

# 超微粉碎对羊肚菌粉品质特性的影响

曾小峰<sup>1</sup> 颜 蜜<sup>1</sup> 盖智星<sup>2</sup> 曾顺德<sup>1</sup> 高伦江<sup>1</sup>

(1. 重庆市农业科学院, 重庆 401329; 2. 陕西省产品质量监督检验研究院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** [目的] 探究超微粉碎对羊肚菌粉品质特性的影响。[方法] 采用振动式超微粉碎制备羊肚菌粉, 研究不同超微粉碎时间对羊肚菌粉的理化性质和营养溶出的影响。[结果] 随着超微粉碎时间的增加, 羊肚菌粉的比表面积显著增大, 中位粒径  $D_{50}$  逐渐降低, 超微粉碎 5 min 后可达到微米级别; 超微粉碎后颗粒大小更加均匀, 粉体色泽更明亮; 休止角、滑角、持油力分别在超微粉碎 5, 10, 10 min 时达到平衡点, 继续增加超微时间无显著性变化。持水力在超微粉碎 5 min 达到最大后逐渐降低, 振实密度和堆积密度呈降低趋势; 随超微时间的延长, 多糖含量不断增加, 可溶性膳食纤维含量先增加后降低, 超微粉碎 15 min 时含量最高, 蛋白质含量和 DPPH 自由基清除率无显著性变化。[结论] 超微粉碎对羊肚菌粉的物化性质有显著影响, 可根据实际加工需求和目的选择超微粒径。

**关键词:** 羊肚菌; 超微粉碎; 理化性质; 特性

## Effects of superfine grinding on quality characteristics of *Morchella esculenta* powder

ZENG Xiaofeng<sup>1</sup> YAN Mi<sup>1</sup> GE Zhixing<sup>2</sup> ZENG Shunde<sup>1</sup> GAO Lunjiang<sup>1</sup>

(1. Chongqing Academy of Agricultural Science, Chongqing 401329, China;

2. Shaanxi Institute of Supervision & Testing on Product Quality, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** [Objective] In order to explore the effect of superfine grinding on the quality characteristics of *Morchella esculenta* powder. [Methods] Vibrating superfine grinding used to prepare *M. esculenta* powder and the effects of different superfine grinding times on the physicochemical properties and nutrient dissolution were studied. [Results] With the increase of superfine grinding time, the specific surface area of *M. esculenta* powder significantly increased, the median particle size  $D_{50}$  decreased gradually, and the micron level could reach in 5 minutes of superfine grinding; The particle size was more well-distributed and the color of the powder was brighter after superfine grinding; The angle of repose, sliding angle and oil holding capacity reached the equilibrium point at 5 minutes, 10 minutes and 10 minutes respectively, and there was no significant change in increasing superfine grinding time. The water holding capacity gradually decreased after reaching the maximum at 5 minutes. while, the bulk density and tap density showed a decreasing trend; With the extension of superfine grinding time, the content of polysaccharide increased continuously, the soluble dietary fiber content decreased after increasing, and reached the highest level at 15 minutes. No significant change was found in protein content and DPPH free radical clearance rate. [Conclusion] The physicochemical properties of *M. esculenta* powder could be significantly affected by superfine grinding and the ultrafine particle size can be selected based on the practical processing needs and purposes.

**Keywords:** *Morchella esculenta*; superfine grinding; physicochemical properties; characteristics

羊肚菌味道鲜美, 富含丰富的蛋白质、脂肪酸、维生素、矿物质等人体所需营养物质, 还含有多种生物活性成分, 如多糖、酚类、萜类、氨基酸等, 使其具有抗氧化<sup>[1]</sup>、抗菌<sup>[2]</sup>、降血脂<sup>[3]</sup>、抗肿瘤<sup>[4-5]</sup>、调节免疫<sup>[6-7]</sup>等作用, 极具营养保健和药用价值, 深受消费者青睐。目前对羊肚菌的

研究主要集中在人工栽培技术、营养保健功效、保鲜技术、干制技术等方面, 其中, 干制技术的应用能极大解决羊肚菌水分含量高、质地柔软不耐贮藏的问题, 但加工技术和产品较初级, 不能满足其作为高价值名贵食(药)用菌的价值体现。因此, 干制后联合超微粉碎技术将其制

**基金项目:** 重庆市财政科研项目(编号: cqas2023sjczsy008); 重庆市现代农业产业技术体系(编号: CQMAITS202306-5)

**通信作者:** 高伦江(1979—), 男, 重庆市农业科学院研究员, 硕士。E-mail: 58008826@qq.com

**收稿日期:** 2023-12-07 **改回日期:** 2024-05-18

粉,用作食品原辅料、功能食品等高值化产品开发、功能成分提取等领域,不仅能拓宽羊肚菌深加工产品品类,还能最大限度地利用羊肚菌残次菇,减少资源浪费,提升经济价值。

超微粉碎是一种利用机械或流体动力将物料颗粒粉碎至微米级粉体的物理改性技术<sup>[8]</sup>,具有诸多优点:能大幅降低物料粒度,显著改变粉体性质,如增大比表面积,改善持水力、持油力、膨胀力、流动性等理化性质,从而更适应不同加工需求;促进营养成分的溶出,如超微粉碎与剪切破碎和球磨相比,多糖含量分别由 100.38、123.59 mg/g 提高到 160.54 mg/g<sup>[9]</sup>,苹果渣超微粉总酚含量可提高 52.78%<sup>[10]</sup>;还可以改善膳食纤维高含量食品的口感和消化吸收能力,提高纤维食品资源利用率<sup>[11]</sup>。目前该技术被广泛应用于果蔬、调味品、中药材等,针对食用菌也有较多研究,如关于粉体性质、营养溶出、新食品开发等,但鲜见超微粉碎处理对羊肚菌粉体加工特性的研究。

