

气流超微粉碎对香菇柄粉末理化及溶出特性的影响

王维涛, 牛 犇, 刘瑞玲, 陈杭君, 房祥军, 吴伟杰, 郜海燕, 穆宏磊

Effects on Physicochemical and Dissolution Characteristics of *Lentinus edodes* Stem Powder by Jet Milling

WANG Weitao, NIU Ben, LIU Ruiling, CHEN Hangjun, FANG Xiangjun, WU Weijie, GAO Haiyan, and MU Honglei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030091>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同粒径青香蕉粉的粉体特性

Properties of green banana powder in different particle sizes

食品工业科技. 2018, 39(7): 6-9,14 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.07.002>

不同干燥和粉碎方式对玉木耳粉粉体特性和营养成分的影响

Effects of Different Drying and Grinding Methods on the Powder Characteristics and Nutritional Components of *Auricularia nigricans* Powder

食品工业科技. 2021, 42(1): 96-100,109 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030158>

GC-IMS评价双螺杆挤压处理对香菇柄挥发性成分的影响

Effect of Twin Screw Extrusion on the Volatile Components of *Lentinus edodes* Stalks by GC-IMS

食品工业科技. 2020, 41(18): 257-262,300 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.041>

超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及微观结构的影响

Effect of Superfine Grinding on Physicochemical Properties and Microstructure of *Chimonobambusa quadrangularis* Shoot Powder

食品工业科技. 2021, 42(24): 40-47 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040079>

超声辅助酶法提取香菇柄滋味物质工艺优化

Optimization of Ultrasonic Assisted Enzymatic Extraction of Tasty Components from the Stipe of *Lentinula edodes*

食品工业科技. 2020, 41(12): 133-138,149 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.021>

超微粉碎对黑蒜粉末物理性质及抗氧化能力的影响

Effects of ultrafine grinding on the physical properties and antioxidant activities of black garlic powder

食品工业科技. 2018, 39(10): 51-57 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.10.010>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030091

WANG Weitao, NIU Ben, LIU Ruiling, et al. Effects on Physicochemical and Dissolution Characteristics of *Lentinus edodes* Stem Powder by Jet Milling[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 101–109. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030091

· 研究与探讨 ·

气流超微粉碎对香菇柄粉末理化及溶出特性的影响

王维涛^{1,2}, 牛犇², 刘瑞玲², 陈杭君², 房祥军², 吴伟杰², 郜海燕^{2,*}, 穆宏磊^{2,*}

(1. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130118;

2. 浙江省农业科学院食品科学研究所, 农业农村部果品采后处理重点实验室, 浙江省果蔬保鲜与加工技术研究重点实验室, 中国轻工业果蔬保鲜与加工重点实验室, 浙江杭州 310021)

摘要: 为了增加香菇副产物的利用率, 采用气流超微粉碎对香菇柄进行粉碎处理, 以粗粉和 40 目粉为对照, 研究了气流超微粉碎对香菇柄粉末理化性质, 以及麦醇固醇和多糖为代表的功能性成分溶出量的影响, 并对麦醇固醇和多糖的累计溶出率进行 Weibull 模型拟合。结果表明, 经过气流超微粉碎后粉体的平均粒径 (D_{50}) 减小至 3.21 μm , 堆积密度由 0.15 g/mL 增加到 0.25 g/mL, 振实密度由 0.23 g/mL 增加到 0.42 g/mL, L^* 值由 65.31 上升到 73.49, 粉体流动性、持水力 and 膨胀力显著增强 ($P < 0.05$)。气流超微粉碎后麦角固醇和多糖累计溶出 50% 所需时间 (T_{50}) 与粗粉相比分别减少了 2.56 和 8.14 min; 45 min 的累计溶出率 (Q_{45}) 分别增加了 10.88% 和 19.15%。气流超微粉碎处理香菇柄以后, 粉体性质有所提升, 香菇柄中功能活性物质的溶出率显著增加, 有利于香菇副产物的综合利用。

关键词: 香菇柄, 气流超微粉碎, 粉体特性, 溶出动力学

中图分类号: TS209

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)23-0101-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030091

本文网刊:



Effects on Physicochemical and Dissolution Characteristics of *Lentinus edodes* Stem Powder by Jet Milling

WANG Weitao^{1,2}, NIU Ben², LIU Ruiling², CHEN Hangjun², FANG Xiangjun², WU Weijie²,
GAO Haiyan^{2,*}, MU Honglei^{2,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

2. Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Fruit Postharvest Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Preservation and Processing Technology of Zhejiang Province, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Preservation and Processing of China Light Industry, Hangzhou 310021, China)

Abstract: In order to increase the utilization rate of shiitake mushroom by-products, the shiitake mushroom stem was crushed after superfine grinding with a jet mill, with coarse powder and 40 mesh powder as the control. The effect of jet milling on the physicochemical properties of shiitake mushroom stem powder and the dissolution amount of functional components represented by ergosterol and polysaccharides were studied. The cumulative dissolution rate of ergosterol and polysaccharides was fitted by the Weibull model. The results showed that after superfine grinding by jet milling, the average particle size (D_{50}) of powder decreased to 3.21 μm , bulk density, tap density and L^* value increased from 0.15 g/mL

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金 (32172282); 国家重点研发计划课题 (2021YFD2100502); 浙江省高层次人才特殊支持计划 (2022R52025)。

作者简介: 王维涛 (1997-), 男, 硕士, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: wangweitaoabcd@163.com。

* 通信作者: 郜海燕 (1958-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品物流保鲜与品质调控, E-mail: spsghy@163.com。

穆宏磊 (1980-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品物流保鲜与品质调控, E-mail: mhljoe@163.com。

to 0.25 g/mL, 0.23 g/mL to 0.42 g/mL, 65.31 to 73.49, respectively. The superfine powder fluidity, water holding capacity and swelling capacity were significantly enhanced ($P<0.05$). The cumulative dissolution 50% of the time (T_{50}) of ergosterol and polysaccharide in superfine powder was reduced by 2.56 min and 8.14 min, respectively, compared with coarse powder. And cumulative dissolution rate at 45 min (Q_{45}) increased by 10.88% and 19.15%, respectively. The powder properties and the dissolution rate of the functional ingredients were improved, after the jet milling to treat the shiitake mushroom stem, which was conducive to the comprehensive utilization of shiitake mushroom by-products.

