

陈元震,胡昕迪,方旭波,等.超微粉碎对牛蒡根粉多酚及抗氧化活性的影响[J].江苏农业科学,2023,51(2):195-201.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.02.029

# 超微粉碎对牛蒡根粉多酚及抗氧化活性的影响

陈元震<sup>1,2</sup>, 胡昕迪<sup>2</sup>, 方旭波<sup>1</sup>, 黄午阳<sup>2</sup>, 李莹<sup>2</sup>, 陈小娥<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋大学食品与药学专业, 浙江舟山 316022; 2. 江苏省农业科学院, 江苏南京 210014)

**摘要:**采用超微粉碎和普通粉碎 2 种技术制备 6 种牛蒡根粉,研究粒径大小对牛蒡根多酚(游离酚、结合酚)的含量、抗氧化性及在体外模拟消化过程中生物利用度的影响。结果表明,超微粉碎显著降低了牛蒡根粉的粒径,使粉末的粒径分布和比表面积发生显著变化;使牛蒡根多酚(BRPP)的溶出率、抗氧化活性和生物利用度显著增加。超微粉碎时间在 30 min,粒径为 14.16  $\mu\text{m}$  时,粉末的均一性最强;此时,游离态和结合态多酚含量分别增加 19.01%、23.23%;DPPH 自由基清除力分别提高 28.07%、22.15%;ABTS 阳离子自由基清除力分别提高 36.78%、32.42%;铁离子还原能力也分别提高 34.31%、27.13%;多酚生物可及性提高 20.08%。因此,超微粉碎技术可用作制备牛蒡根粉的前处理加工手段。

**关键词:**物理特性;游离酚;结合酚;抗氧化;生物利用度

**中图分类号:**TS201.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)02-0195-07

自然界植物中含有丰富的酚类物质,天然酚酸通常以游离态和结合态存在于植物的皮、根、木、叶

和果实中<sup>[1]</sup>。大量试验数据证明,植物中的酚类物质具有多种生物活性,在抗氧化、抗菌、抗虫、抗病毒等方面发挥着重要作用。这类化合物包括黄酮类化合物和羟基肉桂酸等,牛蒡是这 2 种化合物的重要天然来源。牛蒡(*Arctium lappa* L.)别称牛蒡子(burdock),是桔梗目菊科二年生草本植物,在亚洲已有 3 000 多年种植历史。因具有保肝、抗炎和抗氧化的潜在治疗特性而被作为一种营养和功能食品广泛推广<sup>[2]</sup>。与市面上使用的灵芝、人参等名贵药材相比,牛蒡不仅具有多种食用和治疗价值,且价格低廉易于栽培<sup>[3]</sup>。目前,在我国牛蒡根主要以

收稿日期:2022-02-19

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(19)2006];江苏省重点研发计划面上项目(编号:BE2020382);农业农村部农产品加工重点实验室基金(编号:S2021KFKT-04);白马未来食品研究院揭榜挂帅项目(编号:JBGS-2021-004)。

作者简介:陈元震(1995—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事食品加工与安全的研究。E-mail:chenyuanzhen0803@163.com。  
通信作者:李莹,博士,研究员,主要从事营养与健康的研究, E-mail:hijoly@163.com;陈小娥,博士,教授,主要从事水产加工与贮藏的研究, E-mail:xiaoechen@163.com。

[18] Krishnan K R, Rayaguru K, Nayak P K. Ultra-sonicated vacuum drying's effect on antioxidant activity, TPC, TFC and color of elephant apple slices[J]. Food Bioscience, 2020, 36:100629.

[19] Zhang J T, Dong Y S, Nisar T, et al. Effect of superfine-grinding on the physicochemical and antioxidant properties of *Lycium ruthenicum* Murray Powders[J]. Powder Technology, 2020, 372: 68-75.

[20] Bolanos de la Torre A A S, Henderson T, Nigam P S, et al. A universally calibrated microplate ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay for foods and applications to Manuka honey[J]. Food Chemistry, 2015, 174:119-123.

[21] Tsai S Y, Tsai H L, Mau J L. Non-volatile taste components of *Agaricus blazei*, *Agrocybe cylindracea* and *Boletus edulis*[J]. Food Chemistry, 2008, 107(3):977-983.

[22] Chen Z G, Guo X Y, Wu T. A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods

[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 30:28-34.

[23] Vahid B, Michael N, Mehrdad N. Effects of ultrasound and infrared assisted conductive hydro-drying, freeze-drying and oven drying on physicochemical properties of okra slices[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2020, 63:102313.

[24] Li X B, Feng T, Zhou F, et al. Effects of drying methods on the tasty compounds of *Pleurotus eryngii*[J]. Food Chemistry, 2015, 166: 358-364.

[25] Siegmund B. Biogenesis of aroma compounds [M]//Flavour development, analysis and perception in food and beverages. Amsterdam:Elsevier, 2015:127-149.

[26] Hiraide M, Miyazaki Y, Shibata Y. The smell and odorous components of dried shiitake mushroom, *Lentinula edodes* I: relationship between sensory evaluations and amounts of odorous components[J]. Journal of Wood Science, 2004, 50(4):358-364.

