不同粉碎程度下杜仲叶理化性质及体外降血糖、抗氧化活性的变化

龚频[1*]，王洁玉[1]，韩业雯[1]，杨文娟[1]，陈福欣[2]，樊珂如[1]，崔梦娇[3]，翟文俊[4]，郑本忠[3]，陈雪峰[1*]
（1.陕西科技大学食品与生物工程学院，陕西西安 710021）
（2.西安科技大学化学与化工学院，陕西西安 710054）（3.陕西天承生物科技股份有限公司，陕西西安 710000）
（4.陕西学前师范学院生命科学与食品工程学院，陕西西安 710061）

摘要：杜仲叶具有与杜仲皮相似的化学成分及生物活性，是其潜在的中药替代品。为探究粉碎对杜仲叶理化性质、活性成分及其体外活性的影响，该研究采用粗粉碎和超微粉碎技术制备了三种不同粒径的原料：粗粉末、100 目粉末和超微粉末，考察了杜仲叶理化性质、多糖含量、体外降糖活性和抗氧化活性。结果表明，杜仲叶超微粉末粒径为 D_{50}=9.63 μm，堆积密度、振实密度、持水力、持油力及溶解度均高于其他两种样品，但流动性较差，多糖质量分数为 22.47%，其多糖对 *α*-葡萄糖苷酶、*α*-淀粉酶的抑制率及对 DPPH、O_2^-、OH 的清除率均显著优于其他样品。综上，相较于粗粉碎和 100 目粉碎，超微粉碎有效改善了杜仲叶粉末的理化特性，增强体外降糖和抗氧化活性，可作为杜仲叶在食品和药品领域大规模生产的有益预处理加工方式。此外，杜仲叶超微粉末也是功能食品和营养保健品的可用原料。

关键词：杜仲叶；超微粉碎；理化性质；抗氧化活性；降糖活性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.9.0932

Changes in the Physicochemical Properties and in Vitro Hypoglycemic and Antioxidant Activities of *Eucommia Ulmoides* Leaves under Different Crushing Degrees

GONG Pin[1*], WANG Jieyu[1], HAN Yewen[1], YANG Wenjuan[1], CHEN Fuxin[2], FAN Keru[1], CUI Mengjiao[3], ZHAI Wenjun[4], ZHENG Benzhong[3], CHEN Xuefeng[1*]
(1.School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi 'an 710021, China)(2.School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi 'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)(3. Natural Will Biology Company, Xi 'an 710000, China)(4.College of Life Science and Food Engineering, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi 'an 710061, China)

Abstract: *Eucommia ulmoides* leaves are a potential alternative to *Eucommia ulmoides* bark in traditional Chinese medicine because of their similar chemical constituents and biological effects. To investigate the impact of grinding on the physicochemical properties, active ingredients, and its in vitro activities of *Eucommia ulmoides* leaves,three raw materials with different particle sizes (ultrafine powder, 100-mesh powder, and coarse powder) were prepared using superfine grinding and coarse grinding techniques. The physicochemical properties, polysaccharide content, in vitro hypoglycemic activity, and antioxidant activity of *Eucommia ulmoides* leaves were examined. The results showed that the superfine powder of *Eucommia ulmoides* leaves had the smallest particle size (D_{50}=9.63 μm), with the highest bulk density, tapped density, water-holding capacity, oil-holding capacity, and solubility; however, its fluidity was poor. The contents of polysaccharides (22.47%) in the superfine powder were the highest, and the inhibition rates of its polysaccharides on *α*-glucosidase and *α*-amylase, as well as the

收稿日期：2025-07-04；修回日期：2025-09-18；接受日期：2025-09-26

基金项目：陕西省总体规划项目（2020GY-236；2022NY-035）；陕西省重点产业链项目-农业领域（2021ZDLNY04-01；2022ZDLNY04-05）；陕西省教育厅项目（22JC021）；未央市科技局项目（202131）；西安市城市创新计划-农业领域项目（21NYYF0022）；延安市科技局重点产业链项目（2022SLZDCY-006）；秦创源“科工队”项目（S2022-ZC-QCYK-0011）；陕西省重大科技创新专项（L2023-ZDKJ-QCY-SXGG-GY-015）

通讯作者：龚频（1983-），女，博士，副教授，研究方向：药理学，E-mail：gongpin@sust.edu.cn；共同通讯作者：陈雪峰（1964-），男，博士，教授，研究方向：农产品精深加工与综合利用，E-mail：chenxf201693@163.com

scavenging rates on DPPH ; O_2^- ; and OH, were significantly superior to those of other samples. In conclusion, superfine grinding effectively improved the physicochemical properties of *Eucommia ulmoides* leaf powder and enhanced its in vitro hypoglycemic and antioxidant activities, which could be used as a beneficial pretreatment method for large-scale production of *Eucommia ulmoides* leaves in the food and pharmaceutical fields. Additionally, the superfine powder of *Eucommia ulmoides* leaves is also a usable raw material for functional foods and nutritional applications.

