

超微粉碎果蔬粉的活性成分、物理特性 与食品开发研究进展

丘梓慧, 陈梓雅, 陈爽, 王琴, 肖更生, 彭进明*

(仲恺农业工程学院轻工食品学院, 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广东广州 510225)

摘要: 超微粉碎是一种新兴的制粉技术, 该技术能提高物料利用率、改善食品加工特性、提升产品品质, 目前已广泛运用于果蔬加工领域。该文综述了超微粉碎对果蔬粉活性成分包括多酚、多糖、维生素C、蛋白质和矿物质的影响; 分析了超微粉碎对果蔬粉物理性质包括粒径、休止角和滑角、溶解度、膨胀力、持水力和阳离子交换能力的影响; 另外讨论了果蔬超微粉在面制品、功能食品、乳制品和肉制品开发中的应用, 以期超微粉碎果蔬粉在食品工业中应用提供实践参考。

关键词: 超微粉碎; 果蔬粉; 活性成分; 物理特性; 食品开发

文章编号: 1673-9078(2024)11-398-409

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.11.1334

Research Progress on the Active Ingredients, Physical Properties, and Food Development of Superfine Ground Fruits and Vegetables Powder

QIU Zihui, CHEN Ziya, CHEN Shuang, WANG Qin, XIAO Gengsheng, PENG Jinming*

(Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Science and Technology of Lingnan Specialty Food, College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: Superfine grinding, a new milling technology that can improve material utilization, food processing characteristics, and product quality, has been widely used in the field of fruit and vegetable processing. In this paper, the effects of superfine grinding on the active components (including polyphenols, polysaccharides, vitamin C, protein, and minerals) of fruits and vegetables powder (FVP) are reviewed. The influences of superfine grinding on the physical properties of FVP (including particle size, angle of rest and slip, solubility, swelling, water holding capacity, and cation exchange capacity) were analyzed. Moreover, the application of superfine FVP in the development of flour products, functional foods, dairy products, and meat products are also discussed, to provide practical reference for the application of superfine ground fruits and vegetables powder in food industry.

Key words: superfine grinding; fruits and vegetables powder; active ingredients; physical properties; food development

引文格式:

丘梓慧,陈梓雅,陈爽,等.超微粉碎果蔬粉的活性成分、物理特性与食品开发研究进展[J].现代食品科技,2024,40(11):398-409.

QIU Zihui, CHEN Ziya, CHEN Shuang, et al. Research progress on the active ingredients, physical properties, and food development of superfine ground fruits and vegetables powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 398-409.

收稿日期: 2023-11-06

基金项目: 广东省区域联合基金青年基金项目(2021A1515110660); 广东省驻镇帮镇扶村科技特派员项目(KTP20210380); 广东省重点领域研发计划项目(2021B0707060001)

作者简介: 丘梓慧(2002-),女,本科生,研究方向: 果蔬加工与功能食品开发, E-mail: qiuzihui2002@163.com

通讯作者: 彭进明(1992-),男,博士,副教授,研究方向: 果蔬加工与功能食品开发, E-mail: pengjimi@163.com

我国水果和蔬菜资源丰富,产量居全球首位,果蔬产业已成为乡村振兴的支柱产业^[1]。新鲜果蔬在采后的储存和运输过程中容易受到机械、化学和微生物的损害^[2]。干燥是常用的果蔬精深加工技术,可减少果蔬采后损失,提高果蔬的贮藏稳定性。果蔬粉作为一种果蔬干制品,具有可溶性固形物含量高、溶解吸收好、方便运输携带和天然安全等优点,已成为食品加工领域不可或缺的配料^[3]。

随着食品工业快速发展,传统粉碎技术已不能适应现代生产需要,超微粉碎技术作为一种新兴粉碎技术备受研究者关注。超微粉碎技术是借助机械或流体作用力使粒径在3 mm以上的物料颗粒克服自身凝聚力,粉碎至1 nm~100 μm的食品高新技术^[4]。相比普通粉体,超微粉体的比表面积较大,界面活性较高,生物利用率明显提升^[5]。目前超微粉碎技术已被广泛应用于制造果蔬粉,超微粉碎可促进果蔬活性物质释放,提升粉体的溶解性、分散性和固香性等理化性质,改善食品的加工特性和感官品质^[6]。

本文就超微粉碎果蔬粉的活性成分、物理特性与食品开发进行综述,以期为超微粉碎技术在果蔬加工中利用提供实践参考。

1 超微粉碎果蔬粉的活性成分

经不同方式粉碎后,果蔬物料的破坏程度不同,其中活性成分的释放率也不同。果蔬经超微粉碎处理后细胞壁被严重破坏,活性成分释放率高。另外,超微粉碎可在低温环境下进行,最大限度的保留了果蔬的活性成分。超微粉碎处理对果蔬粉中活性成分(多酚、多糖、维生素C、蛋白质和矿物质)的影响见表1。

1.1 多酚

相比普通粉碎(2.60 mg GAE/g),黑蒜经超微粉碎后多酚含量为3.81 mg GAE/g^[7]。气流和纳米超微粉碎的香菇伞粉总酚含量(4.73、4.44 mg GAE/g)均比普通粉碎处理组(4.17 mg GAE/g)高。经气流超微粉碎后的香菇柄粉总酚含量(4.20 mg GAE/g)高于普通粉碎处理组(3.95 mg GAE/g),纳米超微粉碎处理组(3.48 mg GAE/g)低于普通粉碎处理组^[8]。Zhu等^[9]发现相比300 μm苦瓜粗粉(约1.75 mg GAE/g),25 μm苦瓜超微粉的总酚含量(约2.5 mg GAE/g)更高。胥佳等^[10]发现相比普

通粉碎组,葡萄籽粉经超微粉碎后原花青素含量提高了28.50%。与粗粉相比,葡萄皮渣超微粉的总酚含量提高了24.41 mg GAE/g,原花青素含量提高了3.75 mg GAE/g^[11]。付美玲等^[12]比较超微粉碎对山楂黄酮提取率的影响,结果发现黄酮提取率随超微粉粒径的增大呈先上升后下降趋势。刺梨果渣超微粉的多酚溶出量(1.90 mg GAE/g)明显高于粗粉(0.81 mg GAE/g)^[13]。荔枝果渣经热泵干燥后分别进行普通和超微粉碎,结果发现相比普通粉碎,超微粉碎荔枝果渣的结合酚含量高20.80%^[14]。粒径14.55 μm的葡萄果渣超微粉中总酚含量(7.57 mg GAE/g)高于粒径283.20 μm的葡萄果渣粗粉(4.50 mg GAE/g)^[15]。粒径18.21 μm菠萝叶超微粉与粒径116.39 μm菠萝叶粗粉中总酚含量无显著差异^[16]。69.6、41.9、24.4、9.97和3.18 μm芦笋果渣超微粉中总酚含量分别为2.45、2.94、3.30、3.81和3.85 mg GAE/g,即粒径越小,总酚含量越高^[17]。

