

超微粉碎技术对粮食产品营养物质及特定生理功能影响的研究进展

Research progress on the effects of ultrafine grinding technology on nutrients and specific physiological functions of grain products

杨蕾^{1,2} 贾艳菊¹ 刘敬科² 生庆海^{1,3} 王运亭²

YANG Lei^{1,2} JIA Yanju¹ LIU Jingke² SHENG Qinghai^{1,3} WANG Yunting²

(1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061; 2. 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 河北 石家庄 050051; 3. 河北农业大学食品科技学院, 河北 保定 071001)

(1. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050051, China; 3. College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China)

摘要:超微粉碎是一种能将物料粉碎至微米级甚至纳米级的先进技术,具有节约物料、粉碎速度快和粉体粒度均匀且细的显著优势,近年来逐渐被应用在粮食作物前处理中,对生产口感好、营养物质溶出率高和功能性强食品具有积极意义。文章总结了7种超微粉碎技术的分类及优缺点,综述了超微粉碎技术对粮食营养物质(蛋白质、淀粉、脂肪、膳食纤维和酚类物质)和特定生理功能(调节血糖、血压、血脂、抗氧化和减少有害物质)的影响,并对超微粉碎技术在粮食产业的发展方向进行了展望。

关键词:超微粉碎;粮食;营养物质;特定生理功能

Abstract: Ultrafine grinding is an advanced technology that can grind materials down to the micron or even nanometer level, with significant advantages of material savings, fast grinding speed, and uniform and fine powder particle size. Recently, it has gradually been applied in the pre-treatment of grain crops, which has positive significance for the production of food with good taste, a high nutritional material dissolution rate, and strong functionality. This review summarizes the classification, advantages, and disadvantages of 7 different types of ultrafine

grinding technology. The effect of ultrafine grinding technology on the nutrients (protein, starch, fat, dietary fiber and phenolic compound) and specific physiological functions (regulating blood glucose, blood pressure, blood lipid, antioxidant, and reducing harmful substances) of grains were also discussed, for providing a theoretical basis for the future research and development of grain products.

Keywords: ultrafine grinding; grain; nutrients; specific physiological functions

中国粮食作物(涉及谷类、豆类和薯类作物)产量大、品种多,营养物质丰富,在预防疾病等方面发挥重要作用,开发前景广阔^[1]。但粮食表皮粗糙坚硬,而传统粉碎技术(如石磨、钢磨和碾磨等)主要通过刀片旋转或机械摩擦粉碎粮食,在粉体的粒度(0.15 mm左右)、出粉率、质量及营养成分释放等方面有一定局限性。因此,寻找一种改善粮食产品品质的粉碎技术是当下研究热点。

超微粉碎技术是一种利用机械或流体动力学使0.5~5.0 mm物料内部解聚至微米甚至纳米级的进步性技术(图1),与传统粉碎相比,具有节约物料、粉碎速度快和粉体粒度均匀且细的优势^[2]。一定程度上,超微粉碎技术不仅能提升粮食的口感,还能增强机体对粮食营养物质的吸收利用,更有利于发挥粮食功能特性^[3-4]。文章拟总结超微粉碎技术的分类及优缺点,综述超微粉碎技术对粮食营养物质和某些特定功能特性的影响,为粮食产业的发展和功能食品的研究提供参考。

基金项目:河北省重点研发计划项目(编号:21327112D);河北省农林科学院国际科技合作项目资助(编号:2023KJ CXZX-SSS-GH01)

作者简介:杨蕾,女,河北经贸大学在读硕士研究生。

通信作者:贾艳菊(1977—),女,河北经贸大学教授,博士。

E-mail:909479470@qq.com

王运亭(1993—),女,河北省农林科学院助理研究员,硕士。E-mail:wyt15731113407@163.com

收稿日期:2023-04-14 **改回日期:**2023-09-15

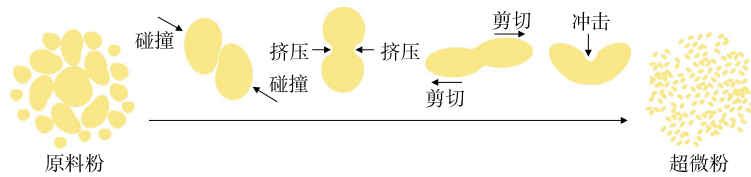


图 1 超微粉碎技术的原理

Figure 1 The principle of ultrafine grinding technology

1 超微粉碎技术简介

根据研磨介质不同,超微粉碎技术分为干法和湿法粉碎(表 1)。干法粉碎是在干燥条件下粉碎物料,可生产出良好吸附性、膨胀性和水溶性等特质的超微粉体^[12];湿法粉碎是粉碎(半)流动性物料,与干法粉碎相比,具粉尘危害小和发热量少等优势,同时具均质和乳化效果,使产品口感更细腻^[13]。

2 超微粉碎对粮食营养物质的影响

2.1 蛋白质

研究发现,超微粉碎可提高总蛋白^[14]、可溶蛋白^[15]和醇溶蛋白^[16]等蛋白质溶出率。可能是超微粉碎使粮食粉中的蛋白质和淀粉、类脂体等聚集成的大颗粒被充分粉碎为游离状态,导致蛋白质溶出率增加。但也有研究^[17]发现超微粉碎会降低粮食蛋白质含量,可能是由于粉碎过程中部分蛋白质被破坏降解。超微粉碎还会改变粮食蛋白质的高级结构,使蛋白质分子链舒展,使亲水基团和二硫键等暴露。郭武汉等^[18]发现小麦面筋蛋白经气流粉碎机粉碎后,粒度降低,总巯基含量减小,暴露巯基含量先增大后减小,可能是暴露巯基被氧化形成蛋白交