Key words: *Eucommia ulmoides* leaves; superfine grinding; physicochemical properties; antioxidant activity; hypoglycemic activity

杜仲（*Eucommia ulmoides*）在传统中药中多被用作补品，且被认为是药用和食用的潜在候选植物[1]。除药用价值外，杜仲叶在食品领域也有实际应用，已被开发为杜仲叶茶、杜仲叶甜米酒等功能性保健食品[2]，还可作为功能性配料添加到面条、饼干等食品中，兼具营养与食用价值。在历史应用中，杜仲仅有杜仲皮被作为药用材料使用；但由于杜仲皮资源稀缺，导致杜仲未能被充分研究。杜仲叶（*Eucommia Ulmoides* Leaves，EUL）表现出与杜仲皮相似的生物活性和药理作用，其潜在应用价值受到认可，且由于杜仲皮的稀缺，杜仲叶已在日本得到了广泛利用[3]。从张启菲等[4]的杜仲叶活性成分含量研究结果来看，总环烯醚萜类化合物、木脂素类及总黄酮含量较少，而多糖作为杜仲叶中主要的活性成分，含量显著高于其他类别。大量研究表明，杜仲叶含有的环烯醚萜、酚酸、黄酮类化合物及多糖等生物活性成分，在结构上与杜仲皮中发现的同类成分一致。这些化合物表现出广泛的生物活性，包括抗骨质疏松症、抗氧化、降血糖和降血脂活性[4]。郎茜等[5]探讨了杜仲叶多糖对糖尿病大鼠的降血糖作用，结果表明，杜仲叶多糖可明显降低糖尿病大鼠空腹血糖水平，具有较好的抗氧化作用，对糖尿病大鼠的胰岛细胞具有一定的保护作用。王淑娴等[6]通过酶辅助法提取的杜仲叶水提物具有良好的抗氧化活性和护肝活性。这表明杜仲叶能够促进健康，值得进一步开发利用。此外，杜仲叶的再利用可以有效减轻杜仲皮资源的短缺[7,8]。因此，杜仲叶的充分利用可能为缓解杜仲皮资源的日益缺乏提供了一个有希望的解决方案。

传统的杜仲叶的预处理方法通常包括四个步骤：清洗、干燥、粉碎和筛分。目前，关于粉碎工艺对杜仲叶活性成分溶出及加工特性的研究尚不深入，现有工艺多因粒径控制不当导致多糖、酚类等活性成分溶出率低（常低于 20%），且粉末流动性、分散性不佳，难以适配规模化食品加工需求[9]。因此，确定一种切实可行的处理方法对提高杜仲叶的利用率来说是至关重要的。

超微粉碎是一种新兴的粉碎技术，已广泛应用于药物和食品加工工业中[9,10]。这种方法通过破坏食品材料中的化学键和分子间相互作用来改变或破坏膳食纤维基质，将连接或嵌入基质中的活性成分从植物细胞中释放出来，从而改变了理化性质，提高了生物活性[11]。因此，相比于传统的机械粉碎，超微粉碎不仅可以生产微米级和纳米级粉末，还可以改善其理化性质，增加样品的生物容量[11]。超微粉末提高了黑果枸杞粉末的抗氧化能力，表明这些粉末可以作为具有抗氧化能力的有希望的原料加以开发[12]。同样，王维涛等[13]的研究发现香菇超微粉末的持油量（Oil-holding Capacity，OHC），持水力（Water-holding Capacity，WHC）和溶解度（Water Solubility Index，WSI）增加，表明超微粉末具有更好的分散性，有利于提高生物利用度，用于制药行业。Chen 等[14]在小麦粉中加入超微绿茶粉末来制作面条，发现超微绿茶粉末的添加可能增加了小麦面团的稳定性、弹性模量（G'）、粘度模量（G''）和风味。超微粉碎可以提高七厘散在大鼠体内的吸收速率，升高血竭素的质量浓度[15]。