菜品的形式在餐桌上呈现。为加大牛蒡的开发利用度,我们可将牛蒡根深加工制成粉末,添加到各种食品中作为功能性食品补充剂。物料利用程度和粉体理化性质密切相关,不同的生产工艺对原料的理化性质和生物活性有重要影响,粉碎工艺对粉体的特性和粒度起到关键作用。

超微粉碎技术是近年来一种新兴的加工技术,通常被应用于生物技术、制药工业和食品加工等领域。与传统制备技术相比,超微粉碎技术具有更大的潜力和发展空间<sup>[4]</sup>。在加工特性方面,由于物料在短时间内被强烈粉碎,超微粉的表面发生变化,导致微粉显现出一些粗颗粒所不具有的特性,这种特性主要表现为高溶解性、高分散性、高吸附性和高流动性<sup>[5]</sup>。在化学组成方面,超微粉碎技术提高了植物细胞壁的破碎程度,有利于存在于细胞质和细胞核的有效活性成分溶出,增加了活性物质提取效率、抗氧化性能和生物利用度<sup>[6]</sup>。此外,超微粉碎对物料物理特性,如热力学性质、结晶度、官能团变化等也有一定影响<sup>[7]</sup>。由此可见,超微粉碎适合于方便食品和速食食品的生产。

超微粉碎技术对牛蒡根粉的影响尚未见报道。因此,本研究旨在比较超细研磨和普通粉碎后,6 种不同粒径牛蒡根粉在颗粒特征、多酚含量、抗氧化活性及生物利用度方面的区别,以期对牛蒡根粉在速食食品和有效药物成分的应用中提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牛蒡根,购自江苏省丰县。氢氧化钠、氯化钾、磷酸钾、碳酸氢钠、没食子酸、福林酚等为分析纯试剂,购自百灵威化学试剂有限公司。浓硫酸、盐酸、乙酸乙酯、甲醇等为分析纯试剂,购自国药集团化学试剂有限公司。1,1 - 二苯基 - 2 - 苦基肼基(1,1 - diphenyl - 2 - picryl - hydrazyl, DPPH)、2,2' - 联氮 - 双 - 3 - 乙基苯并噻唑啉 - 6 - 磺酸[2,2' - azino - bis(3 - ethylbenzothiazoline - 6 - sulfonic acid), ABTS]、2,4,6 - 三(2 - 吡啶基)1,3,5 - 三嗪[2,4,6 - tri(2 - pyridyl)1,3,5 - triazine, TPTZ],均购自默克生物科技有限公司。6 - 羟基 - 2,5,7,8 - 四甲基色烷 - 2 - 羧酸(6 - hydroxy - 2,5,7,8 - tetramethylchroman - 2 - carboxylic acid, Trolox),购自美国 Across Organics 公司。胃蛋白酶、黏膜蛋白、猪胆盐、胰蛋白酶,均购自上海麦克林生化科技有

限公司。

1.2 仪器与设备

XDW - 6A 振动式细胞级超微粉碎机,购自济南南达微机械有限公司;L3 - 5K 台式低速离心机,购自湖南可成仪器设备有限公司;RE - 52AA 型真空减压旋转蒸发仪、SHZ - III 型循环水真空泵,购自上海亚荣生化仪器厂;KQ - 400DE 数控超声波清洗机,购自昆山市超声仪器有限公司;FDU - 1200 真空冷冻干燥机,购自东京理化器械株式会社;AL104 电子分析天平,购自梅特勒托利多科技(中国)有限公司;PHS - 2C pH 计,购自上海智光仪器仪表有限公司;UV - 6100 紫外分光光度计,购自上海美普达仪器有限公司;EUROSTAR 40 Digital 高速搅拌器,购自德国 IKA 公司;Avanti J - 26S XP 落地式高速冷冻离心机,购自美国 Beckman Coulter 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理 选择大小均匀、无机械损伤和病虫害的牛蒡根(采自江苏省徐州市沛县,34°43'N、116°56'E)。将新鲜牛蒡洗净,切成 1 ~ 2 cm 厚薄片,60 ℃热风干燥成牛蒡干。将牛蒡干分为 2 个部分,一部分使用超微粉碎机进行超细研磨,另一部分使用实验室常用的普通研磨机研磨,具体方法见表 1,两种研磨方式得到 6 种牛蒡根粉。由于牛蒡根粉在空气中易吸水结块、褐变,需远离潮湿和光线,存放在密封袋,存于 4 ℃冰箱。

表 1 牛蒡干制备方法

样品	制备方式	粉碎时间	过筛目数
BP - 1	超微粉碎	30 min	
BP - 2	超微粉碎	15 min	
BP - 3	超微粉碎	10 min	
BP - 4	超微粉碎	5 min	
BP - 5	超微粉碎	3 min	80 目
BP - 6	普通粉碎	20 s(3 次)	50 目