联,产生了新的二硫键;同时, β -折叠和无规卷曲结构增加, α -螺旋和 β -转角结构减少,进一步表明超微粉碎增加了小麦面筋蛋白分子的柔性。

2.2 淀粉

粉体粒度随超微粉碎时间延长不再减小即粉碎达到平衡,继续粉碎导致颗粒破坏,表面活性基团和表面张力不断增大,产生团聚现象,使淀粉粒度出现先减小再增加的现象^[19]。超微粉碎会破坏与淀粉结合的大颗粒物质,释放其中的淀粉,增加淀粉溶出率^[20];但 Xu 等^[17]采用气流粉碎机粉碎苦荞粉,发现淀粉含量降低,可能是受到不同粉碎条件和粉碎过程中产生的热量影响导致的。结构上,超微粉碎使淀粉分子化学键断裂,晶体结构被破坏,淀粉结构崩塌^[21]。性质上,结构崩塌的淀粉易膨胀生成胶状分散物而糊化,但淀粉粒度减小后吸水膨胀能力减弱不容易破裂,糊化稳定性增强。同时,被破坏的淀粉在回生过程中重新排列缔合结晶的能力减弱,淀粉老化程度降低,回生值减小^[22]。组成上,超微粉碎提高了损伤淀粉含量,且干法粉碎产生的损伤淀粉量高于湿法^[23],这是因为水分子不仅能作为增塑剂提高淀粉韧性,也能吸收部分机械能减少淀粉损伤。

表 1 超微粉碎技术的分类及优缺点

Table 1 Classification, advantages and disadvantages of ultrafine grinding technology

分类	粉碎方式	原理	粉碎介质	适宜的物质	优点	缺点	参考文献
干法	气流式	气流→碰撞、摩擦、剪切、冲击	空气、过热水蒸气、惰性等	富含热敏成分、不含挥发性成分的原料	污染低,精度高,产热少	成本高、产率低	[5]
	冲击式(锤击式、盘击式、销棒式等)	冲击(主要作用)、碰撞和剪切	无	中等硬度物质,热敏物料要采取措施	效率高、运转稳定	易磨损、发热升温	[6]
干/湿法	振动式	高频振动→冲击、摩擦和剪切	瓷球或金属球/棒等	高硬度物料加工	效率高、结构简单、可低温粉碎	介质填充率高、噪声大	[7]
	球磨式	动能→冲击、挤压、摩擦		物料适应性强	生产能力大	能耗高,耗时	[8]
湿法	均质式	剪切、湍流、空化	水或其他液体	适用范围较广	操作简单、易于控制、速度快	能耗高、成本	[9]
	胶体磨式	剪切、摩擦、湍动		高黏性物料	操作简单、占地面积小、能耗低	产率低、易磨损	[10]
	高压微射流	高压→空穴、水楔、冲击		高硬度物料	纯度高、颗粒粒级集中	射流腔道窄、处理量小	[11]

2.3 脂肪

超微粉碎会改变脂肪溶出率。王士佳等^[24]发现鹰嘴豆芽经碾轧式超微粉碎机和行星式球磨仪处理后,脂肪含量从 3.16% 分别增加至 6.17% 和 4.83%, 是由于超微粉碎使粮食粉比表面积增大, 皮层中的脂肪逐渐裸露, 脂肪含量增加。但许青莲等^[25]利用纳米研磨法超微粉碎苦荞粉发现, 脂肪含量从 4.08% 降至 0.50%, 可能是游离出来的脂肪黏附在机器壁上。与湿法粉碎相比, 干法粉碎的超微粉中脂肪含量更高, 且低温条件下提取效果更好^[26], 可能是高温、含水等条件, 使脂肪酸链断裂、脂肪水解, 导致脂肪含量减少。

2.4 膳食纤维

超微粉碎仅会改变粮食较大的空间结构, 将膳食纤维(包括可溶性和不溶性膳食纤维)与结合相对较弱的淀粉、蛋白质及其他较大分子量物质剥离, 而不形成新的物质和基团^[27]。超微粉碎使不溶性膳食纤维溶出率下降, 但可溶性膳食纤维溶出率上升, 可能是由于不溶性成分熔融或部分结合键断开, 部分不溶性膳食纤维向可溶性膳食纤维转化, 也可能是包埋在不溶性膳食纤维内部的可溶性膳食纤维被释放导致的^[28-29]。此外, 黄晨等^[30]发现, 富含纤维的物料冷冻后脆性增加, 冷冻条件下粉碎会使粉体更细更均匀。

2.5 酚类物质

酚类在植物体中以游离态和结合态方式存在。研究^[31]证明, 超微粉碎的机械力和热效应会破坏原料膳食纤维等物质的多孔网状结构, 解除酚类与细胞壁物质之间的共价或非共价作用, 使部分包裹于其中的酚类更易溶出, 导致酚类含量增加。其中, 由于结合态酚类和细胞壁成分间的酯键和糖苷键断裂, 一部分酚类由结合态向游离态转化^[32]。但粉碎过度或粉碎条件不合适, 会导致酚类物质被破坏而含量减少^[33]。也有研究^[26]发现, 低温超微粉碎能更好地保留酚类物质。

如表 2 所示, 超微粉碎技术能改变粮食营养物质的溶出率和结构。

3 超微粉碎技术对粮食特定生理功能的影响

3.1 调节血糖

超微粉碎某些特殊粮食作物如杂粮、杂豆和魔芋等, 可一定程度提高其降血糖能力。

3.1.1 影响糖的吸附力 超微粉碎提高粮食粉比表面积、孔隙率和表面能, 增加粮食粉吸附结合位点数量, 提高粮食粉截留葡萄糖能力, 减少胃肠道吸收葡萄糖, 控制餐后血糖^[37]。Niu 等^[38]发现糜子麸皮、小麦麸皮、大米糠的不溶性膳食纤维经行星式球磨机处理后, 葡萄糖吸附能力均显著提高。Li 等^[39]通过研究超微粉碎豌豆不