目前，关于超微粉碎技术在杜仲叶加工中对其理化性质、有效成分及体外活性的影响，相关报道较少，这可能限制超微粉碎技术在杜仲叶开发中的进一步应用。因此，本文研究了超微粉碎对杜仲叶理化性质、有效成分及体外生物活性的影响，旨在为杜仲叶超微粉末在功能性食品及相关产品中的应用提供理论支撑。

1 方法

1.1 材料

干杜仲叶，于 2023 年 9 月购于陕西省汉中市；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl，DPPH），美国 Sigma 公司；三羟基盐酸缓冲液，阿拉丁试剂（上海）有限公司；α-葡萄糖苷酶、α-淀粉酶、阿卡波糖、福林酚，上海源叶生物科技有限公司；其他化学试剂均购自天津天力化学试剂有限公司，均为分析纯试剂。

1.2 仪器与设备

QLM-100KB 微型流化床对撞式气流磨，绍兴赫克力化工有限公司；APA 2000 激光粒度仪，珠海欧美科仪器有限公司；TDL-40B 电子天平，上海精密科学仪器有限公司；Verios 460 场发射扫描电子显微镜，美国 FEI 公司；Ultima IV X 射线衍射仪，日本理学株式会社；Vertex 70 红外光谱仪，德国 Bruker 公司；HWS-26 电热恒温水浴锅，上海一恒科学仪器有限公司；Varioskan fiash 全波长扫描式多功能酶标仪、RT-Elite 磁力搅拌器，赛默飞世尔科技有限公司；KH-5200DE 超声波清洗器，昆山市超声波仪器有限公司。

1.3 样本准备

干燥的杜仲叶粉碎七次，每次运行 5 s、冷却 1 min，以防植物成分受热降解，将粉碎好的粉末在 0.6 MPa 和 0.2 MPa 的压力下研磨。随后，分别用 140、100、60 目的筛网分离粉末，将不同粒径的杜仲叶分别命名为超微粉末（Superfine Grinding Powder，SG）、100 目粉末（The Powders Which Screened Through Sieves with 100-mesh，M100）和粗粉末（Coarse Grinding Powder，CG）。图 1 描述了利用微型流化床对撞式气流磨制备杜仲叶超微粉末的过程。

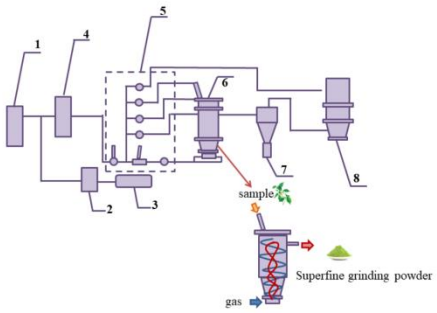

图 1 超微粉碎加工杜仲叶粉末

Fig.1 Superfine grinding processes of *Eucommia ulmoides* leave powders

注：1.高压气瓶；2.气体净化器；3.空压机；4.缓冲罐；5.控制装置；6.射流磨；7.旋风分离器；8.除尘器。

1.4 理化特性

1.4.1 粉末粒度分布

根据 Gao 等[9]提出的方法，采用激光粒度仪测定粉末粒度。测试前将不同粒度的杜仲叶粉末分散在蒸馏水中，随后，使用 10%，50%和 90%累积体积的等效体积直径（D_{10}、D_{50} 和 D_{90}，μm）来表征其粒度分布。根据方程（1）计算颗粒跨度。

$$\text{Span}=\frac{D_{90}-D_{10}}{D_{50}} \quad (1)$$

式中：

Span——颗粒跨度；

D_{10}——10%累积体积的等效体积直径，μm；

D_{50}——50%累积体积的等效体积直径，μm；

D_{90}——90%累积体积的等效体积直径，μm。

1.4.2 扫描电子显微镜

为了确定杜仲叶粉末的微观结构，使用高分辨率场发射的扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope，SEM），设置加速电压 2.0 kV[16]。将粉末样本用碳带保存在样品台上，吹掉多余粉末，镀上一层金属导电膜，在 3 500 倍的放大倍率下拍摄样品图片。