研究拟以羊肚菌残次菇为原料,对不同超微粉碎时间下粉体物化性质、营养成分等指标进行测定,研究羊肚菌粉品质特性及加工适应性,以期对羊肚菌的利用及精深加工产品开发提供理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

羊肚菌(七妹羊肚菌)、花生调和油:市售;

乙醇:分析纯,重庆川东化工(集团)有限公司;

硫酸、盐酸、氢氧化钠:分析纯,成都市科隆化学有限公司;

DPPH:分析纯,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;

硼酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

耐高温 $\alpha$ -淀粉酶溶液(1万U/mL)、蛋白酶溶液(300~400 U/mL)、淀粉葡萄糖苷酶溶液(2 000~3 300 U/mL):伊势久生物科技有限责任公司。

### 1.2 仪器与设备

离心机: TG-1850型,四川蜀科仪器有限公司;

微粉机: SYFM-8II型,济南松岳机器有限责任公司;

电子天平: FA2004型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

恒温水浴锅: HH-4型,国华电器有限公司;

超声波清洗仪: KQ-600DB型,昆山市超声仪器有限公司;

分光光度计: UV-6000PC型,上海元析仪器有限公司;

粉碎机: YL-BS22型,广东德玛仕智能厨房设备有限公司;

激光粒度仪: HELOS-OASIS型,德国新帕泰克公司;

测色仪: CM-5型,柯尼卡美能达控股株式会社;

凯氏定氮仪: K9860型,海能未来技术集团股份有限公司;

扫描电镜: SU8600型,日本日立公司。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 样品制备 将羊肚菌用破壁机进行粗粉碎过40目筛,混匀得到粗粉Y-0样品。每次取500g粗粉Y-0进行超微粉碎,粉碎时间分别设置为5、10、15、20、25 min,分别得到不同粒径羊肚菌超微粉Y-5、Y-10、Y-15、Y-20、Y-25。

1.3.2 粉体粒径 采用激光粒度分析仪对羊肚菌粉进行粒度测定,取适量羊肚菌粉末干法测定,空气为分散介质,室温下测定粉体的 $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$ (分别为样品的累积粒度分布百分数达到10%、50%、90%时所对应的粒径)和比表面积等。

1.3.3 粉体扫描电镜结构 取少量样品固定后进行喷金前处理,放入扫描电镜进行观察,对比分析不同粉体之间的颗粒表面形貌特点。

1.3.4 色泽 采用色差仪进行测定,先对仪器进行黑板和白板校正,取适量粉体于样品皿,于桌面轻拍样品皿底平铺粉体后进行测定。

#### 1.3.5 持水力和持油力

(1) 持水力:参考刘丽娜等<sup>[12]</sup>的方法。

(2) 持油力:参考刘丽娜等<sup>[12]</sup>的方法修改如下:取1g样品于离心管,加入10 mL花生调和油,振荡器分散后置于37℃恒温水浴1 h,10 000 r/min离心15 min,除去上层花生油。

1.3.6 振实密度 参考寇福宾等<sup>[13]</sup>的方法并修改,称取10 g样品,装入100 mL量筒中充分振实,直至量筒内粉末体积不再变化,读取粉末体积,按式(1)计算振实密度。

$$\rho_t = m/V, \quad (1)$$

式中:

$\rho_t$ ——振实密度, g/mL;

$m$ ——原料样品质量, g;

$V$ ——粉末振实后的体积, mL。

1.3.7 堆积密度 取5 g样品放入100 mL量筒中,轻敲击量筒壁使粉末表面平整,铺平后读取粉末体积,按式(2)计算堆积密度。

$$\rho_b = m/V, \quad (2)$$

式中:

$\rho_b$ ——堆积密度, g/mL;

$m$ ——原料样品质量, g;

$V$ ——粉末装入量筒后平铺时的体积, mL。

1.3.8 膨胀力 参考蒋丽娜等<sup>[14]</sup>的方法修改,称取5 g样品置于100 mL量筒中,轻微敲击量筒壁使粉末表面平整,读取初始体积,移取75 mL纯水加入样品中混匀,静置24 h后,读取吸水膨胀后样品体积。按式(3)计算膨胀力。

$$S_{wc} = \frac{V_2 - V_1}{m}, \quad (3)$$

式中:

$S_{wc}$ ——膨胀力, mL/g;

$m$ ——原料样品质量, g;

$V_1$ ——初始量筒内粉末的体积, mL;

$V_2$ ——静置 24 h 后量筒内湿基的体积, mL。

1.3.9 滑角 参考王维涛等<sup>[15]</sup>的方法并修改,将 1 g 样品倒在玻璃平板固定位置,通过逐渐抬升玻璃板,测量倾斜玻璃板顶部与水平面之间的垂直距离,以粉体开始滑动时的斜面与水平面的夹角为滑角。按式(4)计算膨胀力。

$$\alpha = \arcsin(H/L), \quad (4)$$

式中:

$\alpha$ ——滑角,°;

$H$ ——玻璃板距平面的垂直距离, cm;

