: 相同组别内字母不同表示差异显著 ($p < 0.05$)。

如图5所示, 相比较对照组, 光核桃超微粉碎后, 其多酚含量无显著变化, 多糖和WSP含量显著降低; 多酚和多糖的抗氧化活力无显著变化, WSP抗氧化活力显著增加。随超微粉碎时间延长, WSP的抗氧化活力呈上升趋势(图5c), 其原因在于粉体水合特性提高, 粉体界面活性增加, 有效促进WSP快速溶出^[32]。

在超微粉碎过程中, 粉体粒径变小(表1), 比表面积增大, 水合作用加强(表3), 促进酚类物质溶出^[32]。多酚含有一个或多个-OH基团, 与DPPH·自由基反应时, -OH中的氢原子转移到DPPH·自由基上, 将

其还原生成DPPH-H^[40]。因此, 多酚具有一定的抗氧化活力, 量效关系明显。WSP属于多糖组分, 两者主要分布在植物细胞壁中, 超微粉碎对两者的影响类似。超微粉碎携带的强烈机械力打断了多糖和WSP主链的部分糖苷键, 降解生成寡糖或单糖, 使其检测含量降低^[22]; 同时, 部分糖链断裂, 分子量降低, 结构松散, 暴露出了更多的-OH等活性基团, 抗氧化活力提高^[41]。

2.9 光核桃粉的傅里叶红外光谱图

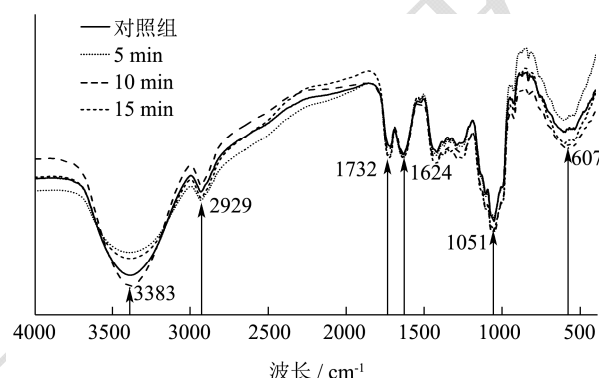


图6 不同制粉时间的光核桃粉的傅里叶红外光谱图

Fig.6 Fourier Transform Infrared Spectroscopy of *Prunus mira* Koehne powder with different grinding time

光核桃粉的傅里叶红外光谱如图6所示, 3300~3400 cm^{-1} 处的吸收峰是O-H伸缩振动峰, 来自纤维素或半纤维素^[23]; 2929 cm^{-1} 附近的吸收峰源于多糖亚甲基上C-H伸缩振动, 1732 cm^{-1} 附近为酯基中C=O伸缩振动^[42]; 1624 cm^{-1} 附近吸收峰为木质素芳香族化合物苯环上的C-H键^[43]; 1051 cm^{-1} 附近为木质素和纤维素中C-O伸缩振动^[44]; 607 cm^{-1} 处是卤代烃中C-Br伸缩振动峰^[23], 是由研磨压片过程中溴化钾与样品中某些物质发生取代反应形成的。相比较对照组, 光核桃粉经超微粉碎后, 其主要特征性吸收峰无显著差异, 表明超微粉碎对光核桃粉中的官能团无影响, 这与Zhao等人^[45]的研究结果一致。其中, 光核桃超微粉在3383 cm^{-1} 附近的吸收峰强度存在不同程度的增加, 这是超微粉碎产生的强力机械力将长链的纤维素、木质素、多糖等降解为短链物质, -OH暴露的结果^[23]。进一步证明超微粉碎可以提高光核桃粉的界面活性, 增强水合特性, 促进活性成分溶出, 提高其抗氧化活力。

3 结论

在超微粉碎过程中, 强烈机械力主要作用于大颗粒, 随超微粉碎时间的延长, 不规则大颗粒逐渐趋于球形小颗粒。随粉体粒径减小, 光核桃粉亮度降低, 绿色变浅, 黄色加深。超微粉碎光核桃粉粒径变小,