1.3.2 粒径分布 粒径分布采用干式激光衍射仪在室温下进行测量。将 1 g 牛蒡根粉加入盛有 50 mL 水的烧杯中,搅拌均匀后,放入粒径仪中进行粒径分布测定。其中, $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$ 分别代表小于粉末粒径的 10%、50%、90% 的粒径累积百分位数, $D(3,2)$ 、 $D(4,3)$ 、 $D(2,1)$ 和  $D(1,0)$ 分别表示面积平均径、体积平均径、长度平均径和数量平均径。Span 表示牛蒡根粉末粒径的分布宽度, $\Phi$  表示细胞壁破裂率(当  $D_{50} < 10 \mu\text{m}$  时, $\Phi = 1$ ),以此来表征颗粒大小分布<sup>[8]</sup>,计算公式如下所示:

$$\text{Span} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}}; \quad (1)$$

$$\Phi = 1 - \left(1 - \frac{10}{D_{50}}\right)^3. \quad (2)$$

1.3.3 游离态、结合态酚类物质的提取 参考 Juániz 等的提取方法<sup>[9]</sup>, 从不同粒径的牛蒡根粉中提取游离态多酚。先采用 80% 甲醇提取 3 次, 后采用 6 mol/L 盐酸将上清样品的 pH 值调至 2.0, 经乙酸乙酯重复萃取后, 将萃取相在旋转蒸发真空下浓缩干燥, 甲醇复溶即得游离态多酚。保存剩下的残渣, 进行后续分析。

参考罗舜菁等的方法<sup>[10]</sup>, 收集提取过游离酚后的剩余残渣, 采用 2 mol/L NaOH 溶液充分溶解, 同时充入 N<sub>2</sub>, 室温避光振荡 4 h 后, 采用 6 mol/L HCl 溶液将 pH 值调至 2.0, 离心取上清, 加入等量乙酸乙酯萃取分离, 重复操作 5 次, 合并上清液在 45 ℃ 条件下旋蒸, 最后采用甲醇定容至 10 mL, 得到结合态多酚, -18 ℃ 保存。

1.3.4 酚类物质含量的测定 参考 Apea - Bah 等建立的 Folin - Ciocalteu 法<sup>[11]</sup>, 稍加修改后测定总酚含量。将 40 μL 福林酚试剂 (25%) 与 20 μL 不同浓度梯度的没食子酸标准品溶液 ( $r = 0.999$ )、空白溶液及多酚提取物溶液混合均匀, 随后加入 140 μL (700 mmol/L) 碳酸钠溶液, 得到 200 μL 混合物。并在恒温摇床上以 200 r/min 的速度振荡 3 min 使其混合均匀, 室温孵育 30 min, 在 765 nm 处测定吸光度。结果以 1 g 干物质中所含没食子酸当量 (mg GAE/g) 表示。

1.3.5 体外抗氧化能力的测定 DPPH 自由基清除能力测定根据 Cheng 等的报道<sup>[12]</sup>, 略有改变。将 10 μL 标准品溶液、酚类物质提取液和空白溶液分别与 190 μL 浓度为 65 μmol/L 的 DPPH 自由基溶液混合在 96 孔板中, 在摇床上以 100 r/min 混匀 1 min, 避光孵育 30 min 后, 在 517 nm 处测定吸光度。DPPH 自由基清除能力按 1 g 干物质中所含 Trolox 当量 (mg TE/g) 表示。

ABTS 自由基清除能力的测定基于杨灵光报导的方法<sup>[13]</sup>, 略有变化, 准备 1 个自由基备用溶液 (7 mmol/L ABTS 和 2.45 mmol/L K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>), 并在室温下保持 12 ~ 16 h, 使用前用甲醇溶液在 734 nm 处调整备用溶液的吸光度范围为 0.70 ± 0.02, 将 5 μL 样品和 195 μL ABTS 溶液混合孵育 6 min, 在 734 nm 处读值。ABTS 自由基清除能力按 1 g 干物

质中所含 Trolox 当量 (mg TE/g) 表示。

铁离子还原能力测定。对铁离子还原能力的分析参考 Benzie 等的方法<sup>[14]</sup>, 将浓度为 0.3 mol/L 的醋酸钠缓冲液 (pH 值 3.6)、10 mmol/L 的 TPTZ 溶液 (由 40 mmol/L HCl 溶解) 和 20 mmol/L 的氯化铁溶液按 1 : 1 : 10 的体积比充分混匀, 水浴加热至 37 ℃, 得到 FRAP 溶液。将 1 mL 样品加入至 5 mL 新鲜的 FRAP 溶液中, 然后将混合物避光置于 37 ℃ 的恒温水域, 20 min 后取出, 在 593 nm 处读值。铁离子还原能力以 1 g 干物质中所含 FRAP 当量 (mg FEAC/g) 表示。