Key words: *Lentinus edodes* stem; jet milling; powder characteristics; dissolving-kinetic

香菇(*Lentinus edodes*)又名香信、冬菇,是世界上仅次于双孢蘑菇的第二大食用菌^[1],本身含有独特的风味,味道鲜美,深受消费者的喜爱。香菇柄是香菇的副产物,由于香菇柄中纤维含量较高,口感差,生产上常将其作为废弃物丢掉,造成了资源浪费和环境污染。香菇柄中的功能物质较多,其中主要以水溶性的多糖和脂溶性的麦角固醇为代表。香菇多糖是从香菇中获得的具有生物活性的分子,主要由 β -1,3 葡聚糖构成,香菇多糖的功能活性与其单糖组成、糖苷键类型、分子量大小密切相关。已有研究表明香菇多糖具有增强免疫、防癌抑癌、抗氧化、免疫调节等作用^[2],香菇多糖在食品、医药、农业和化妆品等领域有着广阔的发展前景。麦角固醇,又称麦角甾醇,是蘑菇中丰富的生物活性化合物^[3],是维生素 D₂ 的前体物质^[4],能够有效促进钙的吸收,并具有抗氧化,降低胆固醇,防治心脏病等功效,麦角固醇在医用药物、动物饲料、功能产品的研发等领域有着广阔的发展前景。香菇柄中膳食纤维含量较高,但其中主要为不溶性膳食纤维,难以被人体消化利用,直接食用口感较差,普通粉碎方式制备的粉末粒度较大,利用超微粉碎的方式将其加工成超微粉,可以进一步增加其口感^[5],将其制作成粉剂用于香菇酱等其他产品的加工,可以提高香菇副产物的利用。

超微粉碎是一种经常用于生产微、亚微米甚至纳米尺寸粉末的食品加工技术^[6],可以减小粉末的粒径,增加功能物质的溶出。Meng 等^[7]研究表明与传统的机械粉碎方法相比,超微粉碎改善了铁皮石斛的理化性质,使其具有更好的流动性和水合性,更高的生物利用度和生物活性。气流超微粉碎是一种流体能量冲击粉碎技术,是超微粉碎方法的一种,通常用于产生小于 10 μm 粒径的粉末,具有无金属污染、不产热、无菌等优点^[8]。高虹等^[9]研究表明香菇柄经超微粉碎处理后,平均粒径降至 8.05 μm ,多糖溶出率提高了 1 倍,可溶性膳食纤维含量提高了 3 倍,显著改善了膳食纤维的功能特性。Zhang 等^[10]研究表明气流超微粉碎可以显著降低香菇粉末的粒径,提高多糖和蛋白质的溶解度。刘素稳等^[11]使用气流超微粉碎处理杏鲍菇粉末使其容积密度、比表面积、流动性、水溶性指数和多糖的溶出率得到了显著提高。目前超微粉碎对香菇类产品的研究主要集中在粉体性质和功能物质溶出这两方面,但对功能物质的溶出主要以水溶性的多糖和蛋白质为主,对脂溶性的麦角

固醇溶出影响鲜有报道。

传统粉碎方式的粉末存在溶解性、流动性、吸附性差以及功能物质溶出量低等缺点^[12],为了改善香菇柄粉末的品质,增加香菇副产物的利用率,探究气流超微粉碎对香菇柄超微粉物理特性和功能成分溶出规律的影响,选择不同处理的香菇柄粉末作为研究对象,分析了气流超微粉碎对香菇柄粉末物理特性,以及麦角固醇和多糖为代表的功能性成分溶出量的影响,以期气流超微粉碎在香菇柄的综合利用方面提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

901 香菇柄 来自浙江省金华市武义县武义创新食用菌有限公司,选择八成熟未开伞的香菇,采收后当天运回实验室,得到长为 5~6 cm,直径为 1.5~2 cm 的香菇柄(湿基含水率 81.67%);甲醇(色谱纯)、无水乙醇(分析纯)、浓硫酸(分析纯)、苯酚(分析纯)、葡萄糖(分析纯)、超纯水、麦角固醇标准品均购自上海麦克林生化科技有限公司。

Malvern Mastersizer2000 型激光粒度仪 英国马尔文仪器有限公司;MH10A 型气流粉碎机 牧虎压缩机有限公司;Readmax 1900 型光吸收全波长酶标仪 上海闪谱生物科技有限公司;TM3000 型扫描电镜 日本日立有限公司;Agilent1200 型高效液相色谱仪 安捷伦科技有限公司;CHROMA METE-RCR-400 型色差仪 日本柯尼卡美能达公司;AQ-180E 型食品粉末研磨机 慈航市耐欧仪器有限公司;DGG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司;KQ-3000TDE 型高频数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 香菇柄粉末的制备 粗粉的制备:香菇柄切成长为 2 cm 小块,烘箱 60 $^{\circ}\text{C}$ ^[13] 烘干,烘干后食品研磨机粉碎,4 $^{\circ}\text{C}$ 密封保存。40 目粉的制备:将粗粉过 40 目筛后,4 $^{\circ}\text{C}$ 密封保存。超微粉的制备:参考史德芳等^[14]的方法略作改动。过 40 目的粉末,经过振动筛,进入气流粉碎机,进料量为 10 g/min,气体压力 0.8 MPa,分级转速 3000 r/min,粉碎 5 min,将样品取出,4 $^{\circ}\text{C}$ 密封保存。

1.2.2 香菇柄粉末理化性质的测定

1.2.2.1 香菇柄粉末粒径的测定 参考 Giry 等^[15] 的

方法,采用干法对样品进行粒度测定,以空气为介质。测定香菇柄粉末的 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、 $D_{(3,2)}$ 、 $D_{(4,3)}$ 、跨度值及比表面积(D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别代表累计分布达到 10%、50% 和 90% 时样品的粒径, $D_{(3,2)}$ 代表粉体表面积的平均直径, $D_{(4,3)}$ 代表粉体体积的平均直径,跨度值表示粒径分布的宽度),所有结果均使用激光粒度仪直接测得。

1.2.2.2 香菇柄粉末微观结构的观察 使用扫描电镜对不同粉碎处理的香菇柄粉末进行微观结构观察,取适量样品粉末粘在导电胶上,在真空条件下喷金,加速电压 15 kV,扫描电镜观察^[16]。

1.2.2.3 香菇柄粉末色泽测定 采用色差仪测定不同粉碎处理的香菇柄粉末色泽,将样品放在透明平板上,结果用 L^* 、 a^* 、 b^* 表示。按照公式(1)计算香菇柄粉末的总色差 ΔE ^[17]。

$$\Delta E = [(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]^{0.5} \quad \text{式 (1)}$$

式中: L^* 、 a^* 、 b^* 分别表示香菇柄粉碎后的亮度、红绿度、黄蓝度, L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 分别表示香菇柄粉碎前的亮度、红绿度、黄蓝度。

1.2.2.4 香菇柄粉末密度的测定 堆积密度与振实密度的测定参考王士佳等^[18]的方法,略作修改。堆积密度:称取 1 g 样品放入 10 mL 量筒中铺平表面,记录样品体积。按照公式(2)计算堆积密度。

$$\text{堆积密度(g/mL)} = m/v \quad \text{式 (2)}$$

式中: m 表示样品的质量, g ; v 表示记录的体积, mL。

振实密度:称取 1 g 样品放入 10 mL 量筒中,振荡量筒,直至样品体积不再变化,记录样品体积。按照公式(3)计算振实密度。

$$\text{振实密度(g/mL)} = m/v \quad \text{式 (3)}$$

式中: m 表示样品的质量, g ; v 表示记录的体积, mL。

1.2.2.5 香菇柄粉末休止角的测定 参考郝竞霄等^[19]的方法略作改动,将玻璃漏斗用铁架台固定,缓慢加入香菇柄粉末。直到粉末锥体的尖端接触到漏斗的尾端,测量锥体的半径及高度。按照公式(4)计算休止角。