颗粒间空隙减小,随之容积密度增大、压缩性降低、流动性变差,同时,光核桃粉比表面积增大,颗粒界面活性升高,其吸湿性、水合特性增强。光核桃粗粉经超微粉碎,多酚、多糖和果胶等主要活性成分的含量及抗氧化活力均有不同程度的保留或提高。综上所述,超微粉碎技术不仅可以改善粉体特性,还能最大程度保留其主要活性成分及抗氧化活力。因此,超微粉碎技术可作为光核桃粉的精深加工技术,为开发光核桃粉系列产品提供技术与理论支持,提高光核桃资源利用率。

参考文献

- [1] 蔡长河,钟明,肖维强,等.西藏野桃果实的特性及综合加工利用研究[J].食品科学,2002,23(11):73-76
CAI Chang-he, ZHONG Ming, XIAO Wei-qiang, et al. Study on the characteristics and comprehensive processing and utilization of wild peach fruit in Tibet [J]. Food Science, 2002, 23(11): 73-76
- [2] 钟政昌,王婷,高根升,等.自然温度下光核桃果酒主发酵工艺优化[J].食品科学,2012,33(13):197-201
ZHONG Zheng-chang, WANG Ting, GAO Gen-sheng, et al. Optimization of fermentation process for *Prunus mira* Koehne wine at natural temperature by response surface methodology [J]. Food Science, 2012, 33(13): 197-201
- [3] 钟政昌,普琼.西藏野桃凉果加工技术研究[J].林业科技通讯,2001,12:35-36
ZHONG Zheng-chang, PU Qiong. Study on processing technology of preserved tibetan wild peach [J]. Forest Science and Technology, 2001, 12: 35-36
- [4] 蔡长河,钟明,黄炳雄,等.西藏野桃资源及其综合加工利用[J].广东农业科学,1997,6:25-26
CAI Chang-he, ZHONG Ming, HUANG Bing-xiong, et al. Resources of Tibet wild peach and their comprehensive processing and utilization [J]. Guangdong Agriculture Sciences, 1997, 6: 25-26
- [5] 毕金峰,陈芹芹,刘璇,等.国内外果蔬粉加工技术与产业现状及展望[J].中国食品学报,2013,13(3):8-14
BI Jin-feng, CHEN Qin-qin, LIU Xuan, et al. Research on techniques and industry situation and prospect for fruit-vegetable powder processing in domestic and abroad [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(3): 8-14
- [6] Karam M C, Petit J, Zimmer D, et al. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 188: 32-49
- [7] 史碧波,罗晓妙.果蔬粉的加工现状及应用[J].中国食品添加剂,2005,3:86-88,50
SHI Bi-bo, LUO Xiao-miao. Processing state and application of fruit-vegetable powder [J]. China Food Additives, 2005, 3: 86-88, 50
- [8] 向智男,宁正祥.超微粉碎技术及其在食品工业中的应用[J].食品研究与开发,2006,2:88-90,102
XIANG Zhi-nan, NING Zheng-xiang. Technology of superfine grinding and its application in food industry [J]. Food Research and Development, 2006, 2: 88-90, 102
- [9] 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
- [10] 关二旗,郭武汉,卞科.超微粉碎对小麦粉品质特性影响的研究[J].中国粮油学报,2015,30(11):26-30
GUAN Er-qi, GUO Wu-han, BIAN Chao. The effect of superfine grinding on the quality of wheat flour [J]. Journal of the Chinese Cereal and Oil Association, 2015, 30(11): 26-30
- [11] Lee S, Yoo S, Ganesan P, et al. Physicochemical and antioxidative properties of Korean nanopowdered white ginseng [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 48(10): 2159-2165
- [12] Muttakin S, Kim M S, Lee D U. Tailoring physicochemical and sensorial properties of defatted soybean flour using jet-milling technology [J]. Food Chemistry, 2015, 187: 106-111
- [13] Uscategui D C R, Velásquez H J C, Valencia J U S. Concentrates of sugarcane juice and whey protein: Study of a new powder product obtained by spray drying of their combinations [J]. Powder Technology, 2018, 333: 429-438
- [14] XIAO W, ZHANG Y, FAN C, et al. A Method for producing superfine black tea powder with enhanced infusion and dispersion property [J]. Food Chemistry, 2017, 214: 242-247
- [15] Samain S, Dupas-Langlet M, Leturia M, et al. Caking of sucrose: Elucidation of the drying kinetics according to the relative humidity by considering external and internal mass transfer [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 212: 298-308
- [16] ZHANG Z, SONG H, ZHEN P, 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
- [17] JENG T L, HO P T, SHIH Y J, et al. Comparisons of protein, lipid, phenolics, γ -oryzanol, vitamin e, and mineral contents in bran layer of sodium azide-induced red rice mutants [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2011, 91(8): 188