溶性膳食纤维发现, 纤维颗粒对葡萄糖的吸附能力随颗粒尺寸的减小而显著提高, 且葡萄糖吸附能力与比表面积、孔体积和碳氧比呈正指数关系, 与结晶度呈负线性关系。但过度研磨可能会破坏有效成分的结构, 降低对葡萄糖的束缚力^[40]。

3.1.2 修复胰岛细胞 粮食中活性成分(如多酚、黄酮等)可以保护修复胰岛 β 细胞, 提高胰岛素敏感性, 增加胰岛素含量, 降低血糖^[41]。经超微粉碎后的粮食粉, 能更好地促进这些生物活性成分溶出, 发挥功效作用。Wang 等^[42]研究发现, 经超微粉碎的豌豆膳食纤维可明显降低糖尿病小鼠的血糖和糖化血红蛋白, 改善其消瘦状态, 增加其对葡萄糖的耐受性, 恢复其胰岛细胞正常形态。

3.1.3 改变某些糖代谢相关酶的活性 粮食中活性成分(如膳食纤维、多酚等)通过抑制碳水化合物消化酶, 减少胃肠道葡萄糖释放, 从而控制餐后血糖^[43]。超微粉碎增加粮食粉比表面积和毛细管效应, 提高其包埋和吸附消化酶的能力^[44]。赵萌萌等^[45]利用气流式超微粉碎机粉碎青稞果皮发现, 随粉体粒度减小, 其中的游离酚、结合酚对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制率均增加。李菁等^[46]利用超微粉碎机和湿式胶体磨机分别处理豆渣不溶性膳食纤维发现, 超微粉碎能有效增强豆渣不溶性膳食纤维抑制 α -淀粉酶活性的能力。

3.1.4 调节肠道菌群 粮食中活性成分(如膳食纤维等)通过调节肠道微生物系统的生态环境, 提高有益菌丰度, 改善糖尿病患者血糖浓度。厉佳怡等^[47]研究发现, 经超微粉碎的豌豆膳食纤维能显著改善糖尿病小鼠肠道环境, 减少致病菌生长, 提高有益菌丰度; 豌豆膳食纤维微粉可以在小鼠肠道内被功能性菌群发酵代谢, 提高短链脂肪酸的含量, 促进肠道菌群环境健康, 调节代谢, 降低血糖。可能是因为超微粉碎的豌豆膳食纤维更易被肠道菌群发酵, 改善肠道 pH 值, 进而调控肠道菌群多样性和丰度, 改善糖尿病造成的肠道菌群紊乱。

3.2 抗氧化能力

粮食的生物活性物质(如 β -胡萝卜素、多糖和酚类物质等)有较强的抗氧化能力, 能抑制活性氧对脂类、蛋白质和核酸等生物大分子产生的氧化损伤, 减少对机体的危害^[48]。研究^[49]发现, 抗氧化物质的含量与粉末的粒度成反比, 可能是超微粉碎改变了粮食内部结构, 导致基质中包埋的抗氧化物质暴露, 从而提高粮食产品的抗氧化能力。Song 等^[34]发现发芽藜麦经球磨机超微粉碎后, 总酚和总黄酮含量增加, 抗氧化能力增强。Li 等^[50]研究发现, 经超微粉碎后的大豆豆渣的抗氧化活性提高, 但粉碎时间过久会造成活性成分损失, 抗氧化能力降低。且 Ballester-Sánchez 等^[51]研究发现, 干法超微粉碎粮食的抗氧化作用优于湿法。

表 2 超微粉碎技术对粮食产品营养物质的影响[†]

Table 2 Effects of ultrafine grinding technology on nutrients of grain products

成分	研究对象	粉碎方式	粉碎前后粒度变化	相关组分溶出情况	结构	参考文献
蛋白质	大豆 豆渣蛋白	高压微射流	由 300.30 nm 降低至 126.68 nm(HCl 提取)	可溶性蛋白溶出率提高 2~3 倍	游离巯基减少;结构舒展、带电基团暴露、二硫键增加	[15]
	苦荞	气流 (0, 0.8 MPa)	由 61.84 μm 降低至 10.97 μm	总蛋白溶出率由 13.03% 降低到 12.32%	—	[17]
	小麦 面筋蛋白	气流	由 109.35 μm 降低至 3.60 μm	—	总巯基降低;暴露巯基先增后减;面筋蛋白分子柔性提高	[18]
	发芽藜麦	球磨	由 3.37 μm 降低至 1.88 μm	总蛋白溶出率由 13.68% 升高到 17.51%,可溶性蛋白溶出率由 4.75% 升高到 13.18%	—	[34]
淀粉	苦荞	气流 (0, 0.8 MPa)	由 61.84 μm 降低至 10.97 μm	总淀粉溶出率由 68.88% 降低到 58.24%	—	[17]
	木薯淀粉	超微粉碎	由 13.50 μm 升高至 36.17 μm	RDS 溶出率由 3.91% 升高到 6.87%,SDS 溶出率由 44.71% 升高到 45.91%,RS 溶出率由 51.38% 降低到 47.21%	结晶度降低、氢键作用减弱;结构破坏程度增加	[35]
	精白米、留胚米、糙米和发芽糙米	气流	精白米:由 511.7 μm 降低至 13.1 μm ,留胚米:由 526.8 μm 降低至 14.9 μm ,糙米:由 550.2 μm 降低至 13.7 μm ,发芽糙米:由 557.3 μm 降低至 12.4 μm	—	糊化温度、峰值黏度、谷值黏度、衰减值、最终黏度和回生值均降低;峰值时间增加	[22]
脂肪	鹰嘴豆芽	碾轧式	由 210.90 μm 降低至 18.00 μm	脂肪溶出率由 3.16% 升高到 6.17%	—	[24]
		行星式球磨	由 210.90 μm 降低至 21.50 μm	脂肪溶出率由 3.16% 升高到 4.83%	—	
	苦荞	剪切破碎	由 86.75 μm 降低至 17.91 μm	脂肪溶出率由 4.08% 升高到 4.15%	—	[25]
		气流	由 86.75 μm 降低至 9.10 μm	脂肪溶出率由 4.08% 降低到 3.88%	—	
		纳米研磨	由 86.75 μm 降低至 5.39 μm	脂肪溶出率由 4.08% 降低到 0.50%	—	
膳食纤维	马铃薯渣	重压研磨式	由 237.1 μm 降低至 60.94 μm	TDF 溶出率由 54.44% 降低到 46.11%,IDF 溶出率由 42.54% 降低到 32.85%,SDF 溶出率由 11.90% 升高到 13.26%	未根本改变纤维素晶体结构、未产生新的官能团/化合物	[27]
	麦麸	变频行星式球磨	由 139.33 μm 降低至 21.70 μm	TDF 溶出率由 42.52% 降低到 40.55%,IDF 溶出率由 36.96% 降低到 34.85%,SDF 溶出率由 5.56% 升高到 5.70%	主要基团、结构变化不明显	[36]

