

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.11.006

气流超微粉碎对绿豆芽物理特性与 抗氧化活性的影响

Effect of airflow ultrafine pulverization on physical properties and
antioxidant activity of mung bean sprouts

梁雪梅^{1,2} 林欣梅¹ 魏美霞^{1,2}

LIANG Xue-mei^{1,2} LIN Xin-mei¹ WEI Mei-xia^{1,2}

曹龙奎^{1,2} 李志江^{1,3,4} 鹿保鑫^{1,4}

CAO Long-kui^{1,2} LI Zhi-jiang^{1,3,4} LU Bao-xin^{1,4}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 国家杂粮工程技术研究中心,
黑龙江 大庆 163319; 3. 黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江 大庆 163319;

4. 黑龙江省杂粮加工及质量安全工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

(1. College of Food, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

3. Key Laboratory of Agro-Products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Daqing,

Heilongjiang 163319, China; 4. Heilongjiang Engineering Research Center for Coarse Cereals

Processing and Quality Safety, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

摘要:以经干燥处理后的绿豆芽为原料,比较经气流超微粉碎处理后绿豆芽多酚提取量、抗氧化活性及物理特性的变化。结果表明:气流超微粉碎的最佳条件为压力0.5 MPa,转速5 000 r/min。与常规粉碎相比,绿豆芽多酚提取量提高了10.74%,除DPPH自由基清除能力下降外,绿豆芽多酚对ABTS⁺自由基及羟自由基的清除能力分别提高了2.8%,13.2%;水含量、水活度、粒径大小明显减小,比表面积、溶解度及堆积密度均有提高,表明气流超微粉碎在一定程度上提高了绿豆芽粉的有效利用率。

关键词:绿豆芽;多酚;气流粉碎;抗氧化活性;物理特性

Abstract: Taking the mung bean sprouts after drying as raw materials, the changes in the extraction amount, antioxidant activity and physical properties of mung bean sprouts polyphenols after airflow ultrafine crushing treatment were compared. The results show that the best conditions for ultrafine pulverization of air flow were as followed: pressure 0.5 MPa and speed 5 000 r/min. Compared with conventional crushing, the extraction of mung

bean sprouts polyphenols increased by 10.74%. In addition to the reduction of DPPH free radical scavenging ability, the removal ability of mung bean sprouts polyphenols to ABTS⁺ free radicals and hydroxyl free radicals increased by 2.8% and 13.2%, respectively. The water content, water activity, and particle size were significantly reduced, and the specific surface area, solubility, and bulk density were increased, indicating that the air flow ultra-fine crushing had improved the effective utilization of mung bean sprout powder to a certain extent.

Keywords: mung bean sprouts; polyphenols; jet milling; antioxidant activity; physical properties

绿豆又名青小豆,是中国传统农作物之一。绿豆中除含有基本营养物质外,还含有多种生物活性物质^[1-2]。绿豆中的多酚具有抗氧化、延缓衰老、降血脂、软化血管、提高大脑记忆力、调节机体内分泌、抑制肿瘤繁殖、缓解糖尿病并发症等功效^[3]。

近年来,随着人们饮食观念的改变和对营养健康生活的追求,绿豆及其芽苗产物因具备丰富的营养价值备受关注^[4]。研究^[5-6]表明,绿豆经发芽处理后,其抗营养成分含量明显减少,酚类和膳食纤维类化合物含量显著提高。但鲜食绿豆芽水分含量高、茎叶质地较脆,易腐烂变质,不易

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0401203)