- 1459-1465
- [18] GUO X, SHA X, Rahman E, et al. Antioxidant capacity and amino acid profile of millet bran wine and the synergistic interaction between major polyphenols [J]. Journal of Food Science & Technology, 2018, 55(3): 1010-1020
- [19] LI L, LE A, TAO M, et al. Sulfated modification and anticoagulant activity of pumpkin (*Cucurbita pepo*, *Lady godiva*) polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 447-455
- [20] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Analytical Chemistry, 1955, 28(3): 350-356
- [21] Christiaens S, Mbong V B, Buggenhout S V, et al. Influence of processing on the pectin structure-function relationship in broccoli PurÉE [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 15(1): 57-65
- [22] ZHANG M, WANG F, Liu R, 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
- [23] Athmaselvi K A, Kumar C, Balasubramanian M, et al. Thermal, structural, and physical properties of freeze dried tropical fruit powder [J]. Journal of Food Processing, 2014, 2014: 1-10
- [24] ZHAO X Y, AO Q, YANG L W, et al. Application of superfine pulverization technology in biomaterial industry [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2009, 40(3): 337-343
- [25] YANG Y, JI G, XIAO W, et al. Changes to the physicochemical characteristics of wheat straw by mechanical ultrafine grinding [J]. Cellulose, 2014, 21(5): 3257-3268
- [26] WU M, GAO F, YIN D M, et al. Processing of superfine grinding corn straw fiber-reinforced starch film and the enhancement on its mechanical properties [J]. Polymers, 2018, 10(8): 855
- [27] MING J, CHEN L, HONG H, et al. Effect of superfine grinding on the physico-chemical, morphological and thermogravimetric properties of *Lentinus edodes* mushroom powders [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2015, 95(12): 2431-2437
- [28] JIANG L, XU Q X, QIAO M, et al. Effect of superfine grinding on properties of *Vaccinium bracteatum* Thunb leaves powder [J]. Food Science & Biotechnology, 2017, 26(6): 1-8
- [29] ZHANG L H, XU H D, LI S F. Effects of micronization on properties of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 633-637
- [30] HUANG X, DOU J Y, LI D, et al. Effects of superfine grinding on properties of sugar beet pulp powders [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 87:203-209
- [31] ZHAO X, AO Q, DU F, et al. Surface characterization of ginger powder examined by x-ray photoelectron spectroscopy and scanning electron microscopy [J]. Colloids & Surfaces B: Biointerfaces, 2010, 79(2): 494-500
- [32] 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
- [33] 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
- [34] CHEN Q M, FU M R, YUE F L, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties, antioxidant activity and phenolic content of red rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Food & Nutrition Sciences, 2015, 6(14): 1277-1284
- [35] Caparino O A, Tang J, Nindo C I, et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine carabao*) powder [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(1): 135-148
- [36] Santomaso A, Lazzaro P, Canu P. Powder flowability and density ratios: The impact of granules packing [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(13): 2857-2874
- [37] ZHU F, DU B, XU B. Superfine grinding improves functional properties and antioxidant capacities of bran dietary fiber from qingke (Hull-Less Barley) grown in qinghai-Tibet plateau, China [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 65: 43-47
- [38] WANG K, SUN N, LI D, et al. Enzyme-controlled hygroscopicity and proton dynamics in sea cucumber (*Stichopus japonicus*) ovum peptide powders [J]. Food Research International, 2018, 112: 241-249
- [39] HUANG K, DU B, XU B. Alterations in physicochemical properties and bile acid binding capacities of dietary fibers upon ultrafine grinding [J]. Powder Technology, 2018, 326: 146-150

(下转第 35 页)