$$\text{休止角}(\circ) = \arctan(H/R) \quad \text{式 (4)}$$

式中: R 表示锥体的半径, cm ; H 表示粉末锥体的高度, cm 。

1.2.2.6 香菇柄粉末滑角的测定 参考 Zhao 等^[20]的方法略作改动,将 1 g 香菇柄粉末样品倒在可移动倾斜的矩形塑料平板(10 $cm \times 30$ cm)上,通过逐渐抬升塑料平面,测量倾斜塑料平板顶部与水平面之间的垂直距离。以香菇粉开始滑动时的斜面与水平面的夹角作为滑角。按照公式(5)计算滑角。

$$\text{滑角}(\circ) = \arcsin(H/L) \quad \text{式 (5)}$$

式中: H 表示塑料平板距平面的垂直距离, cm ; L 表示玻璃平板的长度, cm 。

1.2.2.7 香菇柄粉末持水力和膨胀力的测定 持水力和膨胀力的测定方式参考刘宁等^[21]的方法,略作改动。

持水力测定:准确称取香菇柄粉末 0.5 g 于 10 mL 离心管中,加入 6 mL 蒸馏水,涡旋混匀,25 $^{\circ}C$ 下静置 4 h, 4000 r/min 离心 15 min 后收集沉淀,测量沉淀质量。按照公式(6)计算持水力。

$$\text{持水力(g/g)} = (m_1 - m_2 - m_3)/m_3 \quad \text{式 (6)}$$

式中: m_1 表示离心管加沉淀的质量, g ; m_2 表示离心管质量, g ; m_3 表示样品质量, g 。

膨胀力测定:准确称取香菇柄粉末 0.5 g 置于有刻度的玻璃试管中,记录香菇柄粉末的原体积,加入 8 mL 蒸馏水,振荡摇匀,20 $^{\circ}C$ 下静置 24 h,记录样品吸水后的体积。按照公式(7)计算膨胀力。

$$\text{膨胀力(mL/g)} = (V_1 - V_2)/m \quad \text{式 (7)}$$

式中: V_1 表示样品吸水后的体积, mL; V_2 表示样品的原体积, mL; m 表示样品的质量, g 。

1.2.3 香菇柄粉末功能物质的溶出特性分析

1.2.3.1 香菇柄粉末麦角固醇的检测方法 麦角固醇含量测定液相条件参考刘莉等^[22]的方法,略作修改。麦角固醇检测条件: Agilent Eclipse XDB-C18 色谱柱(4.6 $mm \times 250$ mm , 5 μm),流动相纯甲醇,柱温 30 $^{\circ}C$,紫外检测波长 270 nm,进样量 20 μL ,流速 1 mL/min,运行时间 15 min。以麦角固醇的峰面积为纵坐标,麦角固醇的质量浓度为横坐标,绘制麦角固醇的标准曲线,得到标准曲线 $y = 23.836x + 8.2651$, $R^2 = 0.9998$ 。

1.2.3.2 麦角固醇溶出动力学分析 精确称取 1 g 香菇柄粗粉、40 目粉、超微粉,分别加入 100 mL 无水乙醇中,50 $^{\circ}C$ 下超声(功率 300 W, 40 kHz)提取,分别在 1、3、5、7、10、20、30、45、60 min 时吸取 1 mL 上清液,吸取完毕后立即加入 1 mL 无水乙醇,保证总体积不变(防止因溶液体积减小,导致麦角固醇含量变大)。上清液离心,过 0.22 μm 滤膜后经 HPLC 测定不同时间麦角固醇含量,麦角固醇溶出量以每克样品所含麦角固醇质量计,单位为 $\mu g/g$ 。绘制溶出量与时间关系的曲线,并根据威布尔模型^[23-24]对结果进行拟合,根据公式(8)对累计溶出率 $F(\%)$ 和时间 $t(\text{min})$ 进行拟合。

$$F = 1 - \exp[-(t/\eta)^m] \quad \text{式 (8)}$$

式中: m 表示曲线的形状参数; η 表示曲线的比例参数,对公式(8)进行变换得到 $\ln[-\ln(1-F)] = m \ln t - m \ln \eta$,根据拟合公式结果求参数 m 和 η 。

1.2.3.3 香菇柄粉末多糖的测定方法 香菇柄粉末多糖含量的测定,参考金瑾等^[25]的方法略作改动。精确称取无水葡萄糖 0.1 g,蒸馏水溶解,配成质量浓

度 1 mg/mL 的葡萄糖标准液。分别吸取该葡萄糖溶液 0、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mL 于 10 mL 试管中,加水至 1 mL。向葡萄糖溶液中加入 1 mL 质量分数 2% 的苯酚溶液,再加入 2 mL 浓硫酸,90 ℃ 加热 10 min,蒸馏水冲洗试管降至 25 ℃,在 490 nm 处测其吸光度绘制标准曲线,得到线性回归方程为 $y=0.876x+0.005$, $R^2=0.9997$ 。

1.2.3.4 多糖溶出动力学分析 精确称取 1 g 香菇柄粗粉、40 目粉、超微粉,分别加入 10 mL 离心管中,随后加入 5 mL 蒸馏水,50 ℃ 水浴,分别在 1、3、5、7、10、20、30、45、60 min 时离心取上清液,根据多糖的标准曲线测定上清液中多糖的含量。多糖溶出量以每克样品所含多糖的质量计,单位为 mg/g。绘制溶出量与时间关系的曲线,并根据威布尔模型对结果进行拟合,根据公式(8)对累计溶出率 $F(\%)$ 和时间 $t(\text{min})$ 进行拟合。

1.3 数据处理

采用 Graph Pad Prism8 和 Origin2021 软件对数据进行处理。采用 SPSS26.0 进行差异显著性分析,所有样品平行测定 3 次,以平均值±标准差表示,均数比较采用邓肯多量程检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对香菇柄粉末理化性质的影响

2.1.1 不同处理对香菇柄粉末粒径的影响 不同处理的香菇柄粉末累计粒径分布,如图 1 所示,粗粉和 40 目粉的样品出现了两个粒径的峰。超微粉的样品粒径呈现单峰分布,超微粉的粒径最小,粒径主要分布在 1~10 μm 之间,粒径分布更加均匀,40 目粉的香菇柄粉末的粒径主要分布在 1~1000 μm 之间,粗粉的粒径主要在 3~3000 μm 之间,且粒径分布不均

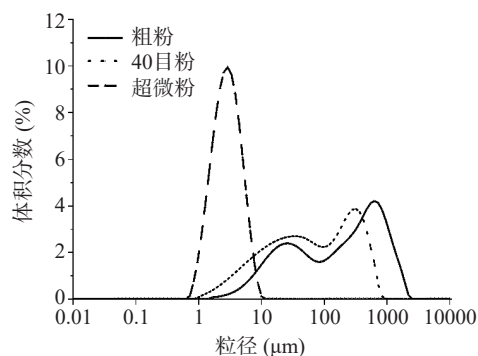


图 1 不同处理香菇柄粉末的累积粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of *Lentinus edodes* stem powder with different treatments