作者简介:梁雪梅,女,黑龙江八一农垦大学在读硕士研究生。

通信作者:鹿保鑫(1972—),男,黑龙江八一农垦大学教授,博士。

E-mail: lubaoxin72@126.com

收稿日期:2020-04-04

贮藏和运输。因此对绿豆芽进行干燥粉碎处理后可为绿豆芽的应用价值和商业价值提供更多可能性。

气流超微粉碎^[7]是食品初加工过程中常用的一种新型粉碎方法,主要通过高速气流对被粉碎物料进行冲击实现粉碎的目的^[8]。其优势主要在于减小粉碎粒径,通过破碎植物中细小的细胞壁,使原料中的营养活性物质更好地溶出,已被广泛应用于香菇多酚^[9]、苦荞多酚^[10]、香菇柄粉多酚^[7]等的加工中,但是超微气流粉碎对绿豆芽多酚活性及物理性质的影响还未见报道。试验拟以绿豆芽为原料,利用气流超微粉碎和常规粉碎对其进行粉碎处理,研究气流超微粉碎对绿豆芽多酚提取量、抗氧化活性及物理特性的影响,为绿豆芽多酚在加工过程中活性的保持提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

绿豆:选择颗粒饱满、色泽深绿、营养价值高的山西大同小明绿豆,市售;

福林酚试剂、没食子酸标准品、DPPH、ABTS、过硫酸钾:分析纯,美国 Sigma 公司;

无水乙醇、甲醇、Na₂CO₃、FeSO₄、水杨酸:分析纯,辽宁泉瑞试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

高速多功能粉碎机:YB-1000A 型,永康市速锋工贸有限公司;

流化床式气流粉碎机:LHL 型,山东潍坊正远粉体工程设备有限公司;

超声—微波协同萃取仪:CW-2000 型,上海新拓分析仪器科技有限公司;

紫外—可见分光光度计:TU-1810 型,北京普析通用仪器有限责任公司;

水分活度测定仪:NovasinaLabMaster-aw 控温型,大昌华嘉商业有限公司;

水分测定仪:MB45 型,济南汇铭仪器设备有限公司;

激光粒度分布仪:BT-9300Z 型,丹东百特仪器有限公司。

1.2 方 法

1.2.1 超微绿豆芽粉的制备 绿豆经清水漂洗 3~4 次,平铺于绿豆芽机中,设置温度 25 ℃,每隔 2~3 h 自动淋水,筛选出芽相近(±1 cm)的绿豆芽,于 45 ℃鼓风干燥箱中烘干,经高速粉碎机粉碎后过 80 目筛制成常规粉碎绿豆芽粉,真空包装后贮藏于 0~4 ℃冰箱备用。

称取 9 组 300 g 常规粉碎处理后的绿豆芽粉,采用气流超微粉碎机对绿豆芽粉进行气流粉碎处理。固定进料量 300 g,进料频率 5 Hz,粉碎时间 30 min,按表 1 进行气

表 1 气流超微粉粉碎试验参数

Table 1 Air flow ultrafine powder crushing test parameters

编号	压力/ MPa	转速/ (r · min ⁻¹)	编号	压力/ MPa	转速/ (r · min ⁻¹)
1	0.5	3 000	6	0.6	5 000
2	0.5	4 000	7	0.7	3 000
3	0.5	5 000	8	0.7	4 000
4	0.6	3 000	9	0.7	5 000
5	0.6	4 000			

流超微粉粉碎试验,制备得到 9 组微细化绿豆芽粉,真空包装后贮藏于 0~4 ℃冰箱中备用。

1.2.2 多酚的提取 根据 Zhang 等^[11]的方法稍作修改,准确称取 2.0 g 绿豆芽粉,按料液比 1:30 (g/mL)加入 70%的乙醇溶液,混匀后置于超声—微波萃取仪中,设置超声时间 1 000 s、超声温度 35 ℃、超声功率 400 W,萃取结束后,4 000 r/min 离心 10 min,收集上清溶液。向沉淀物中再次加入 70%乙醇溶液,重复提取,合并两次离心后得到的上清液,45 ℃下旋蒸至无水状态,残余物用 70%甲醇洗出定容至 10 mL,得待测多酚提取液,分装后冻藏于 -20 ℃冰箱中备用。

1.2.3 多酚含量的测定 根据 Folin-Ciocalteu 法^[12]稍作修改,得线性方程为 $y=0.1177x+0.0048$, $R^2=0.9998$,线性关系良好。多酚含量测定结果以干基 1 g 绿豆芽粉样品中所含没食子酸当量表示,简称为 mg GAE/g · DW。