1.4.3 X 射线衍射测定

采用 X 射线衍射仪（X-Ray Diffraction，XRD）得到 XRD 图谱，测试参数包括：衍射角（2θ）范围为 10~80 °，扫描速度为 2 °·min^{-1}，电压为 36 kV、电流为 20 mA 使用镍滤波的 Cu Kα 辐射（λ=1.540 5）[17]。

1.4.4 傅里叶变换红外光谱测量

通过傅里叶变换红外光谱（Fourier Transform Infrared Spectroscopy，FT-IR）分析样品，样品制备采用溴化钾法[18]。所有光谱都是在 4 cm^{-1} 的分辨率和 4 000~400 cm^{-1} 的波长范围内测定的。

1.4.5 堆积密度和振实密度的测定

样品的堆积密度根据 Zhang 等[12]的方法测定。将测量的 5 g 杜仲叶粉末（M_1）放入 50 mL 量筒中来测定体积，根据方程（2）计算样品的堆积密度（ρ_{bulk}）：

$$\rho_{bulk}=\frac{M_1}{V_1}\times 1000 \quad (2)$$

式中：

ρ_{bulk}——样品的堆积密度，kg m^{-3}；

M_1——杜仲叶粉末质量，g；

V_1——粉末自然堆积状态下的体积，mL。

样品的振实密度根据 Liu 等[19]的方法测定。准确称量样品（M_2）并倒入 50 mL 量筒内，将样品从距离台面 5 cm 的高度以 2 s 的间隔向下击打反复振实直到其体积不再下降[20]，记录体积（V_2）。根据方程（3）计算样品的振实密度（ρ_{tapped}）：

$$\rho_{tapped}=\frac{M_2}{V_2}\times 1000 \quad (3)$$

式中：

ρ_{tapped}——样品的振实密度，kg m^{-3}；

M_2——杜仲叶粉末质量，g；

V_2——粉末经振实后的体积，mL。

1.4.6 休止角和滑角的测定

参考 Zhang 等[21]报告的方法测量样品的休止角（θ）并稍作修改。首先，将圆锥体垂直固定在一张纸的顶部，在纸和园锥体的下端开口之间留大约 3 cm 空隙。随后，将样品（约 3 g）缓慢倒入圆锥体中，直到它们垂直地流到纸上形成一个圆锥体。测量圆锥的半径 R（cm）和高度 H（cm），并根据方程（4）计算样品的休止角（θ）：

$$\theta=\arctan\frac{H}{R} \quad (4)$$

式中：

θ——样品的休止角，°；

H——粉末堆积形成圆锥体的高度，cm；

R——圆锥体的底面半径，cm。

滑动角（α）参考 Rong 等[22]描述的方法进行测量。将样品倒入光滑的平板中间，然后抬起平板的另一端，直到大约 90%（φ）的样品开始滑动。分别测量平板的长度 L（cm）和倾斜平台顶端到水平桌面之间的垂直距离 h（cm）。然后，根据方程（5）计算样品的滑动角（α）：

$$\alpha=\arctan\frac{h}{L} \quad (5)$$

式中：

α——样品的滑动角，°；

h——倾斜平台顶端到水平桌面的垂直距离，cm；

L——平板的长度，cm。

1.4.7 溶解度的测定

参考 Huang 等[23]概述的方法测定样品的溶解度，并稍作修改。样品用 20 mL 蒸馏水稀释到离心管中并剧烈摇晃，然后将离心管放置在恒温超声波清洗机中，在 30、60 和 90 ℃下超声 30 min。然后，取出离心管，冷却，以 8 000 r·min^{-1} 离心 15 min。随后，取上清液并在 60 ℃干燥，直到重量稳定。根据方程（6）计算样品的溶解度：

$$S=\frac{m_2}{m_1}\times 100\% \quad (6)$$

式中:

S——样品的溶解度，%;

m_1——干燥杜仲叶粉末的重量，g;

m_2——干燥后上清的重量，g。

1.4.8 持水力和持油力的测定

持水力采用 Qin 等[24]的方法测定。用 50 mL 离心管盛装粉末样品，加入 30 mL 蒸馏水。然后将混合物在 37 ℃下磁力搅拌 30 min，取出后在 3 000 r·min^{-1} 离心 20 min，去除上清液后称量离心管的重量。根据方程（7）计算样品的持水力：

$$W=\frac{m_2-(m+m_1)}{m_1}\times 100\% \quad (7)$$

式中:

W——样品的持水力，%;

m——离心管的质量，g;

m_1——杜仲叶粉末的质量，g;

m_2——去除上清液后的杜仲叶粉末与离心管的总质量，g。

持油力采用 Zhang 等[21]描述的方法进行测定。将含有 10 倍菜籽油的样品以 5 000 r·min^{-1} 离心 10 min，然后在室温下保存 1 小时，去除上清液后称量离心管的重量，根据方程（8）计算样品的持油力：

$$O=\frac{M_2-(M+M_1)}{M_1}\times 100\% \quad (8)$$

式中:

O——样品的持油力，%;

M——离心管的质量，g;

M_1——杜仲叶粉末的质量，g;

M_2——去除上清液后的杜仲叶粉末与离心管的总质量，g。

1.4.9 阳离子交换能力（Cation Exchange Capacity，CEC）的测定

样品的 CEC 参考 Huang 等[23]的方法进行测量，并稍作修改。将大约 1 g 样品置于含有 20 mL 为 5wt.% NaCl 溶液的干燥的 50 mL 离心管中，磁力搅拌 5 min 后，用 pH 计测定溶液的 pH 值。然后加入 0.2 mL 0.01 mol·L^{-1} 的 NaOH，用磁力搅拌器搅拌 5 min，直到 NaOH 的总体积增加到 1.0 mL，测定溶液的 pH 值。用折线图表示 V_{NaOH} 体积和 pH 值随时间的变化趋势。

1.5 多糖含量的测定

采用苯酚-硫酸法测定杜仲叶粉末中的多糖含量[25]。准确称取 5.0 mg 样品，溶于 50 mL 蒸馏水中。取适量该溶液，加入 5wt.%的苯酚溶液 1 mL，随后缓慢加入浓硫酸 5 mL，混匀后于沸水浴中反应 15 min。冷却至室温后，用蒸馏水定容至 50 mL。取 20 μL 冷却后的反应液置于 96 孔板中，使用多功能酶标仪在 490 nm 波长下测定吸光度。

上述测定针对粗粉、100 目粉和超微粉三种不同粉碎程度的杜仲叶样品进行，每个样品重复 3 次实验。

1.6 杜仲叶多糖的提取

杜仲叶粉末多糖采用水提法和醇提法提取，多糖溶液中的蛋白质通过 Sevag 试剂去除[25]。对脱蛋白后的多糖进行透析、冷冻并用 DEAE 纤维素柱纯化。得到的多糖分别命名为 CG、M100 和 SG 多糖。

1.7 杜仲叶多糖的体外降糖活性

杜仲叶多糖的 α-葡萄糖苷酶抑制率参照 Guo 等[26]报道的方法测定。在 405 nm 处测定混合物的吸光值。空白对照为 PBS，阳性对照为阿卡波糖。

杜仲叶多糖的 α-淀粉酶抑制率参照 Guo 等[26]报道的方法测定。在 540 nm 处测定混合物的吸光值，空白对照为 PBS，阳性对照为阿卡波糖。

1.8 杜仲叶多糖的体外抗氧化活性

根据 Rao 等[16]提出的方法测定杜仲叶多糖对 DPPH 的清除作用。简单来说，将 2 mL 0.2 mmol L^{-1} 的 DPPH 溶液加入到不同质量浓度的样品溶液中并充分混合。室温下避光反应 30 min 后，在 517 nm 处测量混合物的吸光度。空白对照为绝对乙醇，阳性对照为 VC。

根据 Rao 等[16]提出的方法测定杜仲叶多糖对超氧阴离子自由基（$O_2^{-}\cdot$）的清除作用。取不同质量浓度梯度的样品溶液各 1 mL，加入 3 mL Tris-HCL（pH=8.2），置于离心管中。摇匀后置于 20 mL 水浴中，加入 1 mL 5 mmol L^{-1} 焦性没食子酸，3 min 后，加入 1 mL 浓硫酸终止反应，在 320 nm 处测定吸光度。空白对照为蒸馏水，阳性对照为 VC。

根据 Rao 等[16]提出的方法测定杜仲叶多糖对羟基自由基（ OH）的清除率。取上述各质量浓度梯度的溶液各 2 mL，加入 2 mL 6 mmol L^{-1} $FeSO_4$ 溶液和 2 mL 6 mmol L^{-1} 水杨酸-乙醇溶液，混匀后加入 1 mL 8 mmol L^{-1} H_2O_2 启动反应，在 37 ℃水浴锅中反应 30 min，在 510 nm 处测定吸光值，空白对照为蒸馏水，阳性对照为 VC。