1.3.6 体外模拟口腔、胃、肠消化 体外消化模拟是由 Dong 等的方法<sup>[15]</sup>进行修改而成。粉末的体外消化一般经过三步, 开始于口腔, 接着是胃, 最后是肠道阶段。模拟的唾液、胃液和肠液是由相应的消化酶、水、电解液等配制而成。在口服阶段, 将 1 g 牛蒡根粉末按照 1 g : 5 mL 比例与水、氯化钠、氯化钾、柠檬酸钾、尿素和黏膜蛋白等混合, 用 1 mol/L HCl 将混合物酸化至 6.8, 并在 37 ℃ 水浴中搅拌 10 min, 离心取上清液, -20 ℃ 储存; 在胃步骤中, 将口腔食糜与水、CaCl<sub>2</sub> 和猪胃蛋白酶混合, 用 3 mol/L HCl 将混合物的 pH 值降至 3.0, 然后孵育搅拌 2 h, 离心取上清液, -20 ℃ 储存; 在肠道步骤中, 将胃食糜与水、CaCl<sub>2</sub>、胆汁液和胰蛋白酶混合, 加入 1 mol/L NaOH, 将混合物的 pH 值提高至 7.0, 搅拌 2 h。相同的消化条件下, 加入空白组 (不含牛蒡根粉), 以纠正消化液、酶和液体的干扰。

1.3.7 多酚化合物的体外释放度 参考李梦杰等的方法计算牛蒡根多酚 (BRPP) 的生物可及性, 消化后酚类物质的生物可及性按公式 (3) 计算:

$$\text{生物可及性} = \frac{\text{ADS}}{\text{UNS}} \times 100\%。 \quad (3)$$

式中: ADS 为消化后的样品量; UNS 为 BRF 未消化的样品量。

## 1.4 数据处理与分析

本研究中每个试验均重复进行 3 次, 采用 Microsoft Excel 2019 统计数据、SPSS 25.0 分析数据差异的显著性,  $P < 0.05$  表示差异显著; 用 Origin 2019 软件作图, 结果表示为“平均值 ± 标准差”。

## 2 结果与分析

### 2.1 粒度分析

大小在 0.000 001 ~ 100 mm 间的微小固体颗粒

被划分为超细粉,颗粒工艺学认为从颗粒系统的角度描述食品粉末的基本特性是进行其他研究的基础<sup>[16]</sup>。本研究先从粒径分布方面对牛蒡根粉进行初步探讨,粒度分布通常是指粉末样品中不同粒径颗粒在颗粒总量中的占比,采用激光粒径分析仪得到不同研磨时间的牛蒡根粉粒径。由图 1 可知,粒径分布随着研磨时间增长更为集中,为进一步了解粒径分布,我们总结了 6 个样品的  $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$ 。由表 2 可知,经超微粉碎的牛蒡根粉的粒径远小于经普通研磨的牛蒡根粉,且超微粉碎后粉末的粒径随着研磨时间的增加而减小,BP-1、BP-2、BP-3、BP-4、BP-5 和 BP-6 的  $D_{90}$  粒径分别为 14.16、48.60、98.18、133.70、168.00、360.10  $\mu\text{m}$ ,同时粉末

的  $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D(3,2)$ 、 $D(4,3)$ 、 $D(2,1)$ 、 $D(1,0)$  均有与之相同的变化趋势。

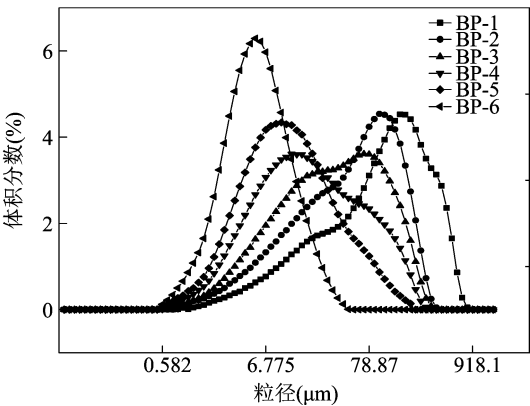


图1 牛蒡根粉的粒径分布曲线

表 2 牛蒡根粉的粒径参数

样品	$D_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D(4,3)$ ( $\mu\text{m}$ )	$D(3,2)$ ( $\mu\text{m}$ )	$D(2,1)$ ( $\mu\text{m}$ )	$D(1,0)$ ( $\mu\text{m}$ )
BP-1	$1.86 \pm 0.15\text{f}$	$5.09 \pm 0.27\text{f}$	$14.16 \pm 0.25\text{f}$	$6.83 \pm 0.19\text{f}$	$3.74 \pm 0.18\text{f}$	$2.09 \pm 0.01\text{f}$	$1.30 \pm 0.02\text{f}$
BP-2	$2.71 \pm 0.19\text{e}$	$10.36 \pm 0.21\text{e}$	$48.60 \pm 0.41\text{e}$	$19.71 \pm 0.24\text{e}$	$6.15 \pm 0.27\text{e}$	$2.42 \pm 0.03\text{e}$	$1.37 \pm 0.01\text{e}$
BP-3	$3.40 \pm 0.16\text{d}$	$16.61 \pm 0.39\text{d}$	$98.18 \pm 1.02\text{d}$	$35.31 \pm 0.41\text{d}$	$8.30 \pm 0.18\text{d}$	$2.72 \pm 0.02\text{d}$	$1.45 \pm 0.02\text{d}$
BP-4	$4.96 \pm 0.12\text{c}$	$31.32 \pm 0.49\text{c}$	$133.70 \pm 0.21\text{c}$	$52.45 \pm 0.67\text{c}$	$12.30 \pm 0.39\text{c}$	$3.15 \pm 0.04\text{c}$	$1.56 \pm 0.02\text{c}$
BP-5	$6.74 \pm 0.21\text{b}$	$51.78 \pm 0.57\text{b}$	$168.00 \pm 1.46\text{b}$	$71.27 \pm 0.93\text{b}$	$16.61 \pm 0.26\text{b}$	$3.59 \pm 0.02\text{b}$	$1.80 \pm 0.03\text{b}$
BP-6	$11.60 \pm 0.23\text{a}$	$107.20 \pm 0.73\text{a}$	$360.10 \pm 2.28\text{a}$	$147.80 \pm 0.79\text{a}$	$27.94 \pm 0.25\text{a}$	$4.52 \pm 0.08\text{a}$	$2.08 \pm 0.02\text{a}$