续表 2

成分	研究对象	粉碎方式	粉碎前后粒度变化	相关组分溶出情况	结构	参考文献
酚类	燕麦麸	超微粉碎(0, 20 min)	由 466.79 μm 降低至 11.68 μm	TPC 含量由 380.40 mg/g 升高到 499.95 mg/g	—	[33]
	米糠	高能纳米冲击磨	由 208.3 μm 降低至 14.9 μm	TPC 含量由 4.860 mg/g 升高到 5.113 mg/g、BPC 含量由 2.867 mg/g 降低到 2.669 mg/g、FPC 含量由 1.993 mg/g 升高到 2.414 mg/g	—	[32]

† RDS 为快速消化淀粉;SDS 为慢消化淀粉;RS 为抗性淀粉;TDF 为总膳食纤维;SDF 为可溶性膳食纤维;IDF 为不溶性膳食纤维;TPC 为总酚;FPC 为游离酚;BPC 为结合酚。

3.3 调节血压

超微粉碎一方面使粮食结构松散,改变空间位阻效应;另一方面使粮食粉暴露更多能与消化系统中的阳离子 Na^+ 、 K^+ 产生交换的活性基团(如可溶性膳食纤维中的羧基、羟基和氨基等),阳离子交换能力提高^[52]。通过提高阳离子交换能力,使血液中的 Na^+/K^+ 值下降,在一定程度上可以起到降血压的作用^[53]。王佳欣等^[54]发现青稞麸皮经气流冲击磨粉碎后,阳离子交换能力增强。

3.4 调节血脂

3.4.1 影响胆固醇吸附能力 超微粉碎后的粮食粉比表面积增大,更易与胆固醇分子形成单分子层吸附,进而分子间吸引变为多分子层吸附,增强吸附胆固醇能力;另外,随粒径减小,表面活性基团暴露越充分,与胆固醇分子螯合能力增强,但若过度粉碎会破坏内部网状结构,减少胆固醇吸附量^[55]。Yang 等^[56]发现大豆渣经行星式球磨机湿磨后,胆固醇吸附能力提高。Sun 等^[57]将黑豆粉经振动式粉碎机处理后,胆固醇吸附能力增强。

3.4.2 影响胆酸盐吸附能力 粮食粉经超微粉碎后,结构变得松散,粉体表面聚力增大,与胆酸盐接触更充分,对胆酸盐的束缚能力增强,有利于胆固醇代谢,有效抑制膳食中脂肪的吸收利用^[58]。但过度粉碎会导致结构坍塌,束缚能力减弱。牛潇潇等^[59]发现马铃薯渣经超微粉碎后,粒度减小,胆酸钠吸附能力增强。

3.4.3 影响胰脂酶活力 超微粉碎不仅使粮食的网状结构松散更易包裹油和酶,阻碍二者间的相互作用,还可使粮食抑制酶活力的基团裸露,降低饮食中脂肪水解度,减少脂肪的消化吸收^[60]。Chen 等^[44]利用高压微流化处理燕麦不溶性膳食纤维后发现,超微粉碎后的燕麦不溶性膳食纤维对胰脂酶的抑制作用显著高于未超微粉碎的。

3.5 减少有害物质

3.5.1 减少体内重金属 粮食粉经超微粉碎后,比表面积增大,一些基团充分暴露,提高与 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 等重金属污染离子的化学螯合能力;此外,适宜的超微粉碎

使粮食内部网状结构松散,增大物理吸附能力。任顺成等^[61]研究发现,小麦麸皮粉随粒度减小,对 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附作用整体呈增加的趋势。

3.5.2 减少体内亚硝酸盐 经超微粉碎后的粮食粉活性基团(如膳食纤维中的糖醛酸、酚酸和氨基酸等活性基团)更显露,更易通过化学吸附作用清除亚硝酸根离子,减少亚硝酸根离子与仲胺、叔胺产生致癌的亚硝胺化合物^[40]。气流粉碎机可使荞麦麸皮膳食纤维和青稞不溶性膳食纤维的亚硝酸根离子吸收能力提高。