1.2 多糖

朱怡婷等^[18]发现相比毛竹笋粗粉中可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fiber, SDF, 3.11%),经30 s和60 s超微粉碎制备的毛竹笋超微粉中可溶性膳食纤维(SDF)分别增加至3.92%和5.01%;相比毛竹笋粗粉中不溶性膳食纤维(Insoluble Dietary Fiber, IDF)含量(34.27%),经过30 s和60 s超微粉碎后超微粉中IDF分别减少至31.35%和30.65%。相比梨果渣粗粉(粒径334.63 μm)中SDF(3.11%)和IDF(46.90%),梨果渣超微粉(粒径38.38 μm)中SDF增加至13.7%,IDF减少至44.50%^[19]。Hussain等^[20]研究发现,超微粉碎后莲藕粉中总膳食纤维含量变化不显著,而SDF含量显著提高,IDF含量显著降低。赵学旭等^[21]对沙棘果渣进行20~50 Hz范围内的超微粉碎,结果发现粉碎频率越高,沙棘果渣超微粉的粒径越小,不同粉碎频率下的超微粉SDF含量(>6.20%)均高于粗粉(4.01%),当粉碎强度达到30 Hz时,沙棘果渣粉的SDF含量达到最高(7.63%)。粒径115 μm的桑叶粗粉被粉碎为10 μm超微粉后,多糖含量由96.86 mg/g增加至157.68 mg/g^[22]。采用热水浸提、酶辅助热水提取和均质辅助热水提取不同粒径的桑葚多糖,结果发现不同提取方法下100目显著大于60目桑葚超微粉的多糖提取率^[23]。在不同频率(35、40和45 Hz)下对苹果渣超微粉碎20 min,结果发现相比粗粉SDF含量(8.50%),粉碎频率越高,超

微粉的 SDF 含量越高,当粉碎强度达 45 Hz 时, SDF 含量为 14.51%^[24]。粒径 474.47 μm 的水芹粗粉被粉碎为 23.52 μm 的超微粉后, SDF 含量从 5.57 mg/g 增加至 9.24 mg/g^[25]。甜菜浆粉经超微粉碎处理后粒径从 406.33 μm 降低到 24.93 μm , 果胶提取率从 15.81% 提高到 20.50%, 其中半乳糖醛酸含量从 38.51% 提高至 59.97%^[26]。采用双螺杆挤压(物料过筛目数 80 目、加水量 30%、螺杆转速 700 r/min)结合超微粉碎(粉碎频率 30 Hz、研磨压力 0.8 MPa、粉碎时间 20 min)处理猕猴桃粉后, 粒径从 165.05 μm 降至 15.86 μm , SDF 含量从 6.27% 增至 19.06%^[27]。

1.3 维生素C

大枣超微粉(17.73 μm)中维生素 C(Vitamin C, Vc)含量(1 113.34 g/100 g)高于粒径为 224.33 μm 的粗粉(857.57 g/100 g)^[28]。经过 8 min 超微粉碎的玫瑰果全果、果肉和种子, 其各自的超微粉中 Vc 含量(3.66、4.99、1.28 mg/g)均高于对应的粗粉(2.86、3.97、0.84 mg/g)^[29]。赵学旭等^[21]发现随着超微粉碎频率(20~50 Hz)的增大, 沙棘果渣超微粉中 Vc 含量呈先上升后下降趋势; 当粉碎频率为 30 Hz 时, 果渣超微粉中 Vc 含量最高, 约 3.46 mg/100 g。疏花蔷薇果中 Vc 含量随粒径的降低而升高, 粉末粒径小于 50 μm 时 Vc 含量最高, 达 2.12 mg/g^[30]。在超微粉碎 10 min 内, 菠萝蜜粗粉中 Vc 含量(14.55 mg/100 g)随粉碎时间的延长而减少, 超微粉碎 5 min 时 Vc 含量下降至 12.32 mg/100 g, 10 min 后 Vc 含量约为 10.49 mg/100 g^[31]。南瓜经超微粉碎处理, 南瓜粉中 Vc 含量随其粒度的减小而增加, 粒度大于 500 目时 Vc 含量(103.06 mg/100 g)高于 240~500 目(98.07 mg/100 g)、160~240 目(93.22 mg/100 g)和 80~160 目(85.23 mg/100 g)^[32]。粒径 > 250 μm 的胡萝卜粉中还原型 Vc 含量(38.56 mg/g)高于粒径 < 75 μm 的胡萝卜超微粉(24.77 mg/g)^[33]。

1.4 蛋白质

粒径 12.02 μm 的香菇超微粉中蛋白质含量(12 g/100 g)显著高于粒径 1 681.33 μm 的香菇粗粉(8 g/100 g)^[34]。粒径 65.40 μm 的辣木叶超微粉中蛋白质含量(25.30 g/100 g)显著低于粒径 319.30 μm 的辣木叶粗粉(27.45 g/100 g)^[35]。冷冻

干燥-超微粉碎制备的苦瓜超微粉(粒径 6.50 μm)中蛋白质含量(2.99 mg/g)显著高于热风干燥-普通粉碎制备的苦瓜超微粉(粒径 100 μm , 蛋白质含量 2.17 mg/g)^[36]。柑橘果渣粗粉经气流超微粉碎后, 粒径从 347.25 μm 降低至 24.09 μm , 蛋白质含量从 5.28 g/100 g 显著降低至 4.67 g/100 g^[37]。Bolade 等^[38]采用圆盘磨对脱皮去胚的白玉米胚乳颗粒进行研磨, 发现 300~425 μm 粒径范围内的玉米粉中蛋白质含量为 3.70%, 而 < 75 μm 的玉米粉中蛋白质含量降至 2.90%。相比普通粉碎制备的薇菜粗粉(粒径 234.31 μm)中蛋白质含量(1.13 g/100 mg), 行星球磨法和高压均质法制备的薇菜超微粉(粒径分别为 4.90 和 3.86 μm)的蛋白质含量分别上升至 1.55 和 2.47 g/100 mg^[39]。粒径 60.94 μm 的马铃薯渣超微粉与粒径 237.10 μm 的马铃薯粗粉中蛋白质含量无显著差异^[40]。竹笋壳超微粉(粒径 12.69 μm)与竹笋壳粗粉(粒径 383.90 μm)中蛋白质含量无显著差异^[41]。酸枣仁经超微冷冻粉碎后, 其蛋白提取率约为 76.56%, 较普通粉碎相比提高了 6.85%^[42]。粒径 13.18 μm 的猴头菇超微粉中蛋白质提取率(49.40%)高于粒径 1 500 μm 猴头菇粗粉(20%)^[43]。

1.5 矿物质

朱怡婷等^[18]研究发现超微粉碎后的毛竹笋中锌和铜元素无明显变化。翁丽萍等发现 100、200 目黑木耳超微粉中的钾、钠、镁、钙、铜、锌、锰和铁元素含量无显著差异^[44]。薛淑静等^[45]研究发现香菇盖超微粉(粒径 11.23 μm)中钙、铁、锌元素含量(150.42、421.70 和 255.58 $\mu\text{g/g}$)高于粒径 42.30 μm 的香菇柄粗粉(137.79、373.36 和 286.06 $\mu\text{g/g}$); 香菇柄超微粉(粒径 9.08 μm)中钙、铁、锌元素含量(153.75、369.27 和 259.85 $\mu\text{g/g}$)高于粒径 41.10 μm 的香菇柄粗粉(144.53、233.64 和 189.08 $\mu\text{g/g}$)。

2 超微粉碎果蔬粉的物理特性

果蔬经超微粉碎处理后, 其粒径和比表面积明显改变, 从而导致果蔬的一些物理性质发生变化。超微粉碎处理对果蔬粉物理特性(粒径、休止角和滑角、溶解度、膨胀力、持水力和阳离子交换能力)的影响见表 2。