$L$ ——玻璃平板的长度, cm。

1.3.10 休止角 参考郭常升<sup>[16]</sup>的方法,将漏斗固定在铁架台上,其底端距离水平桌面高度 3 cm,向漏斗中缓慢加入粉体,添加的量为水平桌面上出现圆锥形,并且圆锥形的上端接触到漏斗的下端为止。按式(5)计算膨胀力。

$$\theta = \arctan(H/r), \quad (5)$$

式中:

$\theta$ ——休止角,°;

$r$ ——水平桌上圆锥形半径, cm;

$H$ ——漏斗底端距离水平桌面的距离, cm。

1.3.11 营养成分

(1) 蛋白质含量:参考 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》。

(2) 多糖含量:选择苏州梦犀生物医药科技有限公司

粗多糖含量测定试剂盒,按照试剂盒说明书进行测定。

(3) 膳食纤维含量:参考 GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》。

1.3.12 DPPH 自由基清除能力 参考黄姍等<sup>[17]</sup>的方法并修改,称取 2.5 g 样品于离心管中,加入 10 mL 的 70% 乙醇溶液,超声提取 20 min,10 000 r/min 离心 15 min,上清液采用 70% 乙醇定容到 100 mL 容量瓶待测。取 2.0 mL 提取液加入 0.2 mmol/L 的 DPPH 溶液 2.0 mL,摇匀后避光保持 30 min,在 517 nm 下测定反应体系的吸光值。

1.3.13 数据处理 试验数据使用 Excel 进行分析,采用 SPSS 25.0 软件对数据进行显著性差异分析,用 Origin 9.0 软件进行绘图,试验结果以平均值±标准差表示。

## 2 结果分析

### 2.1 超微粉碎对羊肚菌粉粒径的影响

羊肚菌不同超微粉碎时间的粒径分布测定结果见表 1。随着超微粉碎时间增加,粉体粒径不断减小。中位粒径  $D_{50}$  是评价粉体粒度的典型指标,常用来表示粒径的平均粒度。经超微粉碎后,与粗粉 Y-0 相比,超微粉碎 5 min 的  $D_{50}$  由 121.64  $\mu\text{m}$  减小到 11.81  $\mu\text{m}$ ,Y-0 与 Y-5 具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ),且超微粉碎 5 min 即可达到超微粉级别<sup>[18]</sup>,再增加超微粉碎时间,粒径变化不显著 ( $P > 0.05$ )。此外,粉体的比表面积随着粒径的减小呈显著增大的趋势,超微粉碎 5 min 样品 Y-5 的比表面积是粗粉 Y-0 的 6.17 倍,Y-25 是 Y-0 的 9.5 倍,比表面积越大,物料与外界接触面越广,与其他物质更易混合均匀<sup>[19]</sup>。

表 1 超微粉碎时间对羊肚菌粉粒径及比表面积的影响<sup>†</sup>

Table 1 Particle size and specific surface area at different superfine grinding times

超微粉碎时间/min	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )
0	8.74±0.52 <sup>a</sup>	121.64±14.06 <sup>a</sup>	365.54±25.77 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>
5	2.04±0.05 <sup>b</sup>	11.81±0.24 <sup>b</sup>	50.65±0.75 <sup>b</sup>	0.37±0.01 <sup>b</sup>
10	1.56±0.02 <sup>c</sup>	8.63±0.11 <sup>b</sup>	29.35±0.49 <sup>c</sup>	0.47±0.00 <sup>c</sup>
15	1.51±0.03 <sup>c</sup>	8.13±0.13 <sup>b</sup>	25.64±0.27 <sup>c</sup>	0.49±0.01 <sup>d</sup>
20	1.41±0.04 <sup>c</sup>	7.37±0.10 <sup>b</sup>	23.87±0.35 <sup>c</sup>	0.52±0.01 <sup>e</sup>
25	1.29±0.01 <sup>c</sup>	6.58±0.05 <sup>b</sup>	21.31±0.15 <sup>c</sup>	0.57±0.00 <sup>f</sup>

† 同列字母不同表示不同超微粉碎时间样品间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 超微粉碎对羊肚菌色泽的影响

如表 2 所示,随着超微粉碎时间增加, $L^*$  值逐渐增大,粗粉 Y-0 与超微粉具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ),超微粉碎 15 min 后变化不显著, $L^*$  值由粗粉的 61.84 增加到超微粉的 70.30,增加了 13.68%, $a^*$  值由 3.88 降低到 2.99,下降了 22.94%, $b^*$  值整体下降了 2.63%,变化不显著 ( $P > 0.05$ )。结果表明,超微粉碎后羊肚菌粉的  $L^*$  值增加, $a^*$  值和  $b^*$  值降低,主要是粒径减小比表面积增大,粉体更

加均匀,光反射增加导致亮度增加<sup>[20]</sup>,同时,粉体内部物质如纤维素、半纤维素等暴露出来,也会影响粉体的颜色<sup>[21]</sup>。这与气流超微粉碎香菇柄的研究结果相似<sup>[15]</sup>,但与宋光明<sup>[22]</sup>超细化羊肚菌色泽变化不同,可能是由于品种差异、或是超微粉碎过程产生热量导致酚类氧化不同造成。

### 2.3 羊肚菌粉微观结构

如图 1 所示,粗粉 Y-0 颗粒呈不规则的块状、片状等,

表2 超微粉碎时间对羊肚菌粉色泽的影响<sup>†</sup>Table 2 Effects of different superfine grinding time on the color of *M. esculenta* powder