3.5.3 减少肠道有害菌 粮食中活性成分(如膳食纤维等)经肠道微生物作用产生短链脂肪酸,调节免疫应答来预防肠癌等胃肠道疾病,减少能产生致癌性物质的厌氧菌数量等。张媛等^[62]研究发现,随粉体粒度减小,脱脂小米米糠微粉一方面有效促进乳酸菌和双歧杆菌的增殖,抑制大肠杆菌的增殖;另一方面显著提高乙酸、丙酸、丁酸含量,促进肠道益生菌产生短链脂肪酸。

如表 3 所示,超微粉碎技术可一定程度上促进粮食发挥特定生理功能,但粉碎过度会破坏粮食结构,减弱其功效作用。

4 展望

适宜条件的超微粉碎,可改善粮食口感,改变营养物质的溶出率和结构,使粮食粉能更好地被吸收利用,发挥功能特性。虽然超微粉碎技术在粮食产品的开发应用中已取得较多进展,但目前中国离超微粉碎粮食产品的规模化和产业化仍有一定差距,今后的发展应集中于以下方面:

(1) 粮食超微粉碎工艺的优化。目前不同粮食加工效果的各因素间协同作用还不清晰,应继续探究粉碎设备性能与粮食自身特性之间的相互关系,优化工艺。

(2) 粮食超微粉碎设备的研发。针对粮食进行物质改性和活性物质提取等技术的专用型设备少,需加强超微粉碎相关设备的“一条龙”化研发。

(3) 粮食超微粉碎产品的开发。充分利用中国丰富

表 3 超微粉碎对粮食特定生理功能的影响

Table 3 Effects of ultramicro grinding on specific physiological function of grain

功能	营养物质	成分作用原理	超微粉碎粮食作用	粮食代表
降血糖	膳食纤维、蛋白质、淀粉、多酚、黄酮等	粒径减小;比表面积、孔隙率、表面能、有益菌丰度均增加	① 提高葡萄糖吸附、束缚能力,延缓葡萄糖扩散;② 保护和修复胰岛β细胞,增加胰岛素含量;③ 抑制消化酶,改善糖代谢;④ 改善肠道菌群,恢复肠道微生态	荞麦 ^[20] 、燕麦 ^[33] 、青稞 ^[45]
抗氧化	β-胡萝卜素、多酚、多糖等	抗氧化活性的小分子物质和比表面积增加	阻止活性氧引起的氧化损伤	黑豆 ^[57] 、薏米、荞麦 ^[20] 、燕麦 ^[33]
降血压	可溶性膳食纤维、蛋白质等	活性基团暴露、结构松散程度增加	提高阳离子交换作用	红豆、荞麦 ^[65] 、绿豆 ^[16]
降血脂	膳食纤维、淀粉、多酚、蛋白质等	粒径减小;活性基团暴露;比表面积和结构松散程度增加	① 提高胆固醇吸附能力;② 提高胆酸盐吸附能力;③ 抑制胰脂酶活力	黑豆 ^[57] 、薏米、红豆、荞麦 ^[63]
减少有害物质	膳食纤维、多酚、蛋白质等	粒径减小;厌气菌、致癌物质接触面积和致癌基因表达减少;活性基团暴露;比表面积结构松散程度、好气菌和短链有机酸增加	① 提高重金属吸附能力;② 提高亚硝酸盐吸能能力;③ 改善肠道健康	绿豆 ^[16] 、荞麦麸皮

的粮食资源,开发附加值高和功能性好的新型粮食产品,为疾病防治提供新形式。

在今后粮食资源开发中,为获得更符合人们需求的产品,结合超微粉碎技术对粮食进行深度加工和广度加工的应用前景广阔。

参考文献

[1] KAUR K D, JHA A, SABIKHI L, et al. Significance of coarse cereals in health and nutrition: A review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(8): 1 429-1 441.

[2] YANG T S, MA S, LIU J K, et al. Influences of four processing methods on main nutritional components of foxtail millet: A review [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2022, 5(3): 156-165.

[3] WANG F, SUKMANOV V, ZENG J. Effect of ultrafine grinding on functional properties of soybean by-product [J]. Ukrainian Food Journal, 2019, 8(4): 687-698.

[4] YOUSIF E S, YASEEN A, ABDEL-FATAH A F, et al. Antioxidant and anticancer properties of nano and fermented-nano powders of wheat and rice by-products[J]. Discover Food, 2022, 2(1): 33.

[5] SUN C G, OLEH O, GAO X J, et al. Research and comparative analysis of the qualitative parameters of food powders produced from grain raw materials using an improved jet mill[J]. Technology Audit and Production Reserves, 2022, 6(3): 36-43.

[6] GUO X J, HE X M, DAI T T, et al. The physicochemical and pasting properties of purple corn flour ground by a novel low temperature impact mill[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102825.

[7] HAO Z H, ZHANG B W, GUO S S. Influence on physical and chemical properties of Mung bean starch by vibration superfine grinding time[J]. Editorial Office of Transactions of the Chinese

Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 317-324.

[8] 董弘旭. 球磨处理对小麦淀粉特性及面条品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021: 4-5.

DONG H X. Effect of ball-milling treatment on wheat starch properties and noodle quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021: 4-5.

[9] 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): 2 222-2 255.

[10] CHEN T, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Micronization and nanosizing of particles for an enhanced quality of food: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(6): 993-1 001.

[11] 陈若辰. 高压射流磨制备燕麦全浆及对淀粉性质的影响研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 8-11.

CHEN R C. Preparation of whole-component oats slurry by industry-scale microfluidizer and its effect on starch properties[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020: 8-11.

[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] 迟晓君, 吴凡, 卫晨, 等. 超微粉碎技术在特殊医学用途配方食品中的应用与展望[J]. 中国果菜, 2022, 42(1): 48-51.

CHI X J, WU F, WEI C, et al. Application and prospect of ultrafine grinding technology in formula food for special medical use[J]. China Fruit & Vegetable, 2022, 42(1): 48-51.