1.9 统计分析

结果表示为从不同样品获得的三个重复的平均值±SD。单向方差分析，利用 Tukey 的多重比较测试，使用 GraphPad Prism 8.0.0 版进行分析并绘制图片，显著性水平为 5%。

2 结果与讨论

2.1 粒径分析

表 1 CG、M100 和 SG 的粒度分布

Table 1 Particle size distribution of CG, M100 and SG

样品	D_{10}/μm	D_{50}/μm	D_{90}/μm	颗粒跨度
CG	86.69±1.35^{c}	160.04±3.12^{c}	285.40±6.66^{c}	1.23±0.04^{b}
M100	65.78±0.89^{b}	86.53±0.33^{b}	183.92±4.11^{b}	1.36±0.06^{b}
SG	3.75±0.07^{a}	9.63±0.31^{a}	18.32±1.35^{a}	1.51±0.09^{a}

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（P<0.05）；CG：粗粉末；M100：100 目粉末；SG：超微粉末。

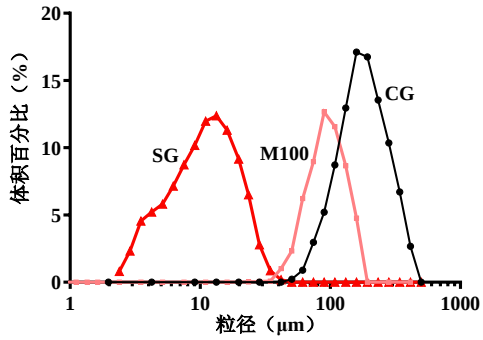

图 2 CG、M100 和 SG 的粒度分布

Fig.2 Particle size distributions of CG, M100 and SG

粗粉、100 目粉、超微粉的平均粒径（D_{50}）如表 1 所示。经过不同的粉碎方式处理，杜仲叶粉末的粒径发生

了变化。CG、M100 和 SG 的 D_{50} 值分别为 160.04、86.54 和 9.63 μm。与 M100 和 CG 相比，SG 粒径显著减小（P<0.05），且与 CG 相比，M100 的 D_{50} 值显著降低（P<0.05）。公认的中药超微粉碎粒度范围为 0.1~75 μm，SG 粒度在此范围内[27]。此外，粉末均匀性评价是药品生产中的一个重要指标[28]，图 2 显示了杜仲叶的三种粉末跨度的结果。一般而言，跨度值越大，颗粒尺寸分布越宽。结果表明，与 CG 和 M100 相比，SG 的粒径分布显著增加（P<0.05），而 CG 和 M100 的粒径分布没有明显变化。因此，本实验通过超微粉碎得到了粒径小而不均匀的 EUL 颗粒。类似地，Zhang 等[12]发现超微粉碎产生的黑果枸杞粉末的颗粒最不均匀，罗白玲等[29]还发现颗粒大小的分布会影响粉末的物理性质。总而言之，分布范围更广的粉末具有较差的流动性。

2.2 CG、M100 和 SG 的理化特性

2.2.1 形态学特征分析

CG、M100 和 SG 放大 3 500 倍的 SEM 图像如图 3 所示。杜仲叶粉末粒径由小到大依次为：SG<M100<CG。形态学特征与表 1 结论一致。此外，CG 的纤维结构清晰可见，而 SG 和 M100 的纤维结构不明显，这可能是与粉碎导致纤维结构破坏有关。虽然在 M100 和 SG 的表面也可以观察到团聚现象，但是小粒径的粉末表现出更好的团聚性。粉末团聚的形成，可能是由于粒径较小的粉末具有较大的表面积，使得他们与大气或其它媒介充分接触，因而粉末易于吸收气体并形成黏附和团聚[9]。总之，粉碎过程中的机械力改变了杜仲叶粉末的微观结构，从而可能影响了杜仲叶 SG 粉末的物理性质，包括堆积密度、休止角（θ）和滑动角（α）等[30]。