匀,粉体均一性差。

香菇柄粉末的粒径分布如表 1 所示。超微粉与粗粉和 40 目粉相比,样品的 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、跨度值、 $D_{(3,2)}$ 和 $D_{(4,3)}$ 显著减小($P<0.05$);比表面积显著增大($P<0.05$)。与粗粉相比,气流超微粉碎的 D_{10} 由 12.15 μm 降到 1.66 μm,降低了 86.34%, D_{50} 由 185.23 μm 降低到 3.21 μm,降低了 98.27%, D_{90} 由 920.75 μm 降低到 5.99 μm,降低了 99.35%;比表面积由 0.17 m²/g 增大到 2.06 m²/g,比表面积的增大可能会增加粉体的溶出能力。 D_{50} 降至 3.21 μm 表明粉体进入了超微粉的范围^[26]。粒径分布结果与 Heo 等^[27] 使用气流超微粉碎处理双孢菇后 D_{50} 由 231.00 μm 减小到 7.10 μm,跨度值减小的变化结果相似。与普通粉碎相比,气流粉碎可以严格控制粉体粒径,在气流超微粉碎过程中,粗粉被持续粉碎使其粒径减小,粉体在压缩气体的作用下进入粒径分离装置,将达到粒径要求的粉末排出,使粉末的粒径分布更窄更均匀^[28]。

2.1.2 不同处理对香菇柄粉末微观结构的影响 不同处理的香菇柄粉末扫描电镜如图 2 所示,分别对样品进行了 200 倍和 1000 倍的放大处理,粗粉呈现出不规则的球状、长条状、粉体颗粒大小不一,样品均一性差,40 目粉的样品呈现出不规则的长条状,超微粉的样品呈现出细小的颗粒状,表面的形状发生了变化,这可能是因为气流超微粉碎的机器将空气压缩行成超高速气流,在碰撞室内物料被气流冲击,使物料相互碰撞、摩擦^[29],从而使样品粒径减小,形状改变。在相同视野下的气流超微粉碎的样品颗粒数目

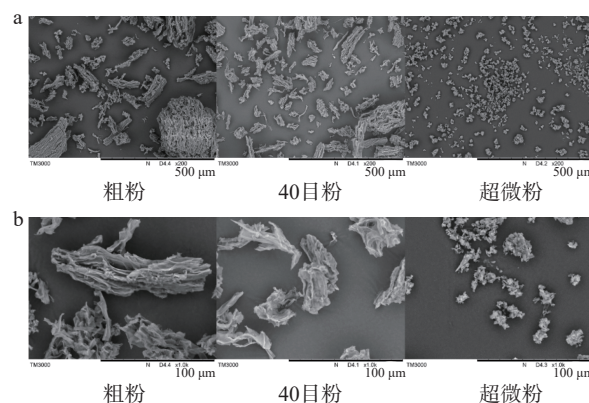


图 2 不同处理香菇柄粉末的扫描电镜图

Fig.2 SEM of *Lentinus edodes* stem powder with different treatments

注:×200 倍的样品(a);×1000 倍的样品(b)。

表 1 不同处理香菇柄粉末的粒径和比表面积

Table 1 Particle size and specific surface area of *Lentinus edodes* stem powder with different treatments

样品	$D_{10}(\mu\text{m})$	$D_{50}(\mu\text{m})$	$D_{90}(\mu\text{m})$	$D_{(3,2)}(\mu\text{m})$	$D_{(4,3)}(\mu\text{m})$	跨度值	比表面积(m ² /g)
粗粉	12.15±1.28 ^a	185.23±1.21 ^a	920.75±0.28 ^a	34.06±3.12 ^a	344.43±3.26 ^a	4.90±0.30 ^b	0.17±0.02 ^c
40 目粉	5.70±0.56 ^b	57.01±0.29 ^b	374.17±0.67 ^b	15.70±1.59 ^b	133.02±1.65 ^b	6.46±0.17 ^a	0.38±0.03 ^b
超微粉	1.66±0.18 ^c	3.21±0.24 ^c	5.99±0.12 ^c	2.58±0.06 ^c	3.33±0.14 ^c	1.34±0.08 ^c	2.06±0.04 ^a

注: 同列中不同字母代表样品具有显著性差异($P<0.05$),表2、表3同。

最多, 颗粒分布变得均匀, 扫描电镜的结果与粒径的结果一致。

2.1.3 不同处理对香菇柄粉末色泽的影响 颜色是食品粉末的重要品质, 它对决定消费者对各种食品的可接受程度起着重要的作用。不同处理的香菇柄粉末色泽如图 3 所示, 粗粉的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值与香菇柄接近, 40 目粉 L^* 值显著高于香菇柄, a^* 值和 b^* 值显著低于香菇柄 ($P<0.05$)。气流超微粉碎的香菇柄粉末 L^* 值最高, 与香菇柄相比超微粉的 L^* 值显著升高,

a^* 值和 b^* 值显著降低 ($P<0.05$)。这与 Phat 等^[30] 报道的超微气流粉碎后猴头菇的 L^* 值增加, a^* 值和 b^* 值下降的研究结果相似。 L^* 值的上升可能是因为气流超微粉碎后粉末的表面积增加, 内部的结构暴露增加, 粉末被粉碎的越细, 对光的反射越强, 导致其 L^* 值上升^[31]。 a^* 值和 b^* 值的下降可能是因为气流超微粉碎使香菇柄粉末纤维组分分布更加均匀, 减少了色素的暴露^[32]。三种加工方式的 ΔE 大小依次为, 粗粉<40 目粉<超微粉。对于 ΔE 在 0~2 左右, 颜色变化是不可见的, 但当 ΔE 大于 2 时, 颜色变化是明显和可见的^[33], 超微粉 ΔE 的增加是因为 L^* 值的增加起到了主要的影响作用, 40 目粉的 ΔE 高于粗粉, 这可能是因为过筛去除了有颜色的大颗粒物质, 本研究中 ΔE 的变化说明气流粉碎显著改变了香菇柄的色泽, 使其颜色更加明亮, 能够更好地被消费者认可。

2.1.4 不同处理对香菇柄粉末密度的影响 堆积密度和振实密度是评价粉体填充性能与压片性能的指标。堆积密度越大说明粉体的填充性能越好, 振实密度越大说明粉体越容易压片成型^[34]。通过对上述两种密度的比较, 可以衡量粉末中颗粒间的相互作用。香菇柄粉末的堆积密度和振实密度如表 2 所示, 超微粉与粗粉相比粉体的堆积密度和振实密度显著增大 ($P<0.05$), 堆积密度从 0.15 g/mL 增加到 0.25 g/mL, 振实密度从 0.23 g/mL 增加到 0.42 g/mL。说明粒径越小, 粉末的堆积密度和振实密度越大, 这与王朝川等^[35] 报道的超微粉碎使金针菇粉体粒径减小、堆积密度增大的结论类似。与普通粉碎相比, 超微粉碎后粉体比表面积增大, 粉体间作用力增强, 在相同的质量下粉体所需的体积变小, 从而增加了粉体的堆积密度和振实密度^[36]。

表 2 不同处理香菇柄粉末的密度

Table 2 Powder density of *Lentinus edodes* stem powder with different treatments

样品	堆积密度(g/mL)	振实密度(g/mL)
粗粉	0.15±0.02 ^b	0.23±0.05 ^b
40目粉	0.16±0.01 ^b	0.24±0.03 ^b
超微粉	0.25±0.06 ^a	0.42±0.02 ^a