超微粉碎时间/min	L*值(亮度)	a*值(红绿值)	b*值(黄蓝值)
0	61.84±0.24 <sup>d</sup>	3.88±0.14 <sup>a</sup>	16.74±0.24
5	67.59±0.34 <sup>c</sup>	3.45±0.14 <sup>b</sup>	16.52±0.37
10	69.01±0.23 <sup>b</sup>	3.31±0.10 <sup>b</sup>	16.55±0.23
15	69.95±0.14 <sup>a</sup>	3.10±0.09 <sup>c</sup>	16.26±0.26
20	70.14±0.21 <sup>a</sup>	3.08±0.10 <sup>c</sup>	16.41±0.26
25	70.30±0.30 <sup>a</sup>	2.99±0.12 <sup>c</sup>	16.30±0.34

<sup>†</sup> 同列字母不同表示不同超微粉碎时间样品间差异显著( $P<0.05$ )。

表面较光滑平坦,颗粒较大且大小不均匀。经超微粉碎5 min后,颗粒表面变得粗糙,内部结构暴露出来,颗粒呈现出完整的碎片化,且随着粉碎时间的继续增加,颗粒不断减小且大小变得更加均匀,扫描电镜结果进一步印证了超微粉碎降低了羊肚菌粉的颗粒粒径,破坏了粉体表面结构,导致粉体理化加工性质发生改变。

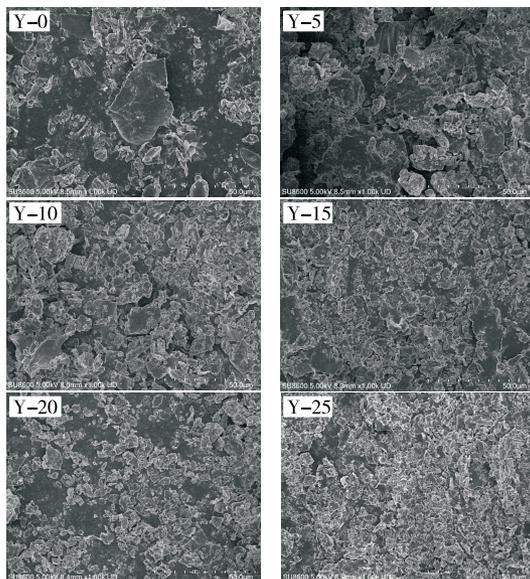


图1 不同超微粉碎时间羊肚菌粉的电镜扫描图

Figure 1 Electron microscope scan of *M. esculenta* powder at different superfine grinding times (1 000×)

#### 2.4 超微粉碎对羊肚菌粉水合性质的影响

由图2可知,经过适当的超微粉碎,羊肚菌粉持水力与持油力呈先增加后降低或趋于平稳的趋势,持水力在超微粉碎5 min时达到最大值1.98 g/g,比粗粉Y-0持水力显著提高了13.14%,可能是随着颗粒粒径的减小,增大了

超微粉颗粒比表面积和表面能,颗粒与水的接触面积增加,或物料间孔隙增多使水分更易渗入<sup>[23-24]</sup>,后随超微粉碎时间增加持水力呈下降趋势,可能是超微粉碎过程破坏了粉体内多糖链结构,导致持水性降低<sup>[25]</sup>,也可能是随着粉体粒径的不断减小,颗粒间会发生团簇行为,使得颗粒间相互作用力增大,影响羊肚菌粉与水分子之间的相互作用,导致持水性下降<sup>[26]</sup>,与任春春<sup>[27]</sup>对方竹笋的研究结果一致;持油力在超微粉碎10 min时达到最大值1.32 g/g,比粗粉Y-0显著提高了8.20%,继续增加超微粉碎时间,持油力变化不显著;溶胀力在超微粉碎5 min有所增加,随着超微粉碎时间增加,溶胀力呈降低趋势,当超微粉碎25 min时溶胀力又开始增加,但整体上粗粉和超微粉无显著性差异( $P>0.05$ )。

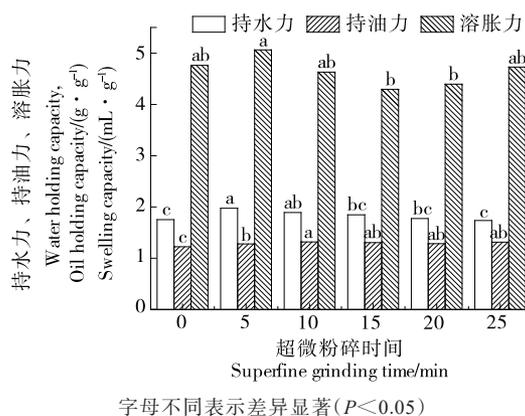


图2 超微粉碎时间对羊肚菌粉水合性质的影响

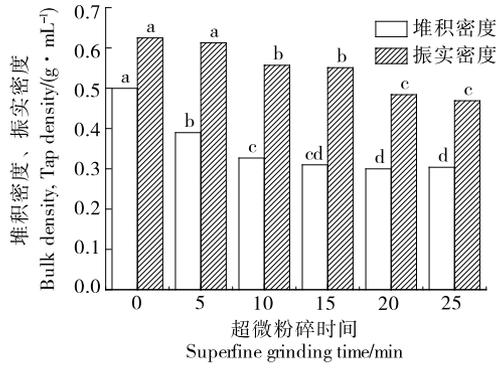
Figure 2 Effects of different superfine grinding time on hydration properties of *M. esculenta* powder