表 1 超微粉碎处理对果蔬粉中活性成分的影响

活性成分	粉碎对象	影响	参考文献	
多酚	黑蒜	相比粗粉, 含量增加了 1.21 mg GAE/g	[7]	
	香菇伞	总酚含量均比普通粉碎处理组高	[8]	
	香菇柄	香菇柄粉总酚含量高于普通粉碎处理组	[8]	
	苦瓜	总酚含量高于 300 μm 苦瓜粗粉	[9]	
	葡萄籽	原花青素含量比普通粉提高了 28.50%	[10]	
	葡萄皮渣	总酚含量提高了 24.41 mg GAE/g	[11]	
	山楂	黄酮提取率呈先上升后下降趋势	[12]	
	刺梨	多酚溶出量高于粗粉	[13]	
	荔枝果渣	结合酚含量高粗粉 20.80%	[14]	
	葡萄果渣	总酚含量高于葡萄果渣粗粉	[15]	
	菠萝叶	总酚含量无显著性差异	[16]	
	芦笋果渣	随粒径减小, 总酚含量升高	[17]	
	多糖	毛竹笋	可溶性膳食纤维高, 不溶性膳食纤维低	[18]
		梨果渣	相比粗粉, 超微粉中 SDF 显著增加, IDF 显著降低	[19]
莲藕粉		相比粗粉, SDF 显著提高, IDF 显著降低	[20]	
沙棘果渣		相比粗粉, SDF 含量提高	[21]	
桑叶		多糖含量增加了 60.82 mg/g	[22]	
桑葚		100 目桑葚超微粉的提取率显著大于 60 目桑葚超微粉	[23]	
苹果渣		粉碎频率越高, 苹果渣超微粉的 SDF 含量越高	[24]	
水芹		SDF 含量比粗粉增加了 3.67 mg/g	[25]	
甜菜浆粉		半乳糖醛酸含量提高至 59.97%	[26]	
猕猴桃		SDF 含量增加了 12.79%	[27]	
维生素 C	冬枣	含量高于粗粉	[28]	
	玫瑰果全果、果肉、种子	含量均高于对应的粗粉	[29]	
	沙棘果渣	含量呈先上升后下降趋势	[21]	
	疏花蔷薇果	含量随粒径的降低而升高	[30]	
	菠萝蜜	含量随粉碎时间的延长而减少	[31]	
	南瓜	含量随其粒度的减小而增加	[32]	
	胡萝卜	含量低于胡萝卜粗粉	[33]	
蛋白质	香菇	较粗粉高 4 g/100 g	[34]	
	辣木叶	含量显著低于辣木叶粗粉	[35]	
	苦瓜	含量显著高于粒径 100 μm 的苦瓜超微粉	[36]	
	柑橘果渣	含量比超微粉低 0.61 g/100 g	[37]	
	白玉米胚乳	蛋白质含量降低 0.8%	[38]	
	薇菜	蛋白质含量比薇菜粗粉的高	[39]	
	马铃薯	与粗粉相比, 无显著差异	[40]	
	竹笋壳	与粗粉相比, 无显著差异	[41]	
	酸枣仁	较普通粉碎相比提高了 6.85%	[42]	
	猴头菇	提取率高于猴头菇粗粉	[43]	
矿物质	毛竹笋	超微粉碎前后锌、铜含量无显著变化	[18]	
	黑木耳	100、200 目超微粉的钾、钠、镁、钙、铜、锌、锰、铁含量无显著差异	[44]	
	香菇盖	相比粗粉, 钙、铁、锌含量提高	[45]	
	香菇柄	相比粗粉, 钙、铁、锌含量提高	[45]	

表 2 超微粉碎处理对果蔬粉物理特性的影响

Table 2 Influences of superfine grinding treatment on physical properties of fruits and vegetables powder

物理特性	粉碎对象	影响	参考文献
粒径	菠萝蜜	粒径减小	[31]
	苹果	粉碎时间越长, 粒径越小	[47]
	芡实	中小粒径粉末 (0~1 μm) 占比 72.47%	[48]
	胡萝卜果渣	IDF 超微粉粒径减小至 10.48 μm	[49]
	苹果皮	粉碎 5 和 15 min 后粒径分别为 47.45 和 24.95 μm	[50]
	蓝莓	粒径降低至 21.39 μm	[51]
	紫甘蓝	粒径降低至 18.10 μm	[51]
	紫番薯	粒径降低至 14.78 μm	[51]
休止角 滑角	姜	姜粉随粒径的减小, 其休止角和滑角逐渐减小	[4]
	鹰嘴豆芽	休止角和滑角均增大	[53]
	水芹	水芹粉粒径减小, 其休止角显著增加	[54]
	南瓜	休止角和滑角上升至 54.62° 和 69.13°	[55]
	黑枸杞	休止角和滑角增大到 52.99°、60.38°	[56]
	红薯叶	休止角和滑角减小至 30.96°、22.00°	[57]
	沙棘籽粕	IDF 超微粉休止角增大至 46.5°	[58]
溶解度	葡萄渣	粒径 < 18.83 μm 的葡萄渣粉溶解度最高	[59]
	石榴皮	随着石榴皮粉粒径减小, 溶解度显著增加	[60,61]
	菠萝皮渣	菠萝皮渣粉溶解度比粗粉高 3.02%	[62]
	荔枝浆渣	水溶性显著高于普通研磨粉	[14]
	番茄皮	粒径减小, 溶解度升高	[63]
	芹菜渣	粉碎 1 次后, 溶解度显著上升; 粉碎 3 次后, 溶解度趋于定值	[64]
	绿豆芽	溶解度从 35.57% 提高到 51.00%	[65]
膨胀力	广佛手	粉粒径越小, 水溶性越好	[66]
	洋蓟膳食纤维	相比普通粉碎, 膨胀力提高	[67]
	南瓜	粒径越小, 膨胀力越低	[55]
	咖啡果皮	膨胀力从 3.86 mL/g 增加到 6.14 mL/g	[68]
	芹菜根	膨胀力显著高于芹菜根粗粉	[69]
	猴头菇	粒径越小, 膨胀力越高	[43]
	香菇柄	粒径减小, 膨胀力增大	[70]
持水力	毛竹笋	持水力略微降低	[71]
	野刺梨果渣	持水力从 1.72 g/g 提高到 3.64 g/g	[13]
	黑枸杞	粒径越小, 持水力越大	[56]
	玉米	相比粗粉, 持水力增大	[72]
	甜菜果肉	相比粗粉, 持水力增大	[73]
	玫瑰香桃	持水力从 0.25 g/g 升高至 0.32 g/g	[74]
	山楂	持水力从 3.38 g/g 降低至 2.06 g/g	[75]
阳离子交换能力	苹果	1~5 min 内粉碎时间越长, CEC 越高, 10~30 min 内, 无显著差异	[47]
	苹果渣	由 0.07 mmol/g 上升到 0.13 mmol/g	[24]
	刺梨果渣	经超微粉碎后 CEC 提高	[76]
	橄榄果渣	从 4.10 mg Cu/g 上升至 5.80 mg Cu/g	[77]