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。表3、表4、表6同。

跨度值(Span)、 $\Phi$  和比表面积亦可以反映粉末的基本特性,由表 3 可知,Span 表示粒径分布的宽度,是描述粒径分布的另一个重要参数,Span 越小,表示粒径分布均匀<sup>[17]</sup>。与其他粉末相比,BP-1 的 Span 为 2.42,数值最小,说明颗粒更加均匀,且 BP-1 的粒径分布范围比其他粉末更接近于高斯分布,但从总体上看,6 种样品的跨度值无明显规律,说明超微粉碎虽可以减小粉末粒度值,但在未达到一定的粉碎时间时,部分颗粒粉碎不够均匀,Span 与粒径无关,只能反映颗粒的均一性<sup>[18]</sup>;另一方面  $\Phi$  随粒径减小而增加最高可达 1.9,说明超微粉碎可破坏牛蒡根的细胞壁,增加活性物质的溶出;此外,比表面积是超细粉体的重要表征指标之一,随着粒径的减小,牛蒡根粉的比表面积从 79.54  $\text{m}^2/\text{kg}$  迅速增加至 593.7  $\text{m}^2/\text{kg}$ ,BP-1 的比表面积是 BP-6 的 7.46 倍,说明超微粉碎对食品粉末的表面性能有显著影响,此结果对粉末的吸附能力、水合作用、溶解度、抗氧化活性、生物利用度等其他性能的研究奠定了基础<sup>[7]</sup>。

表 3 牛蒡根粉末的基本特征

样品	比表面积 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	Span	$\Phi$
BP-1	$593.70 \pm 1.12\text{a}$	$2.42 \pm 0.03\text{f}$	$1.90 \pm 0.01\text{a}$
BP-2	$361.70 \pm 0.92\text{b}$	$4.43 \pm 0.04\text{b}$	$1.00 \pm 0.01\text{b}$
BP-3	$267.70 \pm 1.79\text{c}$	$5.71 \pm 0.02\text{a}$	$0.94 \pm 0.02\text{c}$
BP-4	$180.60 \pm 0.82\text{d}$	$4.11 \pm 0.05\text{c}$	$0.68 \pm 0.01\text{d}$
BP-5	$133.70 \pm 1.32\text{e}$	$3.11 \pm 0.04\text{e}$	$0.47 \pm 0.02\text{e}$
BP-6	$79.54 \pm 1.06\text{f}$	$3.25 \pm 0.04\text{d}$	$0.25 \pm 0.01\text{f}$

2.2 超微粉碎对 BRPP 含量的影响

酚类化合物主要以结合态和游离态 2 种形式存在于牛蒡根中,结合酚常规提取不易溶解,且咀嚼、酸性环境和消化酶都不会使其从食物基质中显著释放出来<sup>[19]</sup>,因此多数学者忽略了结合酚部分。Kroon 等已证明结合酚受到结肠微生物菌群的广泛转化,会表现出抗氧化和抗增殖等活性<sup>[20]</sup>。本研究主要探索经超微粉碎后游离酚、结合酚和总酚的含量变化。由表 4 可知,超微粉碎后 6 种粉末的游离酚、结合酚和总酚的含量均随着粒径的减小而显著

增大( $P < 0.05$ ),与 BP-6 相比,BP-1 中游离酚、结合酚和总酚的含量增加最为明显,分别增加了 23.47%、30.26%、24.87%。超微粉碎加工技术明显增加了牛蒡根中不同状态 BRPP 的溶出率和释放量,赵萌萌等报道的超微粉碎对青稞麸皮粉末中酚类物质含量的影响中也得到相似结论<sup>[21]</sup>。一方面随着粒径的减小, $\Phi$  增加,牛蒡根的细胞壁遭到破坏,降低对传质的阻力,提高溶剂输注效率,同时改变纤维结构,释放或暴露基质中结合态多酚<sup>[17,22]</sup>;另一方面,粉末的比表面积增大,这增大了提取溶剂和粉末的接触面积,使提取速率增高,提取量增大。但卫子颜等的研究表明,随着粒径的减小,米糠结合酚的含量出现先增加后减小的趋势,这可能随着超微粉碎时间的增加,剧烈的机械化作用和热效应致使细胞壁间的共价键和非共价键断裂,从而导致结合酚含量损失<sup>[23]</sup>。而本研究超微粉碎过程采用循环冷水降温模式,且控制超微粉碎时间低于 30 min,所以并未出现结合酚含量降低的情况。