[14] 刘彩兵, 盛勇, 涂铭旌. 冲击粉碎米糠的成分变化研究[J]. 食品工业, 2004(5): 3-5.

LIU C B, SHENG Y, TU M J. Study on composition change of rice bran by impact comminution[J]. The Food Industry, 2004(5): 3-5.

- [15] 骆兆娇. 豆渣纤维和蛋白的理化性质及改性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021: 37.
LUO Z J. Physicochemical properties and modification of okara fiber and protein [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021: 37.
- [16] 柳双双. 超微粉碎对绿豆粉物性及其蛋白质功能特性的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020: 29.
LIU S S. Effects of superfine grinding on physical properties and protein function of mungbean[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020: 29.
- [17] XU Q L, ZHENG F Y, CAO X T, et al. Effects of airflow ultrafinegrinding on the physicochemical characteristics of tartary buckwheat powder[J]. *Molecules*, 2021, 26(19): 5 841.
- [18] 郭武汉, 关二旗, 卞科. 超微粉碎处理对小麦面筋蛋白质性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(5): 13-18.
GUO W H, GUAN E Q, BIAN K. Effects of superfine grinding treatment on the properties of wheat gluten [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(5): 13-18.
- [19] 徐中岳, 罗志刚, 何小维. 湿法超微粉碎对木薯淀粉理化性质的影响[J]. *中国粉体技术*, 2009, 15(6): 26-29.
XU Z Y, LUO Z G, HE X W. Effect of wet comminuting on physicochemical properties of cassava starch [J]. *China Powder Science and Technology*, 2009, 15(6): 26-29.
- [20] 杨璐. 超微粉碎对燕麦粉品质影响及体外模拟消化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019: 19.
YANG L. Effects of ultrafine pulverization on quality and in vitro simulated digestion of oat flour [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019: 19.
- [21] HUANG Y W, SUN X X, GUO H M, et al. Changes in the thermal, pasting, morphological and structural characteristic of common buckwheat starch after ultrafine milling[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 56(6): 2 696-2 707.
- [22] 刘晓飞, 吴淦澄, 赵香香, 等. 超微粉碎对 4 种米的理化特性及抗氧化能力的影响[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(4): 26-31.
LIU X F, WU J Y, ZHAO X X, et al. Effect of ultrafine grinding on physicochemical properties and antioxidant capacity of 4 kinds of rice[J]. *Cereals & Oils*, 2023, 36(4): 26-31.
- [23] 吴娜娜, 彭国泰, 谭斌, 等. 干法、半干法和湿法磨粉对糙米粉性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(1): 137-142.
WU N N, PENG G T, TAN B, et al. Properties of brown rice flour prepared from dry, semi-dry and wet milling [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(1): 137-142.
- [24] 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): 6 699-6 705.
WANG S J, ZHANG L, GE S Y, et al. Effects of 2 types of crushers on eating quality of ultrafine powder of chickpea sprout [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(20): 6 699-6 705.
- [25] 许青莲, 岳天义, 张萍, 等. 超微粉碎对苦荞物化性质的影响[J]. *包装工程*, 2020, 41(11): 25-32.
XU Q L, YUE T Y, ZHANG P, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical properties of tartary buckwheat[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(11): 25-32.
- [26] 严旭东. 低温冲击磨制备糙米粉及其在无麸质面包中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 22-23.
YAN X D. Preparation of brown rice flour by low temperature impact mill and its application in gluten-free bread[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 22-23.
- [27] 牛潇潇, 王杰, 王宁, 等. 超微粉碎对马铃薯渣理化性质和微观结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(12): 84-91.
NIU X X, WANG J, WANG N, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and microstructure of potato residues[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(12): 84-91.
- [28] 李伦, 张晖, 王兴国, 等. 超微粉碎对脱脂米糠膳食纤维理化特性及组成成分的影响[J]. *中国油脂*, 2009, 34(2): 56-59.
LI L, ZHANG H, WANG X G, et al. Effect of super micro-milling on the physicochemical properties and composition of dietary fibre prepared from defatted rice bran[J]. *China Oils and Fats*, 2009, 34(2): 56-59.
- [29] SILVENTOINEN P, KORTEKANGAS A, ERCILI-CURA D, et al. Impact of ultra-fine milling and air classification on biochemical and techno-functional characteristics of wheat and rye bran[J]. *Food Research International*, 2021, 139: 109971.
- [30] 黄晟, 朱科学, 钱海峰, 等. 超微及冷冻粉碎对麦麸膳食纤维理化性质的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(15): 40-44.
HUANG S, ZHU K X, QIAN H F, et al. Effects of ultrafine comminution and freeze-grinding on physico-chemical properties of dietary fiber prepared from wheat bran[J]. *Food Science*, 2009, 30(15): 40-44.
- [31] ZHAO G H, ZHANG R F, DONG L H, et al. Particle size of insoluble dietary fiber from rice bran affects its phenolic profile, bioaccessibility and functional properties [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 450-456.
- [32] 卫子颜, 谢勇, 王朦朦, 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.
WEI Z Y, XIE Y, WANG M M, et al. Effect of ultrafine grinding on the composition and antioxidant activity of phenolic compounds in rice bran [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(14): 138-144.
- [33] ZHANG Y K, ZHANG M L, GUO X Y, et al. Improving the adsorption characteristics and antioxidant activity of oat bran by superfine grinding [J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 11(1): 216-227.
- [34] SONG L, SONG L S, SU H, et al. Superfine grinding affects particle size, chemical ingredients, and physicochemical properties of sprouting quinoa[J]. *Cereal Chemistry*, 2021, 99(3): 520-529.
- [35] 曹英, 夏文, 李积华, 等. 超微粉碎处理对木薯淀粉结构及消化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(7): 30-34.
CAO Y, XIA W, LI J H, et al. Effect of micronization on the