2.1 粒径

粒径即粉体颗粒的大小,可用于评价超微粉碎效果^[46]。振动磨粉碎机粉碎菠萝蜜 5 min,获得的菠萝蜜超微粉粒径(14.22 μm)较菠萝蜜粗粉(64.08 μm)小^[31]。苹果经 1、3 和 5 min 超微粉碎,粉体粒径主要集中在小于 100 μm 的区域,随着超微粉碎时间延长,粉末粒径在小于 100 μm 的分布区域逐渐增大,超微粉碎时间为 10、20 和 30 min 时,粉末粒径主要集中在小于 50 μm 的区域,随着粉碎时间继续延长,粒径在小于 50 μm 的分布区域逐渐增大^[47]。张余等^[48]采用球磨法制备芡实超微粉,当转速 300 r/min,用料量/研磨球质量比 1/20,研磨球直径 6 mm,研磨时间 20 min 时,所得超微芡实粉中小粒径粉末(0~1 μm)占比 72.47%,是芡实粗粉(7.84%)的 9.24 倍。相比胡萝卜果渣 IDF 粗粉(粒径 302.29 μm),经球磨粉碎(料量/研磨球体积比 1/1,研磨球直径 3 mm,研磨时间 16 h)后胡萝卜果渣 IDF 超微粉粒径减小至 10.48 μm ^[49]。苹果皮粗粉(粒径 172.83 μm)经振动磨粉碎 5 min 和 15 min 后粒径为 47.45 μm 和 24.95 μm ^[50]。张佩雯等^[51]发现蓝莓、紫甘蓝和紫番薯粗粉经气流式超微粉碎机(转速 20 000 r/min,粉碎两次,每次 3 min)粉碎后,粒径分别从 139.92、127.52 和 100.62 μm 降低至 21.39、18.10 和 14.78 μm 。

2.2 休止角和滑角

休止角指颗粒堆积层的自由表面在静止状态下可以形成的最大夹角,粉体的休止角越小,则流动性越好。滑角又称滑动角,通常粉体的滑角越小,则流动性越好。休止角和滑角均可反映粉体的流动加工特性^[52]。姜粉随粒径的减小,其休止角和滑角逐渐减小,粒径 300、149、74、37 和 8.34 μm 姜粉的休止角分别为 51.50°、50.67°、49.37°、47.70° 和 46.33°,滑角分别为 45.80°、44.05°、41.88°、40.61° 和 39.50°^[4]。与常规粉碎(26.54°、53.15°)对比,碾轧式超微粉碎和行星式球磨粉碎后鹰嘴豆芽粉体的休止角和滑角均增大,其中碾轧式超微粉碎制备的鹰嘴豆芽粉体休止角和滑角分别为 33.69° 和 63.42°,行星式球磨制备的鹰嘴豆芽粉体休止角和滑角分别为 36.08° 和 60.84°^[53]。随着超微粉碎时间的延长,水芹粉粒径逐渐减小,其休止角显著增加^[54]。南瓜粉经 25 min 超微粉碎后休止角和滑角分别从 38.42° 和 60.56° 显著上升至 54.62° 和 69.13°^[55]。相

比剪切破碎的黑枸杞粉(粒径 141.82 μm),黑枸杞超微粉(粒径 36.51 μm)的休止角和滑角分别从 44.77°、49.56° 显著增大到 52.99°、60.38°^[56]。相比粒径 337.70 μm 的红薯叶粗粉,粒径 26.11 μm 的红薯叶超微粉的休止角和滑角分别从 42.15°、48.67° 显著减小至 30.96°、22.00°^[57]。沙棘籽粕 IDF 粗粉经球磨粉碎(研磨球直径 3~5 mm,研磨时间 6 h,转速 600 r/min)后粒径从 104.50 μm 降低至 72 μm ,休止角从 42.4° 显著增大至 46.5°^[58]。

2.3 溶解度

水溶性指数是反映粉体食品品质的重要指标。粒径 < 18.83 μm 的葡萄渣粉溶解度最高,80 °C 下 20 min 的溶解度为 32.48%,而粒径 > 300 μm 的葡萄渣粉的溶解度仅 19.38%^[59]。相同温度下,随着石榴皮粉粒径的减小,溶解度显著增加;相同粒径时,随着温度的升高,石榴皮超微粉的溶解度也显著增加^[60,61]。15 min 超微粉碎制备的菠萝皮渣粉溶解度比粗粉高 3.02%;随着菠萝皮渣粒径减小,溶解度逐渐增大^[62]。超细研磨荔枝浆渣粉的水溶性指数显著高于普通研磨荔枝浆渣粉^[14]。超微粉碎后过 300 目筛的番茄皮粉溶解度(11.54%)显著($P < 0.05$)高于超微粉碎后过 80 目筛的番茄皮粉(8.04%)^[63]。芹菜渣经超微粉碎 1 次后,粒径从 440.80 μm 减小至 59.03 μm ,溶解度从粗粉碎的 25.97% 提高至 35.86%,随着粉碎次数的增加,其水溶性增加减慢,超微粉碎 3 次时芹菜渣粉体粒径为 12.23 μm ,对应的水溶性为 37.30%^[64]。绿豆芽粗粉经气流超微粉碎(压力 0.5 MPa,转速 5 000 r/min)后溶解度从 35.57% 提高到 51.00%^[65]。刘东杰等^[66]研究发现五种不同粒径(1 342.97、297.65、24.64、21.55 和 20.01 μm)广佛手粉的水溶性分别为 18.40%、27.09%、39.42%、54.88% 和 64.49%,即超微粉碎处理后广佛手粉的水溶性显著增加,且粒径越小,水溶性越好。

2.4 膨胀力

膨胀力是反映粉体水合能力的重要参数,膨胀力越大,饱腹感越强^[49]。相比普通粉碎(膨胀力,4.82 mL/g),超微粉碎和低温冷冻-超微粉碎的洋蓍膳食纤维膨胀力提高,分别为 5.88 和 6.95 mL/g^[67]。南瓜粗粉经超微粉碎 0、5、10、15、20 和 25 min 后,粒径随时间的延长而减小,分别为 204、61、30、22、17 和 15 μm ,对应的膨胀力也逐渐降低,分别

为 21.70、14.73、13.56、13.41 和 13.19 mL/g^[55]。较传统粉碎而言, 经过超微粉碎的咖啡果皮粉溶解性显著增加, 从 3.86 mL/g 增加到 6.14 mL/g^[68]。芹菜根超微粉 (粒径 < 50 μm) 的膨胀力 (约 4 mL/g), 显著高于芹菜根粗粉 (粒径 > 355 μm) 的膨胀力 (1.50 mL/g)^[69]。常规辊磨处理的猴头菇粉的粒径分别为 243.60 μm, 5 000、9 000 和 16 000 r/min 气流磨制备猴头菇粉的平均粒径分别为 243.60、25.20、12.90 和 5.50 μm, 随着猴头菇粉粒径减小, 膨胀力逐渐升高, 分别为 5.90、6.26、7.36 和 11.28 mL/g^[43]。香菇柄经过气流超微粉碎后粉体的粒径从 185.23 μm 减小至 3.21 μm, 膨胀力从 2.32 mL/g 增加到 7.02 mL/g^[70]。