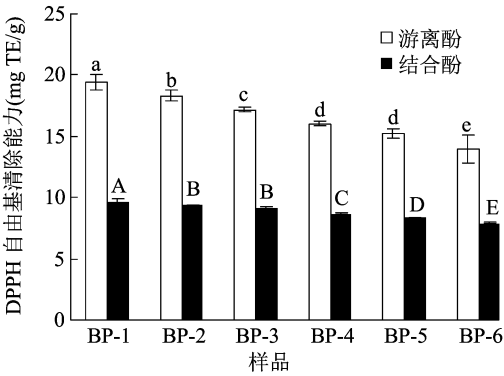
表 4 超微粉碎处理后的牛蒡根中酚类物质含量

样品	酚类物质含量 (mg GAE/g)		
	游离酚	结合酚	总酚含量
BP-1	47.56 ± 0.40a	13.0 ± 0.10a	60.56 ± 0.51a
BP-2	46.54 ± 0.50b	12.03 ± 0.05b	58.57 ± 0.56b
BP-3	44.34 ± 0.23c	11.64 ± 0.05c	55.98 ± 0.28c
BP-4	41.69 ± 0.47d	11.29 ± 0.06d	52.99 ± 0.54d
BP-5	40.78 ± 0.51e	10.87 ± 0.07e	51.65 ± 0.58e
BP-6	38.52 ± 1.31f	9.98 ± 0.11f	48.50 ± 1.44f

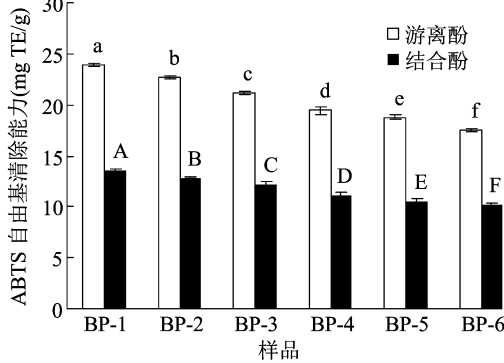
2.3 超微粉碎处理对 BRPP 抗氧化活性的影响

考虑到研磨过程中酚类各组分化合物的变化,深入评价超微粉碎后 BRPP 的生物活性尤为重要。对一种物质抗氧化活性的综合评价需要 2 种或 2 种以上的分析方法<sup>[24]</sup>。本研究采用 DPPH、ABTS 和 FRAP 清除试验来分析牛蒡根酚类提取物的活性,由图 2 可知,在 3 种抗氧化评价体系中,6 种不同粒径 BRPP 均有明显抗氧化活性,且与粒径的大小有显著关系( $P < 0.05$ )。结合态和游离态多酚的抗氧化性均随牛蒡根粉粒度的减小而逐渐增大,其中,BP-1 的粒径最小,清除自由基的能力也最高,相较于 BP-6,BP-1 中游离酚和结合酚的 DPPH 自由基清除力分别提高 28.07%、22.15%;ABTS 自由基清除力分别提高了 36.78%、32.42%;铁离子还原能力也分别提高 34.31%、27.13%。叶秋莹等在分

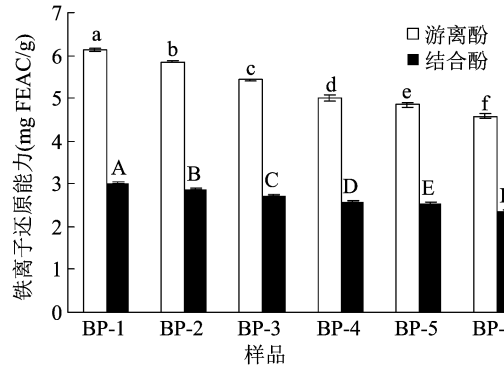
析超微粉碎对红茶粉抗氧化性能的影响时也得到相似趋势<sup>[25]</sup>;究其原因,一方面天然植物的抗氧化能力在很大程度上取决于植物化合物的有效性<sup>[17]</sup>,超微粉碎使得多酚释放增强,提取率增加,从而增强了超细粉的抗氧化能力;另一方面,高比表面积微观结构导致水溶性增加,提高了粉末的溶解能力,致使水溶性化合物的溶出率增加,如易溶于水的多糖类物质,这间接促进了超细粉抗氧化活性的增强。这与 Zhang 等的研究结论<sup>[17]</sup>相符合。由此可见,超微粉碎可应用于大规模加工与牛蒡根相关的功能性食品。



a. DPPH 自由基清除能力



b. ABTS 自由基清除能力



c. 铁离子还原能力

柱上不同大写、小写字母表示同一物质不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )

图2 超微粉碎处理对牛蒡根中不同状态酚类化合物抗氧化活性的影响

2.4 BRPP 含量与抗氧化活性之间的相关性分析

BRPP 含量和抗氧化性均随着粒径的减小而增大,为进一步明确 BRPP 含量与抗氧化活性的关联,分析了各变量间的相关性。由表 5 可知,BRPP 的含量与 3 种抗氧化活性评价指标呈极显著正相关