1.2.4 粒径大小的测定 以去离子水作为分散溶剂,利用激光粒度分析仪测定不同加工方式下绿豆芽粉的粒径大小,平行测定 3 次。

1.2.5 水分活度的测定 利用水分活度测定仪^[6]进行测定。

1.2.6 水分含量的测定 采用水分测定仪进行测定,每次称取的样品质量需 >0.5 g,平行测定 3 次。

1.2.7 堆积密度的测定 根据苟小菊等^[13]的方法稍作修改,取粉碎处理后的绿豆芽粉于 10 mL 量筒中,充分振摇至绿豆芽粉与刻度线水平。按式(1)计算绿豆芽粉堆积密度。

$$D_w = \frac{m_1 - m_2}{V}, \quad (1)$$

式中:

D_w ——堆积密度, g/mL;

m_2 ——量筒的质量, g;

m_1 ——量筒与绿豆芽粉的质量, g;

V ——绿豆芽粉的体积, mL。

1.2.8 溶解度的测定 参照顾焱炜等^[14]的方法稍作修改,配制质量分数为 2%的绿豆芽粉溶液,25 ℃下搅拌

30 min, 4 000 r/min 离心 10 min, 取 1 mL 上清液于 105 °C 下干燥至恒重, 按式(2)计算其溶解度, 平行测定 3 次。

$$S = \frac{M}{W} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

S——溶解度, %;

M——上清液烘干至恒重后的残留物重量, g;

W——样品干基重量, g。

1.2.9 多酚抗氧化活性

(1) DPPH 自由基清除能力的测定: 根据 Guroy 等^[15]的方法稍作修改, 以无水乙醇作为对照, 平行 3 次。按式(3)计算 DPPH 自由基清除率。

$$X = \frac{A_2 - (A_1 - A_0)}{A_2} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

X——自由基清除率, %;

A₀——空白对照液的吸光度值;

A₁——样品测定组的吸光度值;

A₂——对照组的吸光度值。

(2) ABTS⁺ 自由基清除能力的测定: 根据 Adom 等^[16]的方法稍作修改, 称取 0.1 g ABTS 和 0.029 g 过硫酸钾粉末, 用蒸馏水定容至 100 mL, 于 4 °C 冰箱中备用, 使用前稀释至 734 nm 处吸光度为(0.700±0.020)。将不同加工方式下多酚提取液稀释成浓度为 40% 样液, 取 0.2 mL 绿豆芽多酚提取液, 加入 5.8 mL ABTS 溶液, 混匀, 避光反应 6 min, 于 734 nm 处测定吸光度, 平行 3 次。按式(3)计算 ABTS⁺ 自由基清除率。

(3) 羟自由基清除能力的测定: 根据水杨酸法^[17]并稍作修改, 依次取 1 mL FeSO₄ 溶液, 1 mL 水杨酸-乙醇溶液, 0.3 mL 样液, 0.7 mL 水, 1 mL H₂O₂ 于试管, 37 °C 水浴 30 min, 用水做空白对照, 于 510 nm 处测定吸光度, 平行 3 次试验。按式(3)计算羟自由基清除率。

1.2.10 数据处理 采用 SPSS 17.0、Excel 2013 进行数据统计分析和处理, 显著性分析采用 ANOVA 单因素方差分析。试验数据均为 3 次平行测定, 结果用平均值±标准偏差表示, 字母不同表示差异显著(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 对绿豆芽粉多酚含量的影响

由图 1 可知, 相比于常规粉碎, 绿豆芽经气流超微粉碎后(除压力 0.7 MPa, 转速 3 000 r/min 外), 其多酚提取量均显著增加。气流超微粉碎时, 多酚提取量随转速的增加整体呈上升趋势, 且差异性显著。当转速为 5 000 r/min, 压力为 0.5 MPa 时, 多酚提取量最高, 为 31.65 mg GAE/g·DW, 比常规粉碎提升了 10.7%; 当转速为 5 000 r/min, 压力为 0.7 MPa 时, 多酚提取量与压力