2.5 持水力

持水力是粉体亲水性能的重要指标之一, 粉碎机械力作用后粉体颗粒的空隙率、表面能和活性位点增多, 颗粒表面的羟基等基团与水分子的结合能力增强^[52]。毛竹笋干经振动超微粉碎后其膳食纤维持水力略有下降, 可能是因为超微粉碎破坏了笋干中纤维组织及其细胞结构, 粉体结构从网状变为棒条状, 从而使得毛细吸水作用减弱, 持水性能变差^[71]。野刺梨果渣粗粉经 25 min 超微粉碎后, 其持水力从 1.72 g/g 提高到 3.64 g/g^[13]。黑枸杞经过剪切破碎、球磨和超微粉碎后粒径分别为 141.82、103.40 和 36.51 μm, 1 h 浸泡后对应的持水力分别为 1.57、1.60 和 1.65 g/g^[56]。玉米超微粉 (粒径 13.77 μm) 的持水力 (20.16%) 显著高于玉米粗粉 (粒径 529.05 μm) 的持水力 (9.72%)^[72]。甜菜果肉超微粉 (粒径 24.90 μm) 的持水力 (5.40 mL/g), 显著高于甜菜果肉粗粉 (粒径 406.30 μm) 的持水力 (4.20 mL/g)^[73]。玫瑰香桃粗粉经超微粉碎后, 粒径从 86.93 μm 降低至 16.41 μm, 持水力从 0.25 g/g 升高至 0.32 g/g^[74]。山楂粗粉经超微粉碎后, 粒径从 201 μm 减小至 19.90 μm, 持水力从 3.38 g/g 降低至 2.06 g/g^[75]。

2.6 阳离子交换能力

粉体的阳离子交换能力 (Cation Exchange Capacity, CEC) 越高, 说明其营养价值越高。膳食纤维的羧基和羟基可以结合阳离子, 改变消化道内的瞬时浓度分布, 在消化道内产生较好的缓冲环境, 有利于消化吸收^[34]。陈如等^[47]发现苹果粗粉的 CEC 显著小于苹果超微粉, 随着超微粉碎时间的延长

(1、3、5 min), 粉体的 CEC 逐渐提高, 超微粉碎 10~30 min 内, CEC 差异不显著。苹果渣的 CEC 为 0.07 mmol/g, 在 40 和 45 Hz 的超微粉碎处理下, 其 CEC 显著上升到 0.13 mmol/g^[24], 这是由于超微粉碎导致更多的亲水基团 (羟基和羧基) 暴露。刺梨果渣经不同方式粉碎后的 CEC 排序为挤压-超微粉碎联用 > 超微粉碎 > 挤压加工, 这是因为刺梨果渣经挤压处理后, 膳食纤维中羧基和羟基类侧链基团的暴露面积增大^[76]。橄榄果渣粗粉经球磨机 (300 r/min, 5 h) 粉碎后平均粒径从 317 μm 减小到 17.80 μm, CEC 从 4.10 mg Cu/g 上升至 5.80 mg Cu/g^[77]。

3 超微粉碎果蔬粉的食品开发

添加超微粉碎果蔬粉既可赋予食品很好的分散性、溶解性和固香性, 又能改善食品感官品质, 促进营养成分吸收。因此, 果蔬超微粉目前已被广泛应用于食品领域 (面制品、功能食品、乳制品和肉制品), 详见表 3。

3.1 面制品

添加 1% (质量分数) 甘薯叶超微粉的面包比容、硬度、粘聚性、胶着性与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$), 甘薯叶超微粉面包的水分、总酚含量和 DPPH 自由基清除率较对照组高出 4.66%、0.67 mg GEA/g 和 11.90%^[78]。张月巧等^[79]研究了普通粉碎、气流超微粉碎、纳米超微粉碎和剪切超微粉碎处理对香菇柄/伞粉对面包品质的影响, 结果表明当添加量不超过 1% (质量分数) 时, 添加纳米和气流超微粉碎香菇伞粉的面包水分含量和比容更接近对照面包; 添加纳米超微粉碎香菇柄粉的面包色泽较白、亮度适中, 回复性和弹性较好, 咀嚼性较差, 硬度较低。杨久芳等^[80]比较添加葡萄籽粗粉、葡萄籽超微粉和脱脂葡萄籽超微粉的面包在消化前后的抗氧化活性, 结果发现脱脂葡萄籽超微粉强化面包的抗氧化能力在三者中最强。相比对照组 (硬度, 318.2 g; DPPH 自由基清除率, 约 30 mol Trolox/100 g), 添加 5% (质量分数) 黑木耳超微粉的面包硬度和 DPPH 自由基清除率分别提高至 2 337.10 g 和 35 μmol Trolox/100 g^[81]。相比对照组, 添加 3% (质量分数) 苦瓜超微粉的面团醒发体积降低了 355 mL, 对照组和苦瓜超微粉组制作的面包感官评分无显著差异^[82]。随着葡萄籽超

微粉添加量(5%、10%和15%,质量分数)的增加,蛋糕的感官品质和整体接受度无显著影响,强化型蛋糕的ABTS⁺自由基清除能力、Fe³⁺还原能力显著增强,当添加量大于10%时,酸价的增长速度显著减慢,过氧化值的增长速度也显著减慢,说明葡萄籽超微粉强化蛋糕的抗氧化活性强于传统蛋糕^[83]。相比添加粒径306.66 μm的海藻渣粗粉,添加海藻渣超微粉(10.42 μm)的蛋糕面糊粘度和密度提高,海藻渣粗粉蛋糕的嚼劲和硬度总体上高于超微粉碎组;这表明在不影响蛋糕质地和感官性能的前提下,用海藻渣超微粉替代部分蛋糕粉是提高蛋糕膳食纤维含量的有效方法^[84]。

3.2 功能食品

随着芦笋超微粉添加量增加(5%~25%,质量分数),咀嚼片的品质呈现先上升后下降趋势,当添加量为15%时,咀嚼片感官评分最高(92分),此

时的咀嚼片质地细腻,口感较好^[85]。金俐廷等^[86]研究表明随着苹果渣超微粉添加量增加(35%~55%,质量分数),咀嚼片感官评分逐渐降低,当添加量40%时口感最佳。随着椰子膳食纤维超微粉添加量增加(25%~45%,质量分数),咀嚼片的β-葡聚糖和总膳食纤维含量显著增加,最高含量分别可达3.73 g/100 g和21.6 g/100 g,同时咀嚼片硬度也随之增大,当添加量为35%(质量分数)时,咀嚼片的感官评分最高^[87]。黄婷等^[88]以10%预煮沸淀粉浆作为黏合剂,优化确定了红萝卜缨咀嚼片的最佳配方:萝卜缨超微粉20%、蔗糖15%、硬脂酸镁1.50%。迟晓君等^[89]确定苹果超微粉软糖的最佳配方为苹果超微粉添加量11%(质量分数),卡拉胶与魔芋粉比7:3,柠檬酸添加量0.48%,白糖添加量12%。刘佳梦等^[90]向龙眼超微粉中添加填充剂和甜味剂,直接压片制备龙眼超微粉含片,最佳工艺配方为龙眼超微粉50%(质量分数)、奶粉50%和木糖醇4%。

表3 超微粉碎果蔬粉在食品开发中的应用

Table 3 Application of superfine grinding fruits and vegetables powder in food development