#### 2.5 超微粉碎对羊肚菌粉密度的影响

如图3所示,羊肚菌粉堆积密度随着超微粉碎时间的增加呈不断下降后趋于平衡的状态,堆积密度由0.50 g/mL下降到0.30 g/mL,且粗粉Y-0和超微粉有显著性差异( $P<0.05$ )。这可能是颗粒粒度减小使得颗粒之间的作用力增强,颗粒之间空隙率增大,导致堆积密度变小<sup>[28]</sup>。振实密度随超微粉碎时间增加呈下降趋势,从0.63 g/mL下降到0.47 g/mL,可能是相同质量的微粉粒径减小,颗粒间的空间更大,能够夹带和吸附更多的空气,密度变小,与粗粉相比更为蓬松<sup>[29]</sup>,与赵萌萌等<sup>[30]</sup>对青稞麸皮粉的研究结果一致。

#### 2.6 超微粉碎对羊肚菌粉流动性的影响

由图4可知,随着超微粉碎时间的增加,粉体滑角呈增大趋势,超微粉碎10 min后粉体与粗粉Y-0具有显著性差异( $P<0.05$ ),继续延长粉碎时间对粉体滑角无显著性影响( $P>0.05$ )。超微粉的休止角显著大于粗粉( $P<0.05$ ),但超微粉之间无显著性差异( $P>0.05$ )。引起滑角

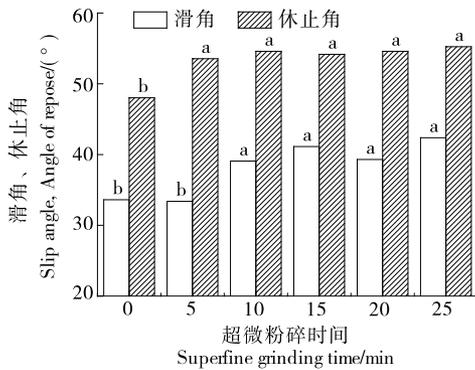


字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图3 超微粉碎时间对羊肚菌粉密度的影响

Figure 3 Effects of different superfine grinding time on the density of *M. esculenta* powder

和休止角增大的原因可能是粉体粒径减小, 表面积增大, 粉体间接触频率增大, 另外粉体自身凝聚力和吸附作用引起聚合力增大, 吸附性增强, 摩擦力变大, 导致流动性降低<sup>[31]</sup>。



字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图4 超微粉碎时间对羊肚菌粉流动性的影响

Figure 4 Effects of different superfine grinding time on fluidity of *M. esculenta* powder

### 2.7 超微粉碎对营养物质及抗氧化性的影响

**2.7.1 蛋白质含量** 如图5所示, 随超微粉碎时间增加羊肚菌粉蛋白质含量先稍有增加后降低, 但羊肚菌粗粉 Y-0 的蛋白质含量与超微粉无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 说明超微粉碎对羊肚菌蛋白质的溶出基本无影响, 与梁晓君等<sup>[32]</sup>对玉米的检测结果一致。

**2.7.2 可溶性膳食纤维含量** 如图6所示, 可溶性膳食纤维含量随超微粉碎时间增加呈先增加后降低的趋势, 超微粉均显著高于粗粉 Y-0 ( $P < 0.05$ ), 且超微粉碎 15 min 可溶性膳食纤维含量达到最大, 比粗粉 Y-0 增加了 2.04 倍。说明超微粉碎有助于提高可溶性膳食纤维的含量。这可能是由于超微粉碎对膳食纤维结构的破坏, 糖

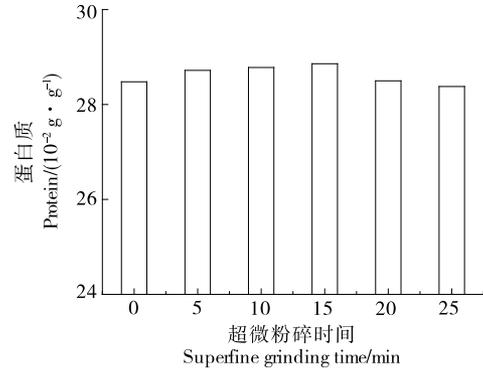
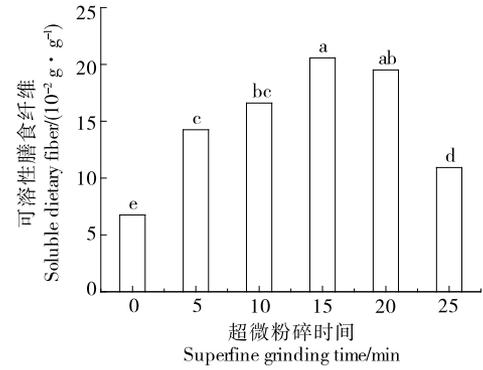


图5 超微粉碎时间对羊肚菌蛋白质含量的影响

Figure 5 Effects of different superfine grinding time on crude protein of *M. esculenta*

苷键断裂导致部分不溶性膳食纤维转化为可溶性膳食纤维<sup>[12]</sup>, 同时粉体粒径变小, 表面积增大, 更有利于测定过程中可溶性膳食纤维的溶出<sup>[14]</sup>。



字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图6 超微粉碎时间对羊肚菌可溶性膳食纤维含量的影响

Figure 6 Effects of different superfine grinding time on soluble dietary fiber of *M. esculenta*