为 0.5 MPa 时相近, 为 31.52 mg GAE/g·DW, 与前人^[18-19]的研究结果相似。其原因可能是, 一方面绿豆芽经气流超微粉碎处理后, 有效地破坏了绿豆芽的细胞壁, 使细胞内的活性物质更容易溶出, 转速的增加使绿豆芽粉颗粒的碰撞速度升高, 进而加大了绿豆芽多酚的溶出率^[20]; 另一方面气流超微粉碎细化了绿豆芽粉颗粒大小, 增加其比表面积及溶解度, 使多酚化合物更易溶解于乙醇, 从而提高了多酚提取量^[21]。

2.2 对绿豆芽粉物理特性的影响

2.2.1 水含量及水活度 由表 2 可知, 绿豆芽粉经气流超微粉碎处理后, 水含量明显减少, 水分活度降低, 当压力为 0.7 MPa, 转速为 4 000 r/min 时, 水含量达到最低值, 比常规粉碎减少了 21.88%; 水活度随压力的增加而降低, 当压力为 0.7 MPa, 转速为 3 000 r/min 时, 水活度最低, 比常规粉碎减少了 76.87%。水活度和水含量较高的食物易发生化学变化且促进微生物的生长繁殖, 从而导致食物腐败变质, 因此气流超微粉碎有助于延长绿豆芽的贮藏期。

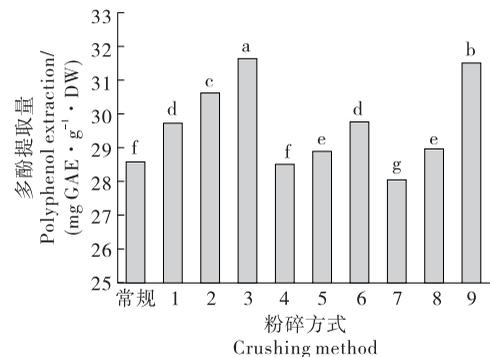


图 1 气流粉碎对绿豆芽粉多酚提取量的影响

Figure 1 Effect of jet milling on the extraction of mung bean sprout polyphenols

表 2 气流超微粉碎对绿豆芽粉水含量及水活度的影响

Table 2 Effect of airflow ultrafine pulverization on water content and water activity of mung bean sprout powder

编号	水含量/%	水活度
1	4.01±0.02 ^c	0.123 4±0.000 5 ^d
2	3.71±0.30 ^e	0.125 1±0.000 8 ^d
3	4.00±0.07 ^e	0.145 5±0.000 5 ^b
4	3.95±0.02 ^d	0.109 3±0.000 4 ^f
5	4.16±0.01 ^b	0.113 8±0.000 5 ^e
6	4.18±0.02 ^b	0.142 5±0.000 4 ^e
7	3.57±0.03 ^f	0.071 5±0.000 3 ⁱ
8	3.50±0.02 ^f	0.093 6±0.000 6 ^e
9	3.76±0.02 ^e	0.078 7±0.000 8 ^b
常规粉碎	4.48±0.03 ^a	0.309 1±0.000 3 ^a

2.2.2 对表面积、溶解度及堆积密度的影响 由表 3 可知,经气流超微粉碎后,绿豆芽粉比表面积随粒径的减小显著增加($P<0.05$),当压力为 0.6 MPa,转速为 3 000 r/min 时,比表面积最大,比常规粉碎提高了 20%,可能是由于随着粒度的减小,相同质量下气流超微粉碎后的绿豆芽粉颗粒数远高于常规粉碎,与张丽媛等^[22]、王立东等^[8]的研究结果相似。气流超微粉碎后绿豆芽多酚溶解度也有一定的提高,当压力为 0.5 MPa,转速为 5 000 r/min 时,溶解度比常规粉碎提高了 43.38%,可能是因为绿豆芽粉在经超微粉碎后粒径减小,比表面积增加,绿豆芽粉颗粒数目增加,与水接触面积增加,因此溶解度增大;此外气流超微粉碎后绿豆芽中的不溶性结构破碎,使可溶性分子析出,从而增加了溶解度^[23]。经气流超微粉碎后,绿豆芽粉堆积密度显著减小($P<0.05$),最高减小了 56.1%,比常规粉碎的绿豆芽粉更疏松。