2.1.5 不同处理对香菇柄粉末流动性的影响 粉末休止角和滑角是评价粉体流动性的指标。香菇柄粉末的休止角和滑角变化如表 3 所示, 粗粉、40 目粉、超微粉的休止角和滑角呈下降趋势, 超微粉显著低于粗粉和 40 目粉的休止角和滑角 ($P<0.05$), 休止角由 47.20°减小到 38.30°, 滑角由 42.68°减小到 35.09°。休止角和滑角越小, 说明粉体的流动性越好^[37]。经过气流超微粉碎后, 香菇柄粉末的粒径减小, 粉体流动性得到改善。粉体的流动性除了与粒径有关外, 还与粉体的本身的性质(摩擦力、粉体形状)^[6], 以及水分含量^[38] 有关。本研究表明超微气流粉碎可以显著提高香菇柄粉末的流动性, 这与 Ming 等^[39] 报道的超

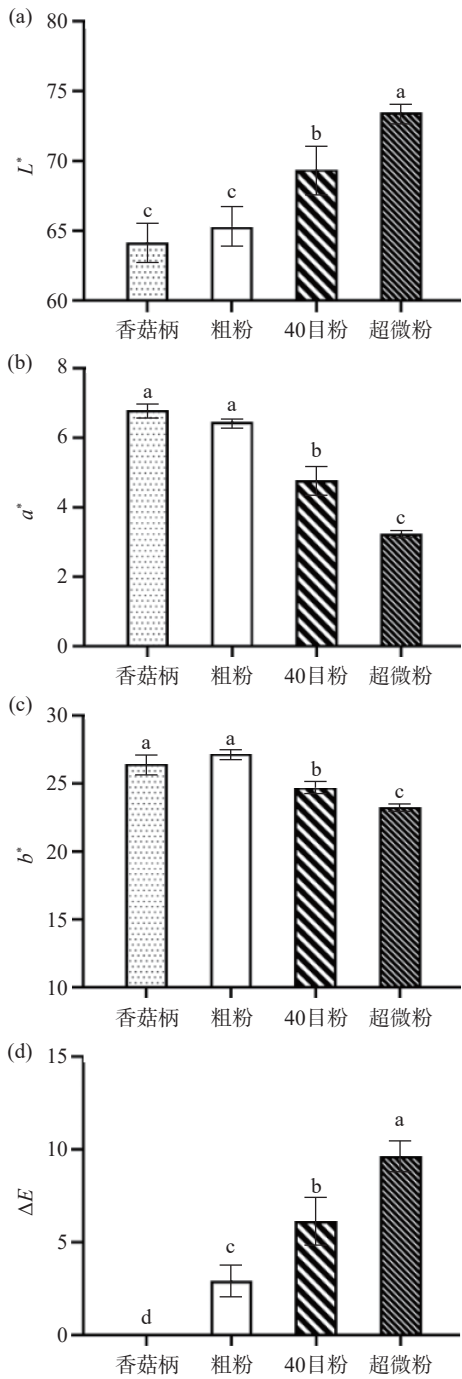


图 3 不同处理香菇柄粉末的 L^* (a), a^* (b), b^* (c), ΔE (d)
Fig.3 L^* (a), a^* (b), b^* (c), ΔE (d) of *Lentinus edodes* stem powder with different treatments
注: 图中不同小写字母表示样品具有显著性差异 ($P<0.05$), 图 4 同。

微粉碎后香菇粉末的粒径减小,粉体的休止角由 48.32° 减小到 44.15° ;滑角由 41.12° 减小到 35.75° ,香菇粉流动性增加的研究结果类似,这可能是因为超微粉的粉体大小均一、形状相似、摩擦力小,在重力的作用下更容易下滑,增加了香菇粉的流动性,普通粉碎的粉体颗粒形状大小相差较大,彼此之间相互阻碍使其流动性减弱。

表3 不同处理的香菇柄粉末流动性

Table 3 Flow properties of *Lentinus edodes* stem powder with different treatments

样品	休止角($^{\circ}$)	滑角($^{\circ}$)
粗粉	47.20 ± 0.82^a	42.68 ± 2.22^a
40目粉	43.53 ± 0.45^b	40.24 ± 1.40^b
超微粉	38.30 ± 0.69^c	35.09 ± 1.22^c

2.1.6 不同处理对香菇柄粉末持水力和膨胀力的影响 香菇柄粉末的持水力和膨胀力如图4所示,经过气流超微粉碎处理后,香菇柄粉末的膨胀力和持水力都显著增加($P < 0.05$),持水力由粗粉的 4.04 g/g 增加到 4.82 g/g ,膨胀力由粗粉的 2.32 mL/g 增加到 7.02 mL/g ,这可能是因为气流超微粉碎后,粉体的表面积变大,细胞壁被更多地破碎,粉体中的纤维素等亲水基团更多地暴露出来,使粉体更多地与水分接触,导致持水力与膨胀力增加[40]。刘丽娜等[41]使用球磨粉碎对香菇柄进行超微粉碎处理,超微粉的持水力和膨胀力显著提高,这可能是因为与普通粉碎相比,超微粉碎提高了香菇柄粉末中可溶性膳食纤维的含量,降低了不溶性膳食纤维的含量进而提高了香菇柄粉末的持水力与膨胀力。

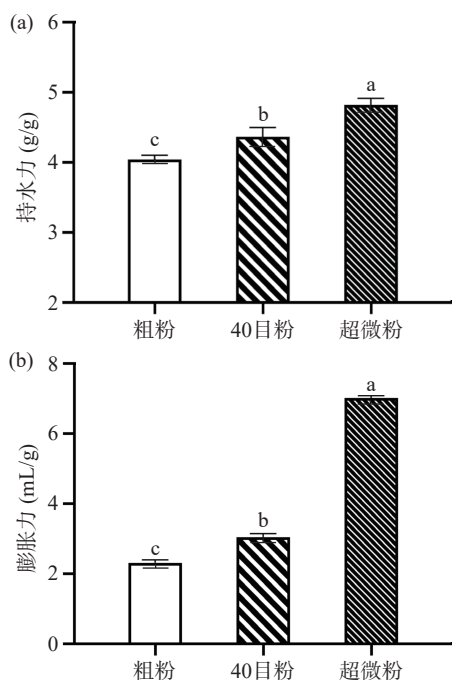


图4 不同处理香菇柄粉末的持水力(a)和膨胀力(b)

Fig.4 Water holding capacity (a) and expansion force (b) of *Lentinus edodes* stem powder with different treatments

2.2 不同处理对香菇柄粉末功能物质溶出特性的影响

2.2.1 不同处理的香菇柄中麦角固醇和多糖溶出量的研究 不同处理香菇柄粉末的麦角固醇溶出量如图5a所示,在1 min时,超微粉的麦角固醇溶出量为 $29.24 \mu\text{g/g}$,显著高于40目粉的 $23.54 \mu\text{g/g}$ 和粗粉的 $20.12 \mu\text{g/g}$ ($P < 0.05$),在0~10 min期间随着时间的增加,麦角固醇的溶出量逐渐增大,10 min后3种粉体的麦角固醇的溶出速率很小并趋于稳定。在60 min时超微粉的麦角固醇溶出量为 $44.28 \mu\text{g/g}$,显著高于40目粉的 $34.75 \mu\text{g/g}$ 和粗粉的 $30.79 \mu\text{g/g}$ ($P < 0.05$)。实验结果表明气流超微粉碎处理可以增加麦角固醇的溶出量,这与陈璵等[42]使用超微粉碎技术处理双孢蘑菇,提高了麦角固醇的溶出量的研究结果类似。与普通粉碎相比,气流超微粉碎具有较好的细胞壁破除效果,细胞膜被暴露,麦角固醇是真菌细胞膜的重要组成部分[43],增加了细胞膜与溶剂的接触面积,增加了麦角固醇的溶出。