**2.7.3 多糖含量** 如图7所示, 与粗粉 Y-0 相比, 超微粉碎羊肚菌粉的多糖含量显著提高, 且随粉碎时间增加, 多糖含量不断增加, 超微粉碎 25 min 后多糖含量比粗粉 Y-0 提高了 29.24%。超微粉多糖含量增加可能是粒径变小、细胞壁破坏比较完全, 更有利于多糖成分的暴露<sup>[33]</sup>。在白木耳超微粉碎过程中可以观察到一致的趋势, 其超微粉碎时间与多糖提取率呈正相关<sup>[34]</sup>。

**2.7.4 清除 DPPH 自由基能力** 如图8所示, 经超微粉碎处理后, DPPH 自由基清除率与粗粉 Y-0 相比有所增加, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 不同超微时间处理组间差异也不显著 ( $P > 0.05$ )。但卢琪等<sup>[35]</sup>发现, 羊肚菌超微经不同非热加工 (室温、超声、均质、超高压) 处理后, 其水提液的 DPPH 自由基清除率随粒径减小而降低, 可能是提取液或超微设备差异导致的。同时, 王博等<sup>[8]</sup>对 4 种杂粮清除

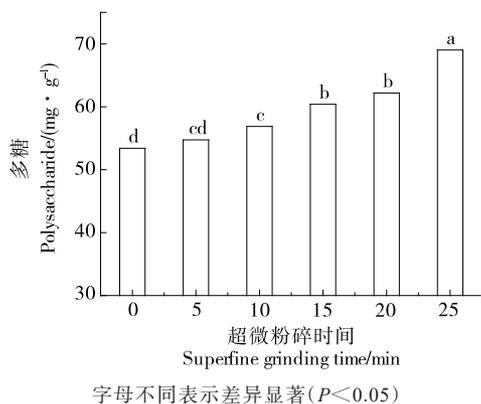


图7 超微粉碎时间对羊肚菌多糖的影响

Figure 7 Effects of different superfine grinding time on polysaccharide of *M. esculenta*

DPPH 自由基活性进行比较,发现红豆经超微粉碎后对 DPPH 自由基的清除率与粗粉无显著差异,但其他 3 种(薏米、青稞、荞麦)杂粮超微粉清除率均显著提高,可能与样品成分含量,以及超微过程粉体自身氧化未能提升抗氧化能力相关。

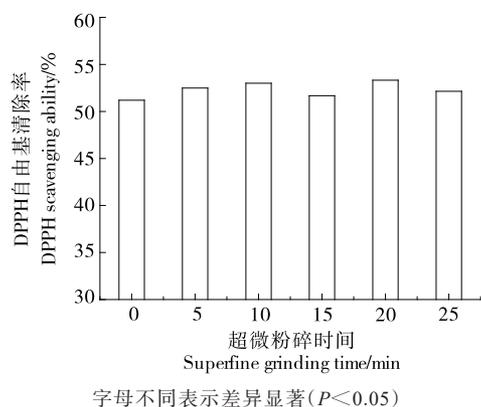


图8 超微粉碎时间对羊肚菌 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 8 Effects of different superfine grinding time on DPPH scavenging ability of *M. esculenta*

### 3 结论

经过超微粉碎后,羊肚菌粉的粒径显著降低,达到微米级别;粉体比表面积、颗粒均匀性和粉体亮度随着粒径的减小而增加;持水力和持油力随着超微粉碎时间增加呈先增加后降低或趋于平稳的趋势;滑角和休止角增大使粉体流动性变差,堆积密度和振实密度降低使粉体更为蓬松;超微粉碎有利于羊肚菌中可溶性膳食纤维和多糖营养成分的溶出,但对蛋白质和 DPPH 自由基清除率的影响较小。综上所述,通过超微粉碎可以显著改变羊肚菌粉体的理化性质,可根据实际加工需求和目的选择是否超微以及合适的颗粒粒径,如超微粉碎用于羊肚菌多

糖的提取具有积极作用,而针对羊肚菌其他功能活性成分,如多酚、多肽、黄酮、萜类物质等的变化趋势可在后续研究中深入探讨。

### 参考文献

- [1] LI F, JIN Y, WANG J, et al. Structure identification of two polysaccharides from *Morchella sextelata* with antioxidant activity[J]. Foods, 2022, 11(7): 982.
- [2] HAQ F U, IMRAN M, SALEEM S, et al. Antibacterial activity of different extracts of ascocata of *Morchella conica* and *M. esculenta* (ascocota) against *Salmonella* species[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2022, 24(9): 85-95.
- [3] 董雨茜. 羊肚菌酶提子实体多糖的抗氧化、降血脂和器官保护作用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019: 2.  
DONG Y H. Antioxidant, anti-hyperlipidemia and organic protection effects of enzyme-assisted polysaccharide from *Morehella esculenta*[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019: 2.
- [4] WANG Z, WANG H L, KANG Z L, et al. Antioxidant and anti-tumour activity of triterpenoid compounds isolated from *Morchella mycelium*[J]. Archives of Microbiology, 2020, 202: 1 677-1 685.
- [5] 鲁艳, 黄瑶, 叶姿好, 等. 转录组分析探讨揭示羊肚菌多糖 ME-X 抗 S180 肿瘤的分子机制[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(4): 519-528.  
LU Y, HUANG Y, YE Z Y. et al. Transcriptomes analysis revealed the molecular mechanism about the anti-S180 tumor activity of the polysaccharide ME-X from *Morchella esculenta* [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022, 40(4): 519-528.
- [6] WEN Y, PENG D, LI C L, et al. A new polysaccharide isolated from *Morchella importuna* fruiting bodies and its immunoregulatory mechanism[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 137: 8-19.
- [7] ZHANG N N, MA H, ZHANG Z F, et al. Characterization and immunomodulatory effect of an alkali-extracted galactomannan from *Morchella esculenta*[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 278: 118960.
- [8] 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.
- [9] ZHANG J T, DONG Y S, NISAR T, et al. Effect of superfine-grinding on the physicochemical and antioxidant properties of *Lycium ruthenicum murray* powders[J]. Powder Technology, 2020, 372: 68-75.
- [10] LIANG X H, SUN J L, MA H J. Effect of superfine grinding on physicochemical properties of apple pomace[J]. Journal of the Chemical Society of Pakistan, 2016, 38(2): 192-197.