2.2.3 对绿豆芽粉粒径的影响 由图 2 可知,相比于常规粉碎,经过气流超微粉碎绿豆芽粉的中位径 D_{50} 明显减小,说明气流粉碎能够减小绿豆芽粉颗粒大小,与王立东等^[8]、杨健等^[24]的结果一致。绿豆芽粉中位径 D_{50} 随转速的增加而减小,说明转速的增加有助于绿豆芽颗粒的减小;而绿豆芽粉中位径 D_{50} 随压力的增加而变大,分析可能是 0.5 MPa 已达到了绿豆芽粉的最佳粉碎临界粒径压力,因此当压力增加时,绿豆芽粉中位径 D_{50} 因发生团聚现象而增大^[25]。所以当压力为 0.5 MPa,转速为 5 000 r/min 时,绿豆芽粉中位径 D_{50} 减小至 11.36 μm ,此时粒径大小为气流粉碎条件下的最小值即最佳粉碎颗粒大小,比常规粉碎减小了 37.24%。

表 3 气流粉碎对绿豆芽粉比表面积、溶解度及堆积密度的影响

Table 3 Effects of jet milling on specific surface area, solubility and bulk density of mung bean sprouts

编号	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	溶解度/ %	堆积密度/ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)
1	0.20 ± 0.08^i	41.87 ± 3.40^e	0.42 ± 0.01^{cd}
2	0.32 ± 0.04^e	49.23 ± 1.44^b	0.39 ± 0.01^e
3	0.33 ± 0.04^b	51.00 ± 2.63^a	0.36 ± 0.01^f
4	0.34 ± 0.06^a	36.67 ± 3.04^{hi}	0.43 ± 0.01^{bc}
5	0.29 ± 0.03^e	38.63 ± 0.93^g	0.39 ± 0.01^e
6	0.31 ± 0.06^d	45.23 ± 0.45^c	0.37 ± 0.01^{ef}
7	0.34 ± 0.05^a	36.10 ± 2.13^j	0.41 ± 0.02^d
8	0.25 ± 0.06^b	39.17 ± 1.55^{fg}	0.36 ± 0.01^f
9	0.29 ± 0.02^e	44.07 ± 4.27^d	0.36 ± 0.01^f
常规粉碎	0.29 ± 0.06^g	35.57 ± 1.90^j	0.82 ± 0.01^a

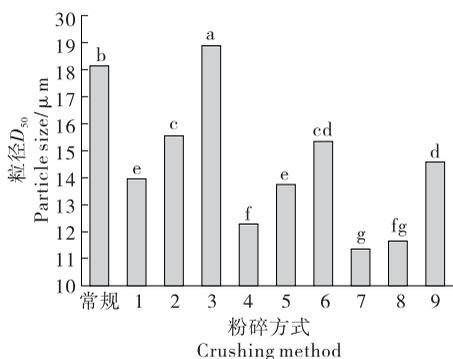


图 2 气流超微粉碎对绿豆芽粉粒径的影响

Figure 2 The effect of jet superfine grinding on the particle size of mung bean sprout powder

2.3 绿豆芽粉多酚的抗氧化活性

2.3.1 对 DPPH 自由基清除能力的影响 经气流粉碎后,绿豆芽粉多酚对 DPPH 自由基的清除能力显著下降,当压力为 0.7 MPa,转速为 4 000 r/min 时,DPPH 清除能力最佳,为 64.91%,比常规粉碎减少了 18.09%。可能是气流粉碎时,高速的压缩气流与物料发生摩擦产生一定热量(瞬间温度最高可达 150 $^{\circ}\text{C}$ 以上),虽然机械内的温度会被后续不断进入的气流带走,但瞬间的高温还是会使得部分热敏感多酚物质失活,从而使其对 DPPH 自由基的清除能力减弱^[26]。