产品类型	超微粉	应用情况	参考文献
面制品	甘薯叶	面包水分、总酚含量和DPPH自由基清除率提高	[78]
	香菇柄	面包水分含量和比容更接近对照面包	[79]
	香菇伞	面包回复性和弹性较好,咀嚼性较差	[79]
	葡萄籽	面包的抗氧化能力增强	[80]
	黑木耳	面包的硬度和DPPH自由基清除率均提高	[81]
	苦瓜	面团醒发体积降低	[82]
	脱脂葡萄籽	蛋糕的ABTS ⁺ 自由基清除能力显著增强	[83]
	海藻渣	面糊粘度和密度提高,蛋糕嚼劲和硬度提高	[84]
功能食品	芦笋	添加量增加(5%~25%),咀嚼片的感官品质先上升后下降	[85]
	苹果渣	添加量增加(35%~55%),咀嚼片的感官评分逐渐下降	[86]
	椰子膳食纤维	添加量增加(25%~45%),咀嚼片的感官品质先上升后下降	[87]
	红萝卜缨	咀嚼片中红萝卜缨超微粉添加量为20%	[88]
	苹果	软糖中苹果超微粉添加量为11%	[89]
	龙眼	含片中龙眼超微粉添加量为50%	[90]
乳制品	猴头菇	猴头菇酸奶中维生素C、总蛋白质和总氨基酸含量均提高	[91]
	双孢菇	超微粉(粒径13.78 μm)可显著改善溶豆的色泽,但对最终产品的口感带来负面影响	[92]
	菠萝渣膳食纤维	相比对照组,添加0.9%菠萝渣膳食纤维超微粉的冰淇淋膨胀率和感官评分均显著下降	[93]
	朝鲜蓟茎叶	添加超微粉后,奶茶中17种多酚的含量显著增加	[94]
肉制品	苹果渣	经30 d储存,相比普通香肠,添加苹果渣超微粉的香肠过氧化值升高,TBARS值降低	[95]
	葡萄皮渣	香肠L*为54.68,pH值和TBARS达6.27和0.92	[96]
	猕猴桃渣	猪肉丸脂肪含量降低,纤维含量提高	[97]
	番茄皮	经48 d储存,相比添加番茄皮粗粉,添加番茄皮超微粉后香肠的TBARS值、L*和a*值增大	[98]
	番茄皮渣	添加后,香肠硬度、弹性、L*与a*均降低,b*值增大	[99]

3.3 乳制品

相比普通酸奶,添加1% (质量分数) 猴头菇超微粉的酸奶中维生素C、总蛋白质和总氨基酸含量分别提高7.39 $\mu\text{g/mL}$ 、2.95 g/L 和 16.66 mol/L; 且钾和磷含量显著提高,磷含量增幅达到372.36%^[91]。随着双孢蘑菇粉粒径降低,酸奶溶豆的硬度、粘度和浓稠性呈先升高后降低趋势,添加双孢蘑菇超微粉 (粒径13.78 μm) 可显著改善溶豆的色泽,但对最终产品的口感带来负面影响^[92]。相比对照组,添加0.9% (质量分数) 菠萝渣膳食纤维超微粉的冰淇淋膨胀率和感官评分显著降低^[93]。范卓妍等^[94]发现添加15% (质量分数) 朝鲜蓟茎叶超微粉后,奶茶中17种多酚的含量显著增加,其中包括5种黄酮和12种酚酸。

3.4 肉制品

相比普通香肠 (过氧化值,约0.01%; 硫代巴比妥酸值,约1.40 mg/100 g),添加0.80% (质量分数) 的苹果渣超微粉的香肠储存30 d后过氧化值和硫代巴比妥酸值 (TBARS) 分别约为0.05% 和 0.80 mg/100 g^[95]。在香肠中加入1% (质量分数) 超微葡萄皮渣粉香肠 L^* 值为54.68,较对照组降低了约12.09,香肠贮藏12 d后pH值和TBARS值达6.27和0.92,显著低于对照组,香肠弹性和黏聚性无显著变化^[96]。在高脂肪猪肉丸中添加猕猴桃渣不溶性膳食纤维超微粉 (KWIDF) 可提高纤维含量,降低脂肪含量, KWIDF 可以保护肉丸的组织间隙,稳定肉丸结构,提高肉丸的氧化稳定性,乳状稳定性和水/脂肪结合能力; 添加3% (质量分数) KWIDF 的肉丸与对照组的感官和质构特性类似^[97]。添加番茄皮超微粉 (粒径约25 μm) 的香肠储存48 d后TBARS值达0.75 mg MDA/kg,高于添加常规粉碎番茄皮粉 (粒径约150 μm) 的香肠 (0.61 mg MDA/kg), 香肠 L^* 和 a^* 值达到54.26和11.36,高于添加番茄粗粉的香肠^[98]。王强等^[99]发现超微粉碎后的番茄皮渣粉显著降低了香肠的硬度、弹性、 L^* 和 a^* 值,且 b^* 值高出对照组154%,这表明番茄皮渣超微粉的脂肪替代效果较差。

4 总结

综上所述,超微粉碎技术是一种优异的果蔬粉体加工技术。绝大多数的果蔬经过超微粉碎处理后多酚、多糖和维生素C含量增多,蛋白质含量减少,

矿物质含量基本不变; 粉体的物理特性 (粒径、休止角和滑角、溶解度、膨胀力、持水力和阳离子交换能力) 得到有效改善,更能满足后续加工需要; 果蔬超微粉目前已广泛应用于面制品、功能食品、乳制品和肉制品开发,具有广阔的市场前景。尽管果蔬超微粉的优势明显,但仍有不足之处,未来可以从以下几个方面开展深入研究: ①强化果蔬超微粉加工工艺的基础研究,制定统一的果蔬超微粉生产标准; ②结合杀菌技术防止果蔬超微粉在储存过程中被微生物污染; ③确定适宜的包装技术和储存条件避免果蔬超微粉氧化、吸潮; ④推动果蔬超微粉从理论研究转化为实际生产,降低企业的生产成本,进一步提高超微粉碎技术在果蔬制粉中应用价值。

参考文献

- [1] 朱经楠,彭健,辜青青,等.射频加热技术及其在果蔬干燥中的应用研究[J].食品工业科技,2022,43(16):432-441.
- [2] CHEN B, ZHANG M, CHEN H Z, et al. Progress in smart labels for rapid quality detection of fruit and vegetables: A review [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 198: 112261.
- [3] 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.
- [4] ZHAO X Y, YANG Z B, GAI G S, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 217-222.
- [5] DUGUMA H T, ZHANG L Y, OFOEDU C E, et al. Potentials of superfine grinding in quality modification of food powders [J]. CyTA-Journal of Food, 2023, 21(1): 530-541.
- [6] 梅桂斌.超微粉碎技术在果蔬制粉中的应用及发展前景[J].现代食品,2017,14:36-38.
- [7] 罗海青.黑蒜营养成分分析及抗氧化作用研究[D].扬州:扬州大学,2016.
- [8] 张小利,夏春燕,王慧清,等.超微粉碎对香菇多酚组成及抗氧化活性的影响[J].食品科学,2015,36(11):42-49.
- [9] ZHU Y, BAI J, QIAN X W, et al. Effect of superfine grinding on physical properties, bioaccessibility, and anti-obesity activities of bitter melon powders [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(11): 4473-4483.
- [10] 胥佳,魏嘉颐,李锦麟,等.超微粉碎处理对葡萄籽中原花青素和脂肪酸成分的影响[J].中国农学通报,2011, 27(17):92-97.
- [11] 徐春雅.葡萄皮渣超微粉体特性及辐照灭菌的研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2009.