- structure and digestibility of tapioca starch [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(7): 30-34.
- [36] 余青, 陈嘉浩, 王寅竹, 等. 超微粉碎处理对麦麸粉功能及结构特性的影响[J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45(2): 56-62.
- YU Q, CHEN J H, WANG Y Z, et al. Effect of superfine grinding on functional and structural properties of wheat bran[J]. *Food Science and Technology and Economy*, 2020, 45(2): 56-62.
- [37] OU S, KWOK K, LI Y, et al. In vitro study of possible role of dietary fiber in lowering postprandial serum glucose[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(2): 1 026-1 029.
- [38] NIU L, GUO Q Q, XIAO J, et al. The effect of ball milling on the structure, physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber from three grain bran[J]. *Food Research International*, 2023, 163: 112263.
- [39] LI L Y, LIU J F, ZHANG Y, et al. Qualitative and quantitative correlation of microstructural properties and in vitro glucose adsorption and diffusion behaviors of pea insoluble dietary fiber induced by ultrafine grinding[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2 814.
- [40] 罗白玲. 超微粉碎对咖啡果皮不溶性膳食纤维加工和功能特性的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020: 30-31.
- LUO B L. Effect of ultrafine grinding on processing and functional properties of insoluble dietary fiber from coffee peel[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020: 30-31.
- [41] 陈历水, 倪军, 周学晋, 等. 谷物中降血糖功能活性成分与其作用机理[J]. *农产品加工*, 2017(1): 101-105, 109.
- CHEN L S, NI J, ZHOU X J, et al. Recent progress of studies on hypoglycemic constituents in cereals and its action mechanism[J]. *Farm Products Processing*, 2017(1): 101-105, 109.
- [42] WANG M, CHEN X H, DONG L C, et al. Modification of pea dietary fiber by ultrafine grinding and hypoglycemic effect in diabetes mellitus mice[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(4): 1 273-1 282.
- [43] AYUA E O, NKHATA S G, NAMAUMBO S J, et al. Polyphenolic inhibition of enterocytic starch digestion enzymes and glucose transporters for managing type 2 diabetes may be reduced in food systems[J]. *Heliyon*, 2021, 7(2): e6245.
- [44] CHEN J L, GAO D X, YANG L T, et al. Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber[J]. *Food Research International*, 2013, 54(2): 1 821-1 827.
- [45] 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.
- ZHAO M M, ZHANG W G, DANG B, et al. Effects of ultramicro-crushing on composition of polyphenols and antioxidant activity of barley bran powder [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 291-298.
- [46] 李菁, 吴聪聪, 叶沁, 等. 不同处理方法对豆渣膳食纤维结构和降血糖性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(15): 178-184.
- LI J, WU C C, YE Q, et al. Effect of different treatments on structure and hypoglycemic properties of okara dietary fibers[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(15): 178-184.
- [47] 厉佳怡, 王红磊, 杨倩倩, 等. 豌豆超微粉碎膳食纤维对糖尿病小鼠肠道菌群及其代谢产物的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(17): 174-181.
- LI J Y, WANG H L, YANG Q Q, et al. Effects of ultrafine ground pea dietary fiber on intestinal flora and metabolites in diabetic mice[J]. *Food Science*, 2022, 43(17): 174-181.
- [48] NEWSHOLME P, CRUZAT V F, KEANE K N, et al. Molecular mechanisms of ROS production and oxidative stress in diabetes[J]. *The Biochemical Journal*, 2016, 473(24): 4 527-4 550.
- [49] ROSA N N, BARRON C, GAIANI C, et al. Ultra-fine grinding increases the antioxidant capacity of wheat bran[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 57(1): 84-90.
- [50] LI G H, GUO W Y, GAO X L, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of soybean residue powder[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(2): 1 208-1 214.
- [51] BALLESTER-SÁNCHEZ J, FERNÁNDEZ-ESPINAR M T, HAROS C M. Isolation of red quinoa fibre by wet and dry milling and application as a potential functional bakery ingredient[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105513.
- [52] 滕硕. 超微粉碎对甜杏仁红衣理化性质的影响及工艺研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012: 74-75.
- TENG S. Ultra-fine pulverization for sweet almond skin effect on physicochemical properties and technology research [D]. Wulumuqi: Xinjiang Agriculture University, 2012: 74-75.
- [53] FRIEDMAN S M, BUTT R M, FRIEDMAN C L. Cation shifts and blood pressure regulation in the dog [J]. *American Journal of Physiology*, 1957, 190(3): 507-512.
- [54] 王佳欣, 黎阳, 李再贵, 等. 不同粒径对青稞麸皮结构与功能特性及冲调稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(3): 54-61.
- WANG J X, LI Y, LI Z G, et al. Effects of different particle sizes on the structure, functional properties and reconstitution stability of highland barley bran[J]. *Food Science*, 2022, 43(3): 54-61.
- [55] 苏珏, 席路, 杨武, 等. 四种玉米皮膳食纤维的组分对其吸附等功性质影响的研究[J]. *食品工业*, 2012, 33(7): 81-84.
- SU Y, XI L, YANG W, et al. The effects of components of four kinds of dietary fiber made from corn bran on its property[J]. *The Food Industry*, 2012, 33(7): 81-84.
- [56] YANG T, YAN H L, TANG C H. Wet media planetary ball milling remarkably improves functional and cholesterol-binding properties of okara[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 111: 106386.
- [57] SUN X B, ZHANG Y W, LI J, et al. Effects of particle size on physicochemical and functional properties of superfine black kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) powder [J]. *Peer J*, 2019, 7: e6369.
- [58] KAHN T S, CHOW F I. In vitro binding of bile acids by rice bran, oat bran, wheat bran, and corn bran[J]. *Cereal Chemistry*, 2000, 77(4): 518-521.