2.3.2 对 ABTS⁺ 自由基清除能力的影响 由图 4 可知,当气流粉碎压力为 0.5 MPa,转速为 5 000 r/min 时,ABTS⁺ 自由基清除率最高,达 89.06%,相比于常规粉碎提高了 2.8%。其他气流粉碎工艺处理后,绿豆芽粉多酚对 ABTS⁺ 自由基的清除能力均下降,可能是气流超微粉碎时,温度影响了一部分绿豆芽多酚的活性,其对 ABTS⁺ 自由基的清除能力减弱。

2.3.3 对羟自由基清除能力的影响 由图 5 可知,相比于常规粉碎,经气流超微粉碎后,绿豆芽粉多酚的羟自由基清除能力显著提高($P<0.05$),当压力为 0.5 MPa,转速

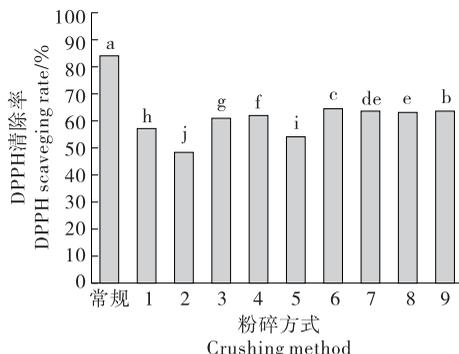


图 3 气流超微粉碎对绿豆芽多酚 DPPH 清除能力的影响

Figure 3 Effect of air jet ultrafine pulverization on mung bean sprouts polyphenol DPPH scavenging ability

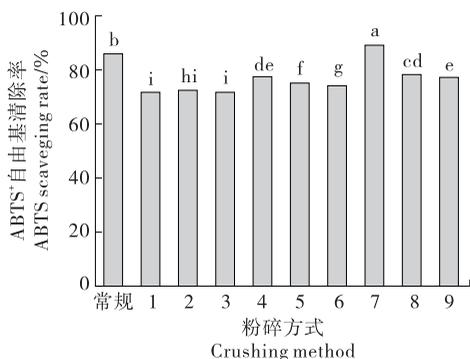


图4 气流超微粉碎对绿豆芽多酚 ABTS⁺ 自由基清除能力的影响

Figure 4 Effect of air jet ultrafine pulverization on mung bean sprouts polyphenols ABTS⁺ · scavenging ability

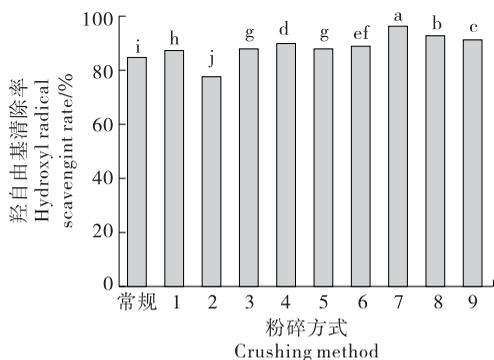


图5 气流超微粉碎对绿豆芽多酚羟自由基清除能力的影响

Figure 5 Effect of air jet ultrafine pulverization on mung bean sprouts polyphenol hydroxyl radical scavenging ability

为 5 000 r/min 时,羟自由基清除能力达 95.95%,比常规粉碎提高了 13.2%。说明在一定的粉碎条件下,超微粉碎有助于多酚化合物的溶出,并显著提高了其对羟自由基的清除能力^[27],与刘金福等^[28]的结果一致。