- [12] 付美玲,李丹丹,修建华.超微粉碎对山楂黄酮类化合物抗氧化活性的影响[J].食品研究与开发,2022,43(14):118-124.
- [13] 任亚梅,袁春龙,叶淑瑶,等.野刺梨果渣超微粉加工技术研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(4):134-139.
- [14] XIONG X, CAO X J, ZENG Q Z, et al. Effects of heat pump drying and superfine grinding on the composition of bound phenolics, morphology and microstructure of lychee juice by-products [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 144: 111206.
- [15] ZHAO X Y, ZHU H T, ZHANG G X, et al. Effect of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activity of red grape pomace powders [J]. Powder Technology, 2015, 286: 838-844.
- [16] CUI L H, LI J H, WANG Z, et al. Effects of superfine grinding on the structure, bioactive components and antioxidant activity of pineapple leaf fiber [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 611: 012052.
- [17] GAO W J, CHEN F, ZHANG L F, et al. Effects of superfine grinding on asparagus pomace. Part I: Changes on physicochemical and functional properties [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(6): 1827-1833.
- [18] 朱怡婷,李状,黄晓兵,等.超微粉碎对毛竹笋微观结构及营养成分的影响[J].热带作物学报,2015,36(5):937-941.
- [19] YAN L, LI T, LIU C H, et al. Effects of high hydrostatic pressure and superfine grinding on the physicochemical and functional properties of pear pomace [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 107: 171-177.
- [20] SHEHZAD H, LI J, JIN W J, et al. Effect of micronisation on dietary fibre content and hydration properties of lotus node powder fractions [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(3): 590-598.
- [21] 赵学旭,武蕊,衣春敏,等.沙棘果渣粉的超微冷冻粉碎制备及其理化性质与结构特性[J].现代食品科技,2022,38(5):87-95.
- [22] MENA E H, LIU T, LIAO X Y, et al. Effect of superfine grinding on the phytochemicals and antioxidant activities of mulberry leaves [J]. Science Journal of Public Health, 2016, 4(3): 138.
- [23] LI M, LI T, HU X Y, et al. Structural, rheological properties and antioxidant activities of polysaccharides from mulberry fruits (*Morus alba* L.) based on different extraction techniques with superfine grinding pretreatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 1774-1783.
- [24] YAN T C, LIU R, SHI L, et al. Superfine grinding improves the physicochemical, sensory and functional characteristics of Hanfu apple pomace [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(4): 2077-2084.
- [25] 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.
- [26] HUANG X, LI D, WANG L J. Effect of particle size of sugar beet pulp on the extraction and property of pectin [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 218: 44-49.
- [27] 刘宁,林萍,陈雪峰,等.螺杆挤压-超微粉碎联合改性对猕猴桃可溶性膳食纤维的影响[J].食品研究与开发,2022,43(19):143-148.
- [28] 夏晓霞,寇福兵,薛艾莲,等.超微粉碎对枣粉理化性质、功能特性及结构特征的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(12):37-45.
- [29] SUN J, ZHANG A R, WANG N, et al. Effect of superfine pulverization technology on the determination of vitamin C content in *Fructus rosae laxae* [J]. JPC-Journal of Planar Chromatography - Modern TLC, 2020, 33: 161-167.
- [30] 张爱荣,孙晶,贺元,等.超微粉碎技术对疏花蔷薇果中总有机酸和维生素C溶出的影响[J].时珍国医国药,2020,31(7):1619-1622.
- [31] 王萍,陈芹芹,毕金峰,等.超微粉碎对菠萝蜜超微全粉品质的影响[J].食品工业科技,2015,36(1):144-148.
- [32] 范明月,吴昊,张宏斌,等.超微南瓜粉物化特性及抗氧化活性的研究[J].中国食品学报,2014,14(2):67-71.
- [33] 聂波.胡萝卜干燥特性及超微粉碎粉体性质研究[D].郑州:河南工业大学,2016.
- [34] GONG P, HUANG Z H, GUO Y X, et al. The effect of superfine grinding on physicochemical properties of three kinds of mushroom powder [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(8): 3528-3541.
- [35] HUANG X, LIANG K H, 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.
- [36] ZHU Y, DONG Y, QIAN X W, et al. Effect of superfine grinding on antidiabetic activity of bitter melon powder [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2012, 13(11): 14203-14218.
- [37] TAO B B, YE F Y, 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.
- [38] BOLADE M K, ADEYEMI I A, OGUNSUA A O. Influence of particle size fractions on the physicochemical properties of maize flour and textural characteristics of a maize-based nonfermented food gel [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44(3): 646-655.

- [39] 符群,李卉,王振宇,等.超微粉碎提高薇菜粉活性成分的生物利用率[J].现代食品科技,2018,34(4):45-50,55.
- [40] 牛潇潇,梁亮,王宁,等.超微粉碎及不同粒度对马铃薯渣功能特性的影响[J].中国粮油学报,2022,37(1):37-45.
- [41] 杨荣,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.
- [42] 谭力铭,裴海生,赵丹丹,等.超微冷冻粉碎处理下酸枣仁蛋白提取工艺优化[J].食品工业科技,2020,41(23):122-128.
- [43] PHAT C, LI H, LEE D U, et al. Characterization of *Hericium erinaceum* powders prepared by conventional roll milling and jet milling [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 145: 19-24.
- [44] 翁丽萍,王贤波,姜慧燕,等.不同粒径粉碎处理对黑木耳粉品质的影响[J].食品工业,2020,41(7):326-329.
- [45] 薛淑静,叶佳琪,杨德,等.超微粉碎促进香菇粉Ca、Fe、Zn的溶出及消化吸收[J].现代食品科技,2021,37(7):176-183.
- [46] ZHANG Z Q, CHEN S C, WANG Q L, et al. Effects of traditional grinding and superfine grinding technologies on the properties and volatile components of *Protaetia brevitarsis* larvae powder [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 173: 114307.
- [47] 陈如,何玲.超微粉碎对苹果全粉物化性质的影响[J].食品科学,2017,38(13):150-154.
- [48] 张余,陈志宏,刘洋,等.球磨法制备芡实超微粉及其理化功能性质分析[J].食品与发酵工业,2024,50(11):241-246.
- [49] MA S B, REN B, DIAO Z J, et al. Physicochemical properties and intestinal protective effect of ultra-micro ground insoluble dietary fibre from carrot pomace [J]. Food & Function, 2016, 7(9): 3902-3909.
- [50] 马千程,易建勇,毕金峰,等.干燥方式和粉碎程度对苹果皮全粉理化特性及酚类生物利用度的影响[J].核农学报,2021,35(7):1583-1592.
- [51] 张佩雯,黄光捷,骆昌锦,等.利用超微粉碎提高花色苷生物可接受率[J].食品研究与开发,2021,42(6):85-89, 95.
- [52] GAO W J, CHEN F, WANG X, et al. Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 2222-2255.
- [53] 王士佳,张璐,葛善赢,等.两种粉碎机型式对鹰嘴豆芽超微粉食用品质的影响[J].食品安全质量检测学报,2022, 13(20):6699-6705.
- [54] 唐明明,孙汉巨,赵金龙,等.超微粉碎对水芹粉末理化性质及抗氧化活性的影响[J].现代食品科技,2019,35(7):55-65.
- [55] 邓凯波,黄雅萍,代亚萍,等.超微粉碎对南瓜粉物化及其粉糊流变性质的影响[J].东北农业大学学报,2018, 49(11):42-49.
- [56] ZHANG J T, DONG Y S, FANG Z X, et al. Effect of superfine-grinding on the physicochemical and antioxidant properties of *Lycium ruthenicum* Murray powders [J]. Powder Technology, 2020, 372: 68-75.
- [57] LI G H, GAO X L, WANG Y H, et al. Effects of superfine grinding sweet potato leaf powders on physicochemical and structure properties of sweet potato starch noodles [J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11: 6498-6508.
- [58] ZHU Y L, JI X L, WANG M, et al. Effects of ball milling combined with cellulase treatment on physicochemical properties and *in vitro* hypoglycemic ability of sea buckthorn seed meal insoluble dietary fiber [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 820672.
- [59] ZHU F M, DU B, LI J. Effect of ultrafine grinding on physicochemical and antioxidant properties of dietary fiber from wine grape pomace [J]. Food Science and Technology International, 2014, 20(1): 55-62.
- [60] 代红飞,傅茂润,邵秀芝.超微粉碎石榴皮粉的理化性质和抗氧化活性[J].中国果菜,2015,35(6):21-25.
- [61] ZHONG C, ZU Y G, ZHAO X H, 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.
- [62] 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.
- [63] CHI X J, YUE F L, JING R J, et al. Effect of ultra-fine pulverization on the properties of tomato peel residues [J]. Waste and Biomass Valorization, 2019, 10(6): 1649-1654.
- [64] 李昌文,张丽华,胡少帅,等.超微粉碎对芹菜渣理化特性的影响[J].食品工业,2021,42(7):150-153.
- [65] 梁雪梅,林欣梅,魏美霞,等.气流超微粉碎对绿豆芽物理特性与抗氧化活性的影响[J].食品与机械,2020,36(11): 33-38.
- [66] 刘东杰,刘祎帆,梁贵强,等.广佛手超微粉的制备及其理化性质分析[J].现代食品科技,2023,39(11):160-167.
- [67] 王雅怡,付晓康,贺便,等.不同处理方法对洋蓟膳食纤维结构及理化性质的影响[J].食品工业科技,2022,43(22): 83-89.
- [68] 罗白玲,刘敦华,董文江,等.超微粉碎对咖啡果皮理化性质、结构及吸附能力的影响[J].热带作物学报,2020, 41(6):1219-1226.
- [69] SUN J, WANG N, WANG C Y, et al. Effects of superfine pulverization technology on the morphology, microstructure, and physicochemical properties of *Apium graveolens* L. root [J]. Microscopy Research and Technique, 2022, 85(7): 2455-2466.
- [70] 王维涛,牛犇,刘瑞玲,等.气流超微粉碎对香菇柄粉末理化及溶出特性的影响[J].食品工业科技,2023,44(23):101-109.
- [71] 李状,朱德明,李积华,等.振动超微粉碎对毛竹笋干物化