( $P < 0.01$ ),游离酚的相关系数分别为 0.994、0.996、0.994,结合酚的相关系数分别为 0.975、0.960、0.985,即 BRPP 含量越高,其自由基清除能力越强。BRPP 具有抗氧化活性,直接说明其含有丰富的抗氧化活性化合物。

表 5 牛蒡根中酚类物质含量与体外抗氧化活性的相关性分析

项目	相关系数							
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	B <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>
B <sub>1</sub>	1.000							
B <sub>2</sub>	0.994 **	1.000						
B <sub>3</sub>	0.996 **	0.997 **	1.000					
B <sub>4</sub>	0.994 **	0.995 **	0.999 **	1.000				
B <sub>5</sub>	0.967 **	0.994 **	0.974 **	0.968 **	1.000			
B <sub>6</sub>	0.990 **	0.985 **	0.985 **	0.981 **	0.975 **	1.000		
B <sub>7</sub>	0.990 **	0.990 **	0.994 **	0.995 **	0.960 **	0.986 **	1.000	
B <sub>8</sub>	0.994 **	0.998 **	0.998 **	0.995 **	0.985 **	0.987 **	0.988 **	1.000

注:B<sub>1</sub>~B<sub>4</sub> 分别表示游离酚的含量及其 DPPH 自由基清除能力、ABTS 阳离子自由基清除能力、铁离子还原能力,B<sub>5</sub>~B<sub>8</sub> 分别表示结合酚的含量及其 DPPH 自由基清除能力、ABTS 阳离子自由基清除能力、铁离子还原能力。其中,数据后上标\*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著、极显著相关。

2.5 体外模拟胃肠消化过程中牛蒡总酚的含量及释放度

酚类物质的吸收利用率与多种因素有关,食品加工方式对食品结构进行修饰,这会对植物次生代谢物的释放、吸收和转化等产生影响<sup>[26]</sup>。由于结合酚不能在消化中溶出,本研究主要探索超微粉碎对经消化后游离酚的含量和生物利用率的影响。由表 6 可知,牛蒡根中多酚含量在口腔、胃、肠中呈现出先增大后减小的趋势,这与 Herrera - Balandrano 等研究的消化对牛蒡根酚类物质的变化趋势<sup>[27]</sup>相一致。胃消化阶段酚类物质明显升高,说明较低的

pH 值环境容易使牛蒡根中酚类物质与碳水化合物、蛋白和多糖形成的稳定复合物分离<sup>[28]</sup>;肠消化阶段酚类物质含量发生下降,说明采用酶进行的消化模型会对酚类物质造成破坏;进一步分析超微粉碎对 BRPP 生物可及性的结果发现,对比不同粒径粉末的同一消化阶段,BRPP 的含量都随着粒径的减小而显著增加( $P < 0.05$ ),BP - 1 ~ BP - 5 计算得到的 BRPP 生物可接受率较 BP - 6 分别提高 20.08%、17.75%、13.84%、9.81% 和 8.01%,说明超微粉碎可减弱细胞壁的物理阻隔、打破食物基质的结合,有效提高 BRPP 的生物利用率。

表 6 体外口腔胃肠消化后牛蒡根中酚类物质的释放

样品	释放度占比(%)				可及性(%)
	未消化	口腔消化	胃消化	肠消化	
BP - 1	47.56 ± 0.40a	4.37 ± 0.18a	35.92 ± 0.68a	24.09 ± 0.07a	50.66
BP - 2	46.54 ± 0.50b	3.71 ± 0.10b	33.26 ± 0.63b	23.12 ± 0.11b	49.68
BP - 3	44.34 ± 0.23c	3.46 ± 0.07c	29.76 ± 0.29c	21.29 ± 0.14c	48.03
BP - 4	41.69 ± 0.47d	3.29 ± 0.07d	27.95 ± 0.24d	19.32 ± 0.29d	46.33
BP - 5	40.78 ± 0.51e	2.77 ± 0.09e	26.81 ± 0.25e	18.59 ± 0.13e	45.57
BP - 6	38.52 ± 1.31f	2.17 ± 0.08f	24.81 ± 0.30f	16.23 ± 0.12f	42.19

3 结论

本试验采用超微粉碎技术和普通粉碎技术制备牛蒡根粉,研究了不同粒径对牛蒡根粉模拟消化

前后多酚含量和其抗氧化活性的影响。结果表明,超微粉碎的粒径随时间增加显著降低,当时间为 30 min 时,粒径最小,为 14.16 μm,此时牛蒡根粉的酚类物质含量最多、抗氧化活性最强,生物利用度