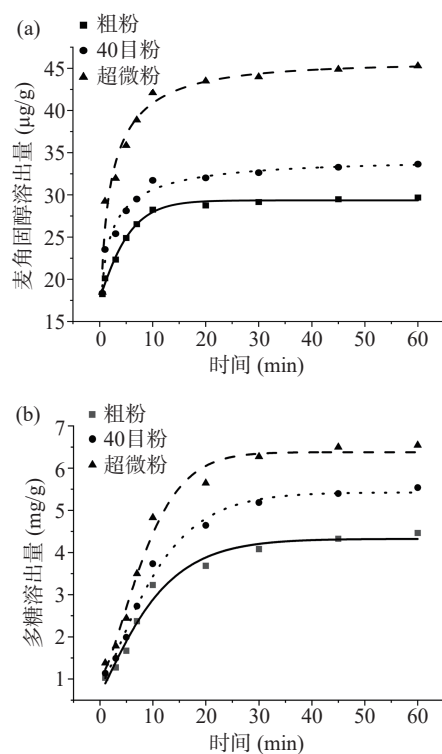


图5 不同处理香菇柄粉末的麦角固醇(a)和多糖(b)溶出曲线

Fig.5 Dissolution curve of ergosterol (a) and polysaccharides (b) from *Lentinus edodes* stem powder with different treatments

不同处理香菇柄粉末的多糖溶出量如图5b所示,在1 min时,超微粉的多糖溶出量为 1.37 mg/g ,显著高于40目粉的 1.13 mg/g 和粗粉的 1.02 mg/g ($P < 0.05$),在0~10 min期间随着时间的增加,多糖的溶出量逐渐增大,30 min后3种粉体的多糖的溶出速率增长变小并趋于稳定。在60 min时超微粉的多糖溶出量为 6.54 mg/g ,40目粉的多糖溶出量为 5.53 mg/g ,粗粉的多糖溶出量为 4.46 mg/g 。实验结

果表明气流超微粉碎处理可以增加多糖的溶出量,这与 Xu 等^[44]使用超微粉碎处理草菇,多糖的溶出量提高了 1.45 倍的研究结果相似。可能是因为气流超微粉碎后,减小了粉体的粒径,增大了粉体的表面积,使其在相同的时间里能更好地与溶剂接触,从而增加了多糖溶出量^[45]。

2.2.2 不同处理的香菇柄中麦角固醇和多糖溶出动力学分析为了更好地研究麦角固醇和多糖溶出规律,根据香菇柄粉末的麦角固醇和多糖的溶出量数据,按 Weibull 模型进行拟合,拟合曲线如图 6 所示,以 $\ln t$, $\ln[-\ln(1-F)]$ 为变量拟合出 3 种不同处理香菇柄粉末麦角固醇和多糖溶出率的回归方程, F 为不同时间的累计溶出率,并计算溶出度参数 T_{50} , T_d , Q_{45} (T_{50} 为累计溶出 50% 所需时间, T_d 为累计溶出 63.2% 所需时间, Q_{45} 为 45 min 的累计溶出率)。由

表 4 可以看出,香菇柄经过气流超微粉碎后,麦角固醇的溶出度参数 T_{50} 和 T_d 分别由原来的 4.12 min、20.08 min 下降到 1.56 min、6.59 min, Q_{45} 由原来的 65.04% 增加到 75.92%($P<0.05$);多糖的溶出度参数 T_{50} 和 T_d 分别由原来的 17.03 min、36.45 min 下降到 8.89 min、15.79 min, Q_{45} 由原来的 65.45% 增加到 84.60%($P<0.05$)。这与廖吕燕等^[46]使用超微粉碎处理灵芝后多糖和三萜类物质的 T_{50} 和 T_d 下降结果相似。与粗粉和 40 目粉相比超微粉的粒径显著降低,粉体达到超微粉级别,破除了香菇柄粉末中功能物质溶出的屏障,增加了功能物质的溶出^[47],导致超微粉的 T_{50} 和 T_d 下降、 Q_{45} 上升。溶出动力学结果表明拟合计算得出的溶出参数可以对不同粉体中功能物质的溶出量进行定量分析,并通过拟合方程可以对香菇粉的功能物质的溶出率进行预测。

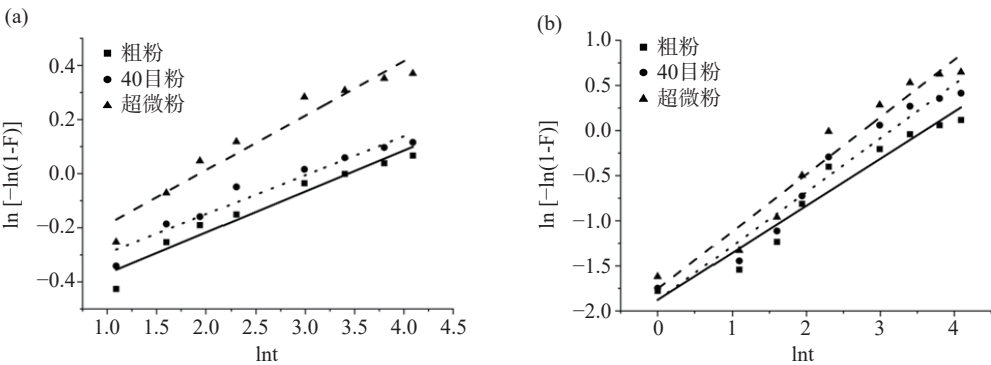


图 6 不同处理香菇柄粉末中麦角固醇(a)和多糖(b)溶出曲线的威布尔模型拟合

Fig.6 Weibull model fitting of dissolution curve of ergosterol (a) and polysaccharides (b) from *Lentinus edodes* stem powder with different treatments

表 4 香菇柄粉末麦角固醇和多糖的拟合曲线及溶出度参数

Table 4 Fitting curve and dissolution parameters of ergosterol and polysaccharide from *Lentinus edodes* stem powder

功能物质	样品	拟合曲线	r^2	m	η	$T_{50}(\text{min})$	$T_d(\text{min})$	$Q_{45}(\%)$
麦角固醇	粗粉	$\ln[-\ln(1-F)]=0.15\ln t-0.52$	0.97	0.15	23.33	4.12 ± 0.17^a	20.08 ± 1.03^a	65.04 ± 0.24^c
	40目粉	$\ln[-\ln(1-F)]=0.14\ln t-0.43$	0.96	0.14	21.54	2.98 ± 0.12^b	9.97 ± 0.82^b	67.80 ± 0.41^b
	超微粉	$\ln[-\ln(1-F)]=0.12\ln t-0.38$	0.96	0.12	23.57	1.56 ± 0.07^c	6.59 ± 0.35^c	75.92 ± 0.72^a
香菇多糖	粗粉	$\ln[-\ln(1-F)]=0.52\ln t-1.87$	0.97	0.52	36.23	17.03 ± 0.93^a	36.45 ± 1.21^a	65.45 ± 0.69^a
	40目粉	$\ln[-\ln(1-F)]=0.59\ln t-1.87$	0.97	0.59	23.57	12.52 ± 0.86^b	23.08 ± 1.04^b	76.01 ± 0.31^b
	超微粉	$\ln[-\ln(1-F)]=0.63\ln t-1.75$	0.98	0.63	15.95	8.89 ± 0.52^c	15.79 ± 0.73^c	84.60 ± 0.57^a