- 特性的影响[J].农业工程学报,2014,30(3):259-263.
- [72] 刘颖,高帅,张云亮,等.超微粉碎对大豆、玉米、发芽糙米物化特性影响[J].食品科技,2020,45(9):168-173.
- [73] 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, 2018, 87: 203-209.
- [74] GAO X B, ZHU D H, LIU Y J, et al. Physicochemical properties and anthocyanin bioaccessibility of downy rose-myrtle powder prepared by superfine grinding [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 2022-2032.
- [75] ZHAO Y Y, WU X, WANG Y J, et al. Comparing physicochemical properties of hawthorn superfine and fine powders [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(2): e12834.
- [76] 孟满,张瑜,林梓,等.不同物理方法处理刺梨果渣理化性质分析[J].食品科学,2017,38(15):171-177.
- [77] SPERONI C S, BENDER A B B, STIEBE J, et al. Granulometric fractionation and micronization: A process for increasing soluble dietary fiber content and improving technological and functional properties of olive pomace [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 130: 109526.
- [78] 董晓琳,马丽苹,边雪洁,等.甘薯叶粉添加量对面包品质、抗氧化性及淀粉消化性的影响[J].食品与发酵工业, 2024,50(1):196-203.
- [79] 张月巧,陈龙,卢可可,等.添加不同粉碎香菇粉对面团发酵特性及面包品质的影响[J].现代食品科技,2016,32(2): 211-220.
- [80] 杨久芳,满媛,李淑艳,等.不同粉碎处理的葡萄籽粉强化面包抗氧化活性研究[J].现代食品科技,2016,32(7):188-194.
- [81] 袁彪.两种富集食用菌超微粉面包特性及风味物质研究[D].南京:南京财经大学,2013.
- [82] 刘学俊,井瑞洁,于辉.苦瓜超微粉营养面包的制作工艺及配方研究[J].食品工业,2011,32(11):13-15.
- [83] 金青,何永晞,张婷,等.强化葡萄籽超微粉蛋糕的感官品质及其抗氧化研究[J].食品工业科技,2016,37(1):80-85.
- [84] GAN L J, YOU Q, LUO Y M, et al. Effect of superfine grinding *Sargassum fusiforme* residue powder on sponge cakes properties [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 165: 113735.
- [85] 迟晓君,秦洋,邢文阳,等.芦笋猕猴桃超微粉咀嚼片的研制[J].山东农业工程学院学报,2022,39(10):37-42.
- [86] 金俐延.超微粉碎对寒富苹果渣理化性质的影响及高纤片剂的研制[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [87] 张木炎,郑亚军.功能性椰子膳食纤维咀嚼片制备工艺的研究[J].热带作物学报,2011,32(12):2363-2366.
- [88] 黄婷,段玉清,张海晖,等.萝卜缨营养咀嚼片工艺及其特性研究[J].食品研究与开发,2016,37(2):84-87.
- [89] 迟晓君,王童,徐镇祥,等.苹果超微粉软糖的研制[J].山东农业工程学院学报,2017,34(3):43-46.
- [90] 刘佳梦,王梓涵,林丽静,等.龙眼超微粉含片的配方优化及品质评价[J].食品研究与开发,2022,43(21):99-107.
- [91] 庞泽翀,黄君红.猴头菇超微粉酸奶的研制及营养成分测定[J].中国乳业,2022,1:88-93.
- [92] 陈璵.双孢蘑菇酸奶溶豆的制备及食用品质研究[D].武汉:武汉轻工大学,2022.
- [93] 孙莹,姜淑蕾,高志洁,等.菠萝渣超微膳食纤维冰淇淋的研制[J].食品研究与开发,2023,44(4):100-106.
- [94] 范卓妍,班尹,黄威,等.朝鲜蓟副产物超微粉强化茶饮料的功能性成分研究[J].中国食品学报,2022,22(1):332-341.
- [95] 樊振江,纵伟.超微苹果渣粉在香肠中的应用研究[J].肉类研究,2008,8:31-32,35.
- [96] 陶姝颖,令博,明建.超微粉碎葡萄皮渣膳食纤维对低温香肠品质及贮藏稳定性的影响[J].肉类研究,2012,26(6):28-33.
- [97] ZHAO D W, GUO C X, LIU X B, et al. Effects of insoluble dietary fiber from kiwi fruit pomace on the physicochemical properties and sensory characteristics of low-fat pork meatballs [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(4): 1524-1537.
- [98] WANG Q, XIONG Z W, LI G J, et al. Tomato peel powder as fat replacement in low-fat sausages: Formulations with mechanically crushed powder exhibit higher stability than those with airflow ultra-micro crushed powder [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2016, 118: 175-184.
- [99] 王强,李贵节,赵欣,等.不同粒径番茄皮渣对香肠中脂肪替代效果的影响[J].食品工业科技,2014,35(7):69-72,79.