2.4 相关性分析

由表 4 可知,绿豆芽粉水含量与转速呈极显著负相关(P<0.01),与水活度、堆积密度、粒径大小呈极显著相关(P<0.01);绿豆芽粉水活度与工质压力呈极显著负相关(P<0.01),与转速呈显著负相关(P<0.05),与堆积密度、粒径大小呈极显著相关(P<0.01),与比表面积呈极显著负相关(P<0.01);绿豆芽粉比表面积与转速呈极显著相关(P<0.01),与工质压力呈显著负相关(P<0.05);绿豆芽粉溶解度与水含量、水活度、堆积密度、溶解度呈极显著相关(P<0.01),与转速、比表面积呈极显著负相关(P<0.01);绿豆芽粉堆积密度与转速、比表面积呈极显著负相关(P<0.01),与粒径大小呈极显著相关(P<0.01);绿豆芽粉粒径大小与转速、水含量、水活度、比表面积、溶解度、堆积密度呈极显著相关(P<0.01),与工质压力呈显著正相关(P<0.05)。

由表 4 还可知,绿豆芽粉多酚提取量与转速、堆积密度、粒径大小呈显著负相关(P<0.05);绿豆芽粉多酚 DPPH 自由基清除能力与转速、多酚提取量呈显著相关(P<0.05);绿豆芽粉多酚 ABTS⁺ 自由基清除能力与多酚提取量、DPPH 自由基清除率呈极显著相关(P<0.01);绿豆芽粉多酚羟自由基清除能力与多酚提取量、转速呈显著相关(P<0.05)。

3 结论

利用气流超微粉碎技术对绿豆芽进行超微粉碎处

表 4 不同气流条件下各指标间的相关系数[†]

Table 4 Correlation coefficients between indicators under different airflow conditions

指标	多酚	转速	工质压力	水含量	水活度	比表面积	溶解度	堆积密度	粒径	DPPH 自由基	ABTS 自由基	羟自由基
多酚	1.000											
转速	-0.695*	1.000										
工质压力	-0.388	-	1.000									
水含量	-0.112	-0.811**	-0.520	1.000								
水活度	-0.181	-0.849*	-0.831**	0.802**	1.000							
比表面积	0.398	0.875**	-0.760*	-0.757**	-0.568**	1.000						
溶解度	-0.088	-0.820**	-0.614	0.827**	0.623**	-0.660**	1.000					
堆积密度	-0.503*	-0.957**	-0.260	0.713**	0.871**	-0.698**	0.592**	1.000				
粒径	-0.466*	-0.914**	0.692*	0.780**	0.623**	-0.984**	0.673**	0.760**	1.000			
DPPH 自由基	0.510*	0.550*	0.188	-0.341	0.021	0.378	-0.387	-0.202	-0.370	1.000		
ABTS 自由基	0.767**	-0.037	-0.419	0.108	0.281	0.127	0.046	-0.094	-0.095	0.716**	1.000	
羟自由基	0.532*	0.530*	-0.154	-0.277	-0.293	0.375	-0.285	-0.507	-0.383	0.416	0.377	1.000

† * 表示显著(P<0.05), ** 表示极显著(P<0.01)。

理,与常规粉碎进行对比,分析气流超微粉碎工艺对绿豆芽多酚含量、抗氧化性及物理特性的影响。结果表明,当气流超微粉碎压力为 0.5 MPa,转速为 5 000 r/min 时,绿豆芽粉多酚提取量达最高,从 28.58 mg GAE/g · DW 增至 31.65 mg GAE/g · DW;与常规粉碎相比,除 DPPH 自由基清除能力减小外,气流超微粉碎后绿豆芽粉多酚对 ABTS⁺ 自由基、羟自由基的清除率分别提高了 2.8%, 13.2%。后续可将气流粉碎与其他新兴粉碎方式进行更加系统的对比分析,从而为绿豆芽多酚活性的保持找到一种最佳粉碎方法。