注: r^2 为曲线的决定系数, m 为曲线形状参数, η 为曲线比例参数, 同列的不同小写字母表示同一功能物质的不同样品具有显著性差异($P<0.05$)。

3 结论

本实验对香菇柄粉末进行气流超微粉碎处理,以粗粉和 40 目粉为对照,研究了气流超微粉碎对香菇柄粉末理化性质以及以麦角固醇和多糖为代表的功能物质溶出特性的影响。结果表明,经过气流超微粉碎处理后,香菇柄粉末的平均粒径 D_{50} 降至 $3.21\text{ }\mu\text{m}$,粉体比表面积增大, L^* 值升高,休止角和滑角减小,粉末流动性增强,堆积密度、振实密度、持水力、膨胀力显著提高($P<0.05$)。60 min 时超微粉麦角固醇和多糖的溶出量分别是粗粉的 1.43 和 1.46 倍。与粗粉相比超微粉麦角固醇和多糖的 T_{50} 分别减少了

2.56 和 8.14 min, Q_{45} 分别增加了 10.88% 和 19.15%。综上所述气流超微粉碎可以改善香菇柄粉末的理化性质,增加香菇柄中功能物质的溶出。本研究为气流超微粉碎处理后香菇柄粉末理化性质的变化、香菇副产物的利用以及香菇柄的精深加工提供了一定的参考。

参考文献

[1] 程洋洋, 惠靖茹, 郝竞霄, 等. 香菇柄发酵酱营养品质及风味成分研究[J]. 中国酿造, 2022, 41(7): 162-167. [CHENG Yangyang, HUI Jingru, HAO Jingxiao et al. Study on nutritional quality and flavor components of fermented sauce with mushroom handle

- [J]. *China Brewing*, 2022, 41(7): 162–167.]
- [2] TRIVEDI S, PATEL K, BELGAMWAR V, et al. Functional polysaccharide lentinan: Role in anti-cancer therapies and management of carcinomas[J]. *Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine*, 2022, 2: 100045.
- [3] JIANG Q, ZHANG M, MU J, et al. UV induced conversion during drying of ergosterol to vitamin D in various mushrooms: Effect of different drying conditions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 200–210.
- [4] KONSTANTIONS P, SIMONA G, AJAY M, et al. Recovery of ergosterol and vitamin D2 from mushroom waste potential valorization by food and pharmaceutical industries[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 99: 351–366.
- [5] 张瑞宇. 超微粉碎技术及其在食品领域中的重要应用[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2003(2): 11–15. [ZHANG Ruiyu. Ultra-fine comminution technology and its important application in the field of food[J]. *Journal of Chongqing Industrial and Commercial University (Natural Science Edition)*, 2003(2): 11–15.]
- [6] GAO W, 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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. [GAO Hong, SHI Defang, HE Jianjun, et al. Effect of superfine grinding on functional components and properties of *Lentinus edodes* stems[J]. *Food Science*, 2010, 31(5): 40–43.]
- [10] ZHANG Z, SONG H, PENG Z, et al. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(3): 406–413.
- [11] 刘素稳, 常学东, 李航航, 等. 不同粉碎方法对杏鲍菇超微粉体物化性质的影响[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(11): 2722–2727. [LIU Suwen, CHANG Xuedong, LI Hanghang, et al. Effects of different crushing methods on the physicochemical properties of *Pleurotus eryngii* ultra-fine powder[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(11): 2722–2727.]
- [12] 胡龙彪, 翟晓娜, 李媛媛, 等. 超微粉碎技术在农副产品中的应用进展[J]. *食品科技*, 2023, 48(2): 92–99. [HU Longbiao, ZHAI Xiaona, LI yuanyuan, et al. Application progress of superfine grinding in agricultural and sideline products: A review[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(2): 92–99.]
- [13] 杨伊琳, 丁俊雄, 吴小华, 等. 香菇热风干燥特性及动力学模型[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(4): 135–144. [YANG Yilin, DING Junxiong, WU Xiaohua, et al. Characteristics of *Lentinus edodes* hot-air drying and its kinetic model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(4): 135–144.]
- [14] 史德芳, 周明, 郭鹏, 等. 气流和机械碾轧超微粉碎香菇柄的效果比较[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 280–286. [SHI Defang, ZHO Ming, GUO Peng, et al. Effects comparison of superfine pulverizing of *Lentinus edodes* stem by air jet milling and wheel grinding[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 280–286.]
- [15] GIRY K, PEAN J M, GIRAUD L, et al. Drug/lactose co-micronization by jet milling to improve aerosolization properties of a powder for inhalation[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2006, 321(1–2): 162–166.
- [16] 任晓婵, 张风雪, 常靖瑶, 等. 不同粒径对超微粉碎大麦全粉品质特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(3): 227–233. [REN Xiaochan, ZHANG Fengxun, CHANG Jingyao et al. Effects of different particle sizes on the quality characteristics of superfine barley whole flour[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(3): 227–233.]
- [17] HUANG X, DOU J, LI D, et al. Effects of superfine grinding on properties of sugar beet pulp powders[J]. *LWT*, 2018, 87: 203–209.
- [18] 王士佳, 张璐, 葛善赢, 等. 两种粉碎机机型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. [WANG Shijia, ZHANG Lu, GE Shanying, et al. The effect of two types of pulverizers on the edible quality of chickpea sprout ultra-fine powder[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2022, 13(20): 6699–6705.]
- [19] 郝竞霄, 石福磊, 惠靖茹, 等. 普通粉碎与超微粉碎对茶树菇粉体加工物理特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(3): 95–100. [HAO Jingxiao, SHI Fulei, HUI Jingru, et al. Effects of common grinding and ultrafine grinding on physical properties of *Agrocybe cylindracea* powder[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(3): 95–100.]
- [20] ZHAO X Y, DU F L, ZHU Q J, et al. Effect of superfine pulverization on properties of *Astragalus membranaceus* powder[J]. *powder Technology*, 2010, 203(3): 620–625.
- [21] 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. [LIU Ning, LIN Ping, CHEN Xuefeng, et al. Effect of screw extrusion and ultra-fine grinding combined modification on soluble dietary fiber of kiwifruit[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(19): 143–148.]
- [22] 刘莉, 岳甜, 孙勇, 等. 高效液相色谱法同时测定食用菌和酵母菌中麦角固醇和 V(D2) 的方法研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(5): 291–297. [LIU Li, YUE Tian, SUN Yong, et al. Study on the method for simultaneous determination of ergosterol and V (D2) in edible fungi and yeast by HPLC[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(5): 291–297.]
- [23] 刘新义, 张水寒, 李健和, 等. 不同粒径连翘粉体中连翘苷体外溶出研究[J]. *中国中药杂志*, 2012, 37(21): 3233–3235. [LIU Xinyi, ZHANG Shuihan, LI Jianhe, et al. *In vitro* dissolution of forsythin in *Forsythia suspensa* powder of different particle diameter[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2012, 37(21): 3233–3235.]
- [24] 李全忠. 用威布尔函数求溶出参数[J]. *中国医院药学杂志*, 1991(1): 32–33. [LI Quanzhong. Using Weibull model to calculate dissolution parameters[J]. *Chinese Journal of Hospital Pharmacy*, 1991(1): 32–33.]
- [25] 金瑾, 刘延奇, 秦令祥. 蒸汽爆破辅助提取蔬菜多糖及苯酚-硫酸法测定其多糖含量的研究[J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(5): 116–120. [JIN Jin, LIU Yanqi, QIN Lingxiang. Study on extraction of water shield polysaccharide by steam explosion and determination of its polysaccharide content by phenol-sulfuric acid method[J]. *Grain and Oil*, 2022, 35(5): 116–120.]
- [26] XU Q L, HUANG R H, YANG P, et al. Effect of different superfine grinding technologies on the physicochemical and antioxi-