- [P]. 2013-07-31.
- [42] 王志伟. 果蔬加工技术现状与发展探讨[J]. 现代农业研究, 2021, 27(6): 135-136.
WANG Z W. Current status and development of fruit and vegetable processing technology[J]. Modern Agricultural Research, 2021, 27(6): 135-136.
- [43] 姜勇, 屠鹏飞, 邹萍萍, 等. 一种肉苁蓉药材的加工方法: CN104138420A[P]. 2014-11-12.
JIANG Y, TU P F, ZOU P P, et al. A method for processing Cistanche: CN104138420A[P]. 2014-11-12.
- [44] 常建国, 徐燕. 一种肉苁蓉晾晒装置: CN208688148U[P]. 2019-04-02.
CHANG J G, XU Y. A Cistanche drying device: CN208688148U [P]. 2019-04-02.
- [45] 李建国, 冯起, 马骏, 等. 一种晾晒肉苁蓉的装置: CN203336912U[P]. 2013-12-11.
LI J G, FENG Q, MA J, et al. A device for drying Cistanche: CN203336912U[P]. 2013-12-11.
- [46] 李彪. 肉苁蓉有效成分含量的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012: 15-29.
LI B. Study on the content of effective components of Cistanche deserticola [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012: 15-29.
- [47] 王丽楠, 陈君, 杨美华, 等. 肉苁蓉中苯乙醇苷的含量测定[J]. 西北药学杂志, 2008(2): 67-69.
WANG L N, CHEN J, YANG M H, et al. Determination of phenylethanol sides in Cistanche [J]. Northwest Pharmaceutical Journal, 2008(2): 67-69.
- [48] 杨建华, 胡君萍, 热娜·卡斯木, 等. 不同加工方法对肉苁蓉饮片苯乙醇苷类成分的影响[J]. 中药材, 2010, 33(5): 691-693.
YANG J H, HU J P, JEENA K, et al. Effects of different processing methods on phenylethanol glycosides in Cistanche slices [J]. Chinese Materia Medica, 2010, 33(5): 691-693.
- [49] 李想, 柴娟, 崔永成. 肉苁蓉冷冻干燥保鲜加工方法: CN106668181A[P]. 2017-05-17.
LI X, CHAI J, CUI Y C. Processing method for freeze-drying of Cistanche deserticola: CN106668181A[P]. 2017-05-17.
- [50] 骆紫燕, 卿德刚, 孙宇, 等. 肉苁蓉保健食品的开发及相关专利分析[J]. 西北药学杂志, 2020, 35(6): 940-944.
LUO Z Y, QING D G, SUN Y, et al. Development of Cistanche health food and related patent analysis[J]. Northwest Journal of Pharmacy, 2020, 35(6): 940-944.
- [51] 郭安民, 李宇辉, 王俊钢, 等. 新鲜肉苁蓉发酵酒工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(20): 59-64.
GUO A M, LI Y H, WANG J G, et al. Study on fermentation technology of fresh Cistanche[J]. Food Research and Development, 2019, 40(20): 59-64.
- [52] 刘洋. 桑葚—肉苁蓉酒的酿造工艺研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2021: 11-73.
LIU Y. Study on brewing technology of Cistanche wine from mulberries[D]. Yantai: Yantai University, 2021: 11-73.
- [53] 李伟, 张雪元, 杨波, 等. 黄精肉苁蓉胶囊制备及抗疲劳作用研究[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(5): 72-76.
LI W, ZHANG X Y, YANG B, et al. Study on preparation and antifatigue effect of Cistanche jugense capsule [J]. Food and Fermentation Science and Technology, 2022, 58(5): 72-76.
- [54] 韩海霞, 游林, 钟志明, 等. 肉苁蓉浸膏制备中温度对苯乙醇苷类成分的影响及其抗氧化活性分析[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(8): 1 975-1 983.
HAN H X, YOU L, ZHONG Z M, et al. Effect of temperature on phenylethanol glycosides and its antioxidant activity in preparation of Cistanche extract[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(8): 1 975-1 983.
- [55] 孙伯禄, 杨艳梅, 杨林, 等. 肉苁蓉红枣复合酸奶制备工艺的影响面优化及其抗氧化活性的生物传感器评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 225-234.
SUN B L, YANG Y M, YANG L, et al. Optimization of response surface for preparation of Cistanche jujube complex yogurt and evaluation of its antioxidant activity by biosensor [J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(24): 225-234.
-
- (上接第 207 页)
- [59] 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.
NIU X X, LIANG L, WANG N, et al. Effects of superfine grinding and different particle sizes on functional characteristics of potato residues[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(1): 37-45.
- [60] 王秋. 谷物杂粮超微混合粉营养、功能特性及其应用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2015: 52-55.
WANG Q. Study on the nutrition, features and application of multigrain superfine power [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2015: 52-55.
- [61] 任顺成, 王玮. 超微粉碎对小麦麸皮功能特性的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(12): 36-41.
REN S C, WANG W. Effect of superfine grinding on functional properties of wheat bran[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(12): 36-41.
- [62] 张媛, 宋倩, 梁叶星, 等. 超微粉碎对脱脂糯米米糠的抗氧化性和肠道益生性的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(9): 53-59.
ZHANG Y, SONG Q, LIANG Y X, et al. Effect of ultrafine comminution on anti-oxidation property and prebiotic function of defatted millet bran [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(9): 53-59.
- [63] 王博, 姚轶俊, 李枝芳, 等. 超微粉碎对 4 种杂粮粉理化性质及功能特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 111-117.
WANG B, YAO Y J, LI Z F, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and functional properties of four kinds of coarse cereals[J]. Food Science, 2020, 41(19): 111-117.