- [11] 郝亮霄. 茶树菇超微粉加工特性研究及方便汤料开发[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021: 3.  
HAO J X. Research on processing characteristics and development of convenient soup for agrocybe cylindracea ultrafine powder[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021: 3.
- [12] 刘丽娜, 路风银, 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 L N, LU F Y, LI S F, et al. Effects of two ultrafine grinding methods on powder property of mushroom stem[J]. Storage and Process, 2020, 20(6): 58-62.
- [13] 寇福兵, 夏晓霞, 薛艾莲, 等. 超微粉碎对板栗粉理化特性及结构特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 155-162.  
KOU F B, XIA X X, XUE A L, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and structural characteristics of Chinese chestnut powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(13): 155-162.
- [14] 蒋丽娜, 张秀清, 裴海生, 等. 超微粉碎对花椒籽粉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 67-74.  
JIANG L N, ZHANG X Q, PEI H S, et al. The effect of superfine grinding technology on the quality characteristics of *Zanthoxylum bungeanum* seed powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 67-74.
- [15] 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.  
WANG W T, NIU B, LIU R L, et al. Effect 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.
- [16] 郭常升. 人参超微粉制备及其粉体特性与应用研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016: 11.  
GUO C S. Study on the preparation of ultrafine powder of panax ginseng and its characteristics and application[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016: 11.
- [17] 黄姗, 白天. 冷冻超微粉碎对油莎豆粉品质特性的影响研究[J]. 中国食物与营养, 2023, 29(12): 26-31.  
HUANG S, BAI T. Effect of freezing-superfine grinding on the quality properties of *Cyperus esculentus* powder[J]. Food and Nutrition in China, 2023, 29(12): 26-31.
- [18] 区子弁, 王琴. 超微粉碎技术及其设备在粮油加工中的应用[J]. 广东农业科学, 2010, 37(7): 192-194.  
OU Z B, WANG Q. Applications on grain and oil processing in micronized technology and its machinery[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(7): 192-194.
- [19] 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.  
LIU D J, LIU H F, LIANG G Q, et al. Preparation of *Citri medica* 'Fingered' ultra-fine powder and comparison of its physical-chemical properties[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 160-167.
- [20] 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.  
ZHU S, SONG L S, ZHANG B Q, et al. Analysis of nutritional quality and physical properties of barley ultrafine powder[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 289-295.
- [21] JIANG G H, RAMACHANDRIAH K, WU Z G, et al. Impact of ball-milling time on the physical properties, bioactive compounds, and structural characteristics of onion peel powder[J]. Food Bioscience, 2020, 36: 100630.
- [22] 宋光明. 超细羊肚菌粉多糖的提取、体外消化降解及泡腾片制作[D]. 重庆: 西南大学, 2023: 21.  
SONG G M. Extraction of polysaccharides of ultrafine *Morchella* powder, in vitro digestion and fermentation and production of effervescent tablets[D]. Chongqing: Southwest University, 2023: 21.
- [23] CHEN Y, ZHANG B C, SUN Y H, et al. Physicochemical properties and adsorption of cholesterol by okra (*Abelmoschus esculentus*) powder[J]. Food & Function, 2015, 6(12): 3 728-3 736.
- [24] 张建梅, 罗艳艳, 罗海青, 等. 超微粉碎对黑蒜粉末物理性质及抗氧化能力的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(10): 51-57.  
ZHANG J M, LUO Y Y, LUO H Q, et al. Effects of ultrafine grinding on the physical properties and antioxidant activities of black garlic powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(10): 51-57.
- [25] XIAO Y, ZHANG J, ZHANG L F. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and endogenous enzyme induced flavonoid transformations of tartary buckwheat bran [J]. Food Science and Technology, 2022, 162: 113420.
- [26] 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.  
DENG K B, HUANG Y P, DAI Y P, et al. Effect of ultrafine grinding on physicochemical and paste rheological properties of pumpkin powder[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(11): 42-49.
- [27] 任春春. 金佛山方竹笋干及其超微粉品质研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022: 57.  
REN C C. Study on the quality of dried bamboo shoots of *Chimonobambusa utilis* and its ultrafine powder[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021: 57.
- [28] 张帅, 林宝妹, 费鹏, 等. 不同粒度马齿苋粉的物化性质研究[J]. 饲料研究, 2021, 44(9): 118-121.  
ZHANG S, LIN B M, FEI P, et al. Physicochemical properties of purslane (*Portulaca oleracea* L.) powders with different particle sizes[J]. Feed Research, 2021, 44(9): 118-121.
- [29] 程晶晶, 王军, 周睿. 振动式超微粉碎对甜荞全粉物化特性的影响[J]. 食品科技, 2016, 41(6): 196-200.  
CHENG J J, WANG J, ZHOU R. Influence of vibration type superfine grinding on physicochemical properties of whole common buckwheat powder[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(6): 196-200.