- dant properties of tartary buckwheat bran powder[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(49): 30898–30910.
- [27] HEO T Y, KIM Y N, PARK I B, et al. Amplification of vitamin D2 in the white button mushroom (*Agaricus bisporus*) by UV-B irradiation and jet-milling for its potential use as a functional ingredient[J]. *Foods*, 2020, 9(11): 1713–1724.
- [28] DJOKIC M, KACJIRIMANIS K, SOLOMUN L, et al. A study of jet-milling and spray-drying process for the physicochemical and aerodynamic dispersion properties of amiloride HCl[J]. *Powder Technology*, 2014, 262: 170–176.
- [29] 左金, 刘刚, 杜宁, 等. 超声速气流粉碎制备超细白桦茸[J]. 食品工业, 2021, 42(1): 229–232. [ZUO Jin, LIU Gang, DU Ning, et al. Preparation of ultra-fine white birch antler by supersonic air-flow pulverization[J]. *Food Industry*, 2021, 42(1): 229–232.]
- [30] 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.
- [31] 朱爽, 宋莉莎, 张佰清, 等. 大麦超微粉的营养品质及物理特性分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 289–295, 93. [ZHU Shuang, SONG Lisha, ZHANG Baiqing, et al. Analysis of nutritional quality and physical properties of barley ultrafine powder[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(1): 289–295, 93.]
- [32] HUSSAIN S, LI J, JIN W, 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.
- [33] ZHOU L, WANG Y, HU X, et al. Effect of high pressure carbon dioxide on the quality of carrot juice[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2009, 10(3): 321–327.
- [34] 张明, 熊永星, 孟晓峰, 等. 蒸汽爆破耦合超微粉碎技术对灵芝子实体粉体品质及理化特性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(12): 69–76. [ZHANG Ming, XIONG Yongxing, MENG Xiaofeng, et al. Effect of steam explosion coupled ultrafine grinding technology on the powder quality and physical and chemical properties of *Ganoderma lucidum* fruit body[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(12): 69–76.]
- [35] 王朝川, 李新胜, 马超, 等. 金针菇超微粉体物理特性及其制备工艺优化研究[J]. 食品工业, 2016, 37(6): 19–22. [WANG Chaochuan, LI Xinsheng, MA Chao, et al. Physical properties and preparation process optimization of superfine *Flammulina velutipes* powder[J]. *Food Industry*, 2016, 37(6): 19–22.]
- [36] ZHAO X, YANG Z, GAI G, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(2): 217–222.
- [37] ZHAO X, AO Q, DU F, et al. Surface characterization of ginger powder examined by X-ray photoelectron spectroscopy and scanning electron microscopy[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, 79(2): 494–500.
- [38] EMERY E, OLIVER J, PUGSLEY T, et al. Flowability of moist pharmaceutical powders[J]. *Powder Technology*, 2009, 189(3): 409–415.
- [39] MING J, CHEN L, HONG H, et al. Effect of superfine grinding on the physico-chemical, morphological and thermogravimetric properties of *Lentinus edodes* mushroom powders[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(12): 2431–2437.
- [40] 刘丽娜, 王安建, 李顺峰, 等. 香菇柄热风干燥特性及微粉性质研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(5): 126–131. [LIU Lina, WANG Anjian, LI Shunfeng et al. Study on hot air drying characteristics of mushroom stem and its properties of micro-powder[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2016, 37(5): 126–131.]
- [41] 刘丽娜, 路凤银, 李顺峰, 等. 两种超微粉碎方法对香菇柄粉体性质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(6): 58–62. [LIU Lina, LU Fengyin, LI Shunfeng et al. Effects of two ultrafine grinding methods on powder property of mushroom stem[J]. *Storage and Process*, 2020, 20(6): 58–62.]
- [42] 陈璁, 叶爽, 王桂华, 等. 不同干燥方式和粉碎程度对双孢蘑菇理化、营养和功能特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 88–97. [CHEN Cong, YE Shuang, WANG Guihua, et al. Effects of different drying methods and crushing degrees on the physico-chemical, nutritional and functional properties of *Agaricus bisporus*[J]. *Food Science*, 2023, 44(1): 88–97.]
- [43] 胡成成, 余鹏举, 李少杰. 真菌中麦角甾醇合成的调控机制[J]. 菌物研究, 2019, 17(3): 138–146. [HU Chengcheng, YU Pengju, LI Shaojie. Regulation mechanism of ergosterol synthesis in fungi[J]. *Microbial Research*, 2019, 17(3): 138–146.]
- [44] XU J, LIU Y, ZHANG N, et al. Effect of superfine grinding on the physicochemical properties of straw mushroom (*Volvariella volvacea*) powders rich in vitamin D2[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(12): 17192–17203.
- [45] 王宝东, 杨丽, 许瀛引, 等. 杏鲍菇超微粉微波提取粗多糖效果的分析[J]. 中国食用菌, 2014, 33(5): 58–59. [WANG Baodong, YANG Li, XU Yingyin, et al. Analysis on the effects of crude polysaccharide extracting from *Pleurotus eryngii* superfine powder by microwave[J]. *Edible Fungi of China*, 2014, 33(5): 58–59.]
- [46] 廖吕燕, 崔萧瑜, 李健, 等. 超微粉碎对菌草鹿角灵芝中多糖、三萜类溶出度的影响[J]. 中兽医医药杂志, 2015, 34(2): 13–17. [LIAO Lüyan, CUI Xiaoyu, LI Jian, et al. Effects of ultramicro-pulverization on the polysaccharide and triterpenes dissolubility of Juncacantelope-shape *Ganoderma lucidum*[J]. *Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine*, 2015, 34(2): 13–17.]
- [47] 丁志平, 蔡光先, 唐正平, 等. 灵芝的常规粉与超微粉中多糖溶出度比较实验[J]. 湖南中医杂志, 2010, 26(6): 105–107. [DING Zhiping, CAI Guangxian, TANG Zhengping, et al. Comparative experiment on the dissolution of polysaccharides in conventional powder and ultramicro powder of *Ganoderma lucidum*[J]. *Hunan Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2010, 26(6): 105–107.]