参考文献

- [1] 田茜, 张文兰, 李群, 等. 绿豆的品质特性及综合利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 77-82.
- [2] 张会娟, 胡志超, 吕小莲, 等. 我国绿豆加工利用概况与发展分析[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 234-236.
- [3] 赵天瑶, 张亚宏, 常暖迎, 等. 绿豆萌发过程中绿豆蛋白的功能特性及其抗氧化性[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 69-75.
- [4] DINI I, TENORE G C, DINI A. Saponins in Ipomoea batatas tubers: Isolation, characterization, quantification and antioxidant properties[J]. Food Chemistry, 2009, 113(2): 411-419.
- [5] GUO Xin-bo, LI Tong, TANG Ke-xuan, et al. Effect of germination on phytochemical profiles and antioxidant activity of mung bean sprouts (*Vigna radiata*) [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2012, 60(44): 11 050-11 055.
- [6] CEVALLOS-CASALS B A, CISNEROS-ZEVALLOS L. Impact of germination on phenolic content and antioxidant activity of 13 edible seed species[J]. Food Chemistry, 2010, 119(4): 1 485-1 490.
- [7] 李遥, 陈金龙, 夏春燕, 等. 基于 HepG2 细胞模型的香菇柄粉多酚抗氧化及抗增殖活性[J]. 食品科学, 2016, 37(11): 190-196.
- [8] 王立东, 肖志刚. 气流粉碎对玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 276-281.
- [9] 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.
- [10] 蔡亭, 汪丽萍, 刘明, 等. 超微粉碎对苦荞多酚及抗氧化活性的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 95-99, 106.
- [11] ZHANG Ming-wei, ZHANG Rui-feng, ZHANG Feng-xuan, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(13): 7 580-7 587.
- [12] SINGLETON V L. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent[J]. Methods Enzymo, 1999, 299: 152-178.
- [13] 苟小菊, 刘冬, 杨曦, 等. 热风干燥温度对新疆红肉苹果粉品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 87-93.
- [14] 顾炜, 刘远洋, 杨晓泉. 喷射蒸煮辅助提取对花生分离蛋白结构和功能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(9): 151-156.
- [15] GURSOY N, SARIKURKCU C, TEPE B, et al. Evaluation of Antioxidant Activities of 3 Edible Mushrooms: *Ramaria flava* (Schaeff.: Fr.) Quel. *Rhizopogon roseolus* (Corda) T. M. Fries. and *Russula delica* Fr [J]. Food Science and Biotechnology, 2010, 19(3): 691-696.
- [16] ADOM K K, LIU R H. Antioxidant activity of grains[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2002, 54(21): 4 696-4 704.
- [17] 田成. 桂花果实多酚的超声波提取及抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2011, 32(24): 106-110.
- [18] 郑慧, 王敏, 于智峰, 等. 超微粉碎对苦荞麸功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2007(12): 258-262.
- [19] 高虹, 史德芳, 何建军, 等. 超微粉碎对香菇柄功能成分和特性的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(5): 40-43.
- [20] HEMERY Y, HOLOPAINEN U, LAMPI A M, et al. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients II: Electrostatic separation of particles[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 53(1): 9-18.
- [21] 张晶, 王秀全, 王德清, 等. 超微粉碎对人参皂苷测定量的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(18): 96-98.
- [22] 张丽媛, 陈如, 田昊, 等. 超微粉碎对苹果膳食纤维理化性质及羟自由基清除能力的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 139-144.
- [23] 王博, 姚铁俊, 李枝芳, 等. 超微粉碎对四种杂粮粉理化性质及功能特性的影响[J/OL]. 食品科学. (2019-12-19) [2020-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20191219.1805.006.html>.
- [24] 杨健, 王立东, 包国凤. 超微粉碎对小米麸皮膳食纤维物理特性的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(13): 128-131, 135.
- [25] 秦军伟, 李成华, 宫元娟. 球磨微细化处理在植物性原料微粉制备中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(5): 418-420, 424.
- [26] 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.
- [27] 高虹, 史德芳, 何建军, 等. 超微粉碎对香菇柄功能成分和特性的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(5): 40-43.
- [28] 刘金福, 王步江. 全麦粉及其制品中活性物质的提取工艺及抗氧化作用研究[J]. 中国食品学报, 2011(8): 30-33.