- [30] 赵萌萌, 党斌, 张文刚, 等. 超微粉碎对青稞麸皮粉微观结构及功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 278-286.  
ZHAO M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Effects of ultrafine crushing on microstructure and functional properties of highland barley bran powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 278-286.
- [31] 张增明. 绣球菌干燥、超微粉制备及其应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014: 31.  
ZHANG Z M. The drying characteristics of *Sparassis crispa*, preparation and applications of its ultrafine powder[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014: 31.
- [32] 梁晓君, 廖才学, 黄振勇, 等. 不同干燥和粉碎方式对玉米耳粉粉体特性和营养成分的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 96-100, 109.  
LIANG X J, LIAO C X, HUANG Z Y, et al. Effects of different drying and grinding methods on the powder characteristics and nutritional components of *Auricularia nigricans* powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 96-100, 109.
- [33] 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 L N, WANG A J, LI S F, et al. Study on hot air drying characteristics of mushroom stem and its properties of micro-powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(5): 126-131.
- [34] 邵家威, 郝征红, 岳凤丽, 等. 振动式超微粉碎处理时间对白毛木耳多糖提取率及体外抗氧化性质的影响[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(3): 34-38.  
SHAO J W, HAO Z H, YUE F L, et al. Effect of vibration ultrafine grinding time on extraction rate and antioxidant properties of *Auricularia polytricha* polysaccharide in vitro[J]. Food and Nutrition in China, 2019, 25(3): 34-38.
- [35] 卢琪, 薛淑静, 杨德, 等. 不同加工方式对羊肚菌水提液鲜味及抗氧化性能的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 27-33.  
LU Q, XUE S J, YANG D, et al. Effects of different processing methods on umami taste and antioxidant capability of water extracts of *Morchella esculenta*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 27-33.

(上接第 178 页)

- [20] GUO X, HE X, DAI 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.
- [21] DHITAL S, SHRESTHA A K, GIDLEY M J. Effect of cryo-milling on starches: functionality and digestibility[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(2/3): 152-163.
- [22] LIU C, LIANG R, DAI T, et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57: 55-61.
- [23] LU Z, YE F, ZHOU G, et al. Micronized apple pomace as a novel emulsifier for food O/W pickering emulsion[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127325.
- [24] MA Q, YU Y, ZHOU Z, et al. Effects of different treatments on composition, physicochemical and biological properties of soluble dietary fiber in buckwheat bran[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102517.
- [25] 徐丽, 刘艳兰, 蔡吉祥, 等. 大豆分离蛋白提升鲜湿米粉凝胶品质的研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(9): 54-60.  
XU L, LIU Y L, CAI J X, et al. Soy protein isolate improving gel quality of fresh rice noodles[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(9): 54-60.
- [26] YAN X, WU J, ZHAO C, et al. Chinese rice noodles form the viscoelastic texture by dual high-temperature retrogradation: an insight into the mechanism[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 189: 115496.
- [27] 陈款, 周游, 庄坤, 等. 纤维素酶处理改善糙米米线食用品质的研究[J]. 食品科技, 2023, 48(4): 168-175.  
CHEN K, ZHOU Y, ZHUANG K, et al. Improving the edible quality of brown rice noodles by cellulase treatment[J]. Food Technology, 2023, 48(4): 168-175.
- [28] HEO S, LEE S M, SHIM J H, et al. Effect of dry- and wet-milled rice flours on the quality attributes of gluten-free dough and noodles[J]. J Food Eng, 2013, 116(1): 213-217.

(上接第 191 页)

- [26] 郭锦宁, 刘幼强, 何松贵, 等. 米根霉麸曲提高豉香型白酒中乳酸乙酯的含量[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 84-90.  
GUO J N, LIU Y Q, HE S G, et al. Application of *Rhizopus oryzae* Fuqu to increase ethyl lactate content in Chi-flavor Baijiu [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 84-90.
- [27] 郑自强, 卫春会, 张立伟, 等. 中高温大曲中霉菌的分离及其麸曲制备[J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 165-172.  
ZHENG Z Q, WEI C H, ZHANG L W, et al. Isolation of mold from medium high temperature Daqu and preparation of Fuqu[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 165-172.
- [28] 夏珂, 谢军, 黄丹, 等. 异常威克汉逊酵母的麸曲制作工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(22): 118-123.  
XIA Y, XIE J, HUANG D, et al. Optimization of processing technology of Fuqu with *Wickerhamomyces anomalus*[J]. Food Research and Development, 2018, 39(22): 118-123.
- [29] 刘茗铭, 边名鸿, 赵金松, 等. 纯种酒曲强化剂的制备及其工艺优化[J]. 酿酒, 2022, 49(1): 47-52.  
LIU M M, BIAN M H, ZHAO J S, et al. Preparation and process optimization of purebred Jiuqu fortifier[J]. Brewing, 2022, 49(1): 47-52.
- [30] 刘延波, 张丽婷, 赵志军, 等. 赊店老酒大曲中耐高温霉菌的筛选与产酶条件优化[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5): 268-275.  
LIU Y B, ZHANG L T, ZHAO Z J, et al. Screening of molds with high temperature resistance and optimization of enzyme [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(5): 268-275.