最高,此外酚类含量和其抗氧化活性呈显著正相关,表明超微粉碎后的粉末的化学性能更好,当与其他粉末添加剂混合时,具有更高的潜力,发挥最大的作用。

#### 参考文献:

- [1] Chen G L, Zhang X, Chen S G, et al. Antioxidant activities and contents of free, esterified and insoluble – bound phenolics in 14 subtropical fruit leaves collected from the south of China[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 30: 290 – 302.
- [2] 杜毅, 王晓芸, 陈伦, 等. 基于网络药理学探讨牛蒡子药理作用机制[J]. 中医学报, 2020, 35(9): 1971 – 1975.
- [3] Chan Y S, Cheng L N, Wu J H, et al. A review of the pharmacological effects of *Arctium lappa* (burdock) [J]. Inflammopharmacology, 2011, 19(5): 245 – 254.
- [4] Chen H D, Weiss J, Shahidi F. Nanotechnology in nutraceuticals and functional foods[J]. Food Technology, 2006, 60(3): 30 – 36.
- [5] Zhang M, Zhang C J, Shrestha S. Study on the preparation technology of superfine ground powder of *Agrocybe chaxingu* Huang[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67(3): 333 – 337.
- [6] Meng Q R, Fan H R, Xu D, et al. Superfine grinding improves the bioaccessibility and antioxidant properties of *Dendrobium officinale* powders[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(6): 1440 – 1451.
- [7] Wu Z G, Ameer K, Jiang G H. Effects of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activities of sanchi (*Panax notoginseng*) flower powders[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(1): 62 – 73.
- [8] He S D, Tang M M, Sun H J, 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.
- [9] Juárez I, Ludwig I A, Bresciani L, et al. Bioaccessibility of (poly) phenolic compounds of raw and cooked cardoon (*Cynara cardunculus* L.) after simulated gastrointestinal digestion and fermentation by human colonic microbiota[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 32: 195 – 207.
- [10] 罗舜青, 胡迪, 黄克愁, 等. 过热蒸汽处理对米糠营养性质和储藏稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 213 – 221.
- [11] Apea – Bah F B, Minnaar A, Bester M J, et al. Sorghum – cowpea composite porridge as a functional food, Part II: antioxidant properties as affected by simulated *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 307 – 315.
- [12] Cheng Y X, Wu T, Chu X Q, et al. Fermented blueberry pomace with antioxidant properties improves fecal microbiota community structure and short chain fatty acids production in an *in vitro* mode [J]. LWT – Food Science and Technology, 2020, 125: 109260.
- [13] 杨灵光. 元宝枫叶片酚类物质评价及其黄酮合成通路表征[D]. 北京: 北京林业大学, 2019: 18 – 19.
- [14] Benzie I F F, Strain J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay [J]. Analytical Biochemistry, 1996, 239(1): 70 – 76.
- [15] Dong R H, Liu S, Xie J H, et al. The recovery, catabolism and potential bioactivity of polyphenols from carrot subjected to *in vitro* simulated digestion and colonic fermentation [J]. Food Research International, 2021, 143: 110263.
- [16] 孟庆然. 超微粉碎对天然可食植物组织理化性质及营养素释放效率影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 6 – 8.
- [17] Zhang J T, Dong Y S, Nisar T, et al. Effect of superfine – grinding on the physicochemical and antioxidant properties of *Lycium ruthenicum* Murray powders [J]. Powder Technology, 2020, 372: 68 – 75.
- [18] Liu S W, Yu J C, Zou J, et al. Effects of different drying and milling methods on the physicochemical properties and phenolic content of hawthorn fruit powders [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(6): 118 – 129.
- [19] Pérez – Jiménez J, Díaz – Rubio M E, Saura – Calixto F. Non – extractable polyphenols, a major dietary antioxidant: occurrence, metabolic fate and health effects [J]. Nutrition Research Reviews, 2013, 26(2): 118 – 129.
- [20] Kroon P A, Faulds C B, Ryden P, et al. Release of covalently bound ferulic acid from fiber in the human colon [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(3): 661 – 667.
- [21] 赵萌萌, 张文刚, 党斌, 等. 超微粉碎对青稞麸皮粉多酚组成及抗氧化活性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 291 – 298.
- [22] Speroni C S, Stiebe J, Guerra D R, et al. Micronization and granulometric fractionation improve polyphenol content and antioxidant capacity of olive pomace [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 137: 347 – 355.
- [23] 卫子颜, 谢勇, 王滕滕, 等. 超微粉碎对米糠多酚的组成及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 138 – 144.
- [24] Zhang Q Y, Chen W W, Zhao J H, et al. Functional constituents and antioxidant activities of eight Chinese native goji genotypes [J]. Food Chemistry, 2016, 200: 230 – 236.
- [25] 叶秋莹, 黄宏浩, 宋飞, 等. 超微红茶粉的理化性质和抗氧化活性的研究[J]. 现代食品, 2021(3): 210 – 214.
- [26] 李梦杰, 胡坦, 潘思铁. 食品体系组成及加工方式对植物次生代谢物生物利用度的影响研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 328 – 337.
- [27] Herrera – Balandrano D D, Beta T, Chai Z, et al. Effect of *in vitro* gastro – intestinal digestion on the phenolic composition and antioxidant capacity of burdock roots at different harvest time [J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129897.
- [28] 王慧清, 刘冬, 孙海燕, 等. 全麦粉模拟消化过程中的抗氧化活性研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10): 122 – 128.