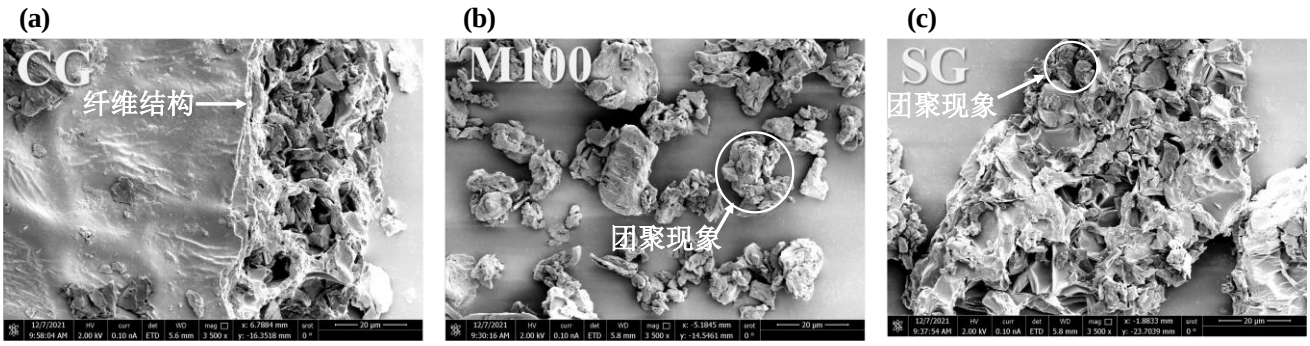

图 3 CG、M100 和 SG 的 SEM 微观结构观察

Fig.3 SEM micrographs of CG, M100 and SG

注：（a）CG;（b）M100;（c）SG。

2.2.2 XRD 分析

CG、M100 和 SG 的 XRD 图谱如图 4 所示，表明 CG、M100 和 SG 形状相似，且在 20.0 °附近有突出的 2θ 峰。然而，滑动角的峰值没有明显差异，说明机械力没有破坏晶体区域[31]。此外，杜仲叶粉末峰值强度随着粒径的减小而逐渐增大。

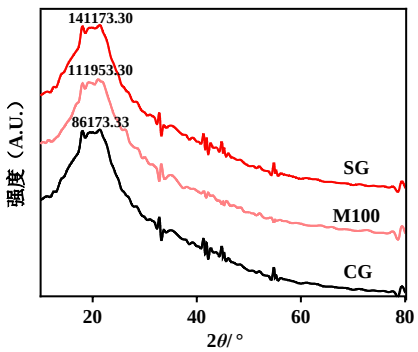

图 4 CG、M100 和 SG 的 X 射线衍射图谱

Fig.4 X-ray diffraction graph of CG, M100 and SG

2.2.3 FT-IR 谱图分析

图 5 显示了在 4 000~400 cm^{-1} 范围内记录的 CG、M100 和 SG 的 FT-IR 光谱，残留峰位于 1 800~400 cm^{-1} 范围

内，含有多条谱带和多种化学信息，可以提供 EUL 化合物的特征光谱信息，910~650 cm^{-1} 范围属于指纹区范围[32]。CG，M100 和 SG 分别在 3 344、3 342 和 3 345 cm^{-1} 处的宽峰属于 O-H 伸缩振动，主要对应于蛋白质多糖和酰胺 A。在 2 997 和 2 886 cm^{-1} 附近的峰值强度差异是由于 CH_2 的不对称和对称的 CH-伸缩振动造成的[33]。此外，在 1 729、1 720 和 1 724 cm^{-1}（分别为 CG，M100 和 SG）的吸收带代表 C=O 脂质的伸缩振动。CG、M100 和 SG 分别为 1 530、1 533 和 1 539 cm^{-1} 的吸收带归属于酰胺 II 带的伸缩振动。图中位于 671 cm^{-1} 处吸收峰，表明苯环的面外变形振动和环的变形振动[34]。

与 M100 和 CG 相比，SG 峰的强度普遍偏高，尤其是酚类物质和多糖类物质所在峰，如 3 345 和 2 997 cm^{-1}。酚类化合物是最活跃的抗氧化剂，杜仲叶多糖的抗氧化性能已得到证实[35]。超微粉碎造成的杜仲叶多糖抗氧化活性增加也归因于此。此外，光谱漂移的结果表明，超微粉碎不能显著破坏纤维素的分子间氢键，但能够破坏有序晶体表面的非晶态区域[36,37]。

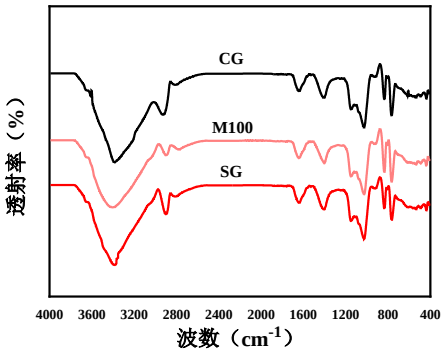

图 5 CG、M100 和 SG 的 FT-IR 光谱图

Fig.5 FT-IR spectroscopy graph of CG, M100 and SG

2.2.4 粉末密度分析

粉末质量控制通常采用堆积密度和振实密度作为主要变量。杜仲叶粉末的振实密度和堆积密度如表 2 所示。结果表明，SG 的堆积密度为 0.43×10^3 kg m^{-3}，高于 M100（0.06×10^3 kg m^{-3}）和 CG（0.10×10^3 kg m^{-3}）。粉末的振实密度也有类似的结果。SG（0.60×10^3 kg m^{-3}）的振实密度显著高于 M100（0.50×10^3 kg m^{-3}）和 CG（0.44×10^3 kg m^{-3}）（P<0.05），比 M100 高 0.10×10^3 kg m^{-3}，比 CG 高 0.16×10^3 kg m^{-3}。此外，M100 的堆积密度和振实密度分别比 CG 高 0.04×10^3 和 0.06×10^3 kg m^{-3}。因此，SG 具有最高的堆积和振实密度。高密度的粉末有助于形成产品[9,38]。堆积密度和振实密度与粉末颗粒的形状、颗粒间的空隙和材料种类有关。一般来说，颗粒尺寸越小，颗粒间空隙越小，密度越高。三种样品中 SG 的振实密度和堆积密度最高，这与 SG 颗粒尺寸和颗粒间空隙较小有关，与 SEM 结果一致（图 3）。类似地，Zhang 等[39]研究发现从超微粉碎中获得的甜菜浆粉的堆积和振实密度具有最大值。

表 2 CG、M100 和 SG 的堆积密度和振实密度，休止角和滑动角

Table 2 Bulk and tap density, angle of repose and slide of CG, M100 and SG.

样品	堆积密度/(×10^3 kg m^{-3})	振实密度/(×10^3 kg m^{-3})	休止角/°	滑动角/°
CG	0.33±0.02^c	0.44±0.22^c	32.93±1.10^c	39.20±0.78^c
M100	0.37±0.00^b	0.50±0.08^b	41.66±1.71^b	44.44±1.61^b
SG	0.43±0.12^a	0.60±0.28^a	49.54±3.93^a	54.47±2.32^a

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（P<0.05）；CG：粗粉末；M100：100 目粉末；SG：超微粉末。

2.2.5 WHC 和 OHC 分析

样品的 WHC 和 OHC 值如图 6 所示。粗粉末、100 目粉末、超微粉末的持水力值分别为 16.27wt.%、24.83wt.%和 27.22wt.%，持油力值分别为 12.08 wt.%、17.83 wt.%和 23.02 wt.%。结果表明，随着粉末粒径的减小，WHC 和 OHC 显著增加（P<0.05）。本实验中，造成这种现象主要有两个原因。首先，超微粉碎使大量长纤维素链破碎成短链。其次，超微粉碎使杜仲叶粉末暴露出更多的亲水性纤维素和半纤维素基团，因而粉末的持水力和持油力增加。实验粉碎过程中可能打破了不溶解的膳食纤维的多糖链，尤其是超微粉碎阶段，导致其通过氢键保留一定量的水，从而增加了 WHC 和 OHC[24,40]。此外，由于超微粉末的比表面积较大，使其容易吸收水分和油分，也可能导致 WHC 和 OHC 的增加。

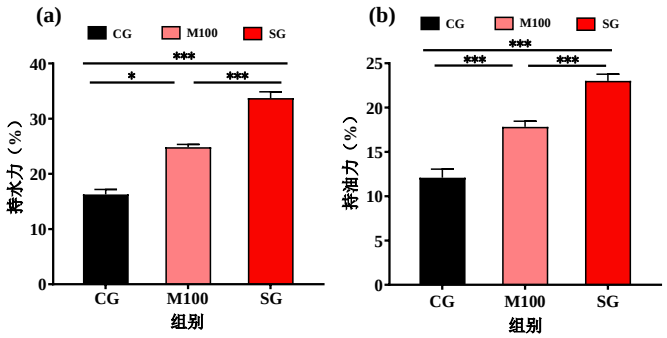

图 6 CG、M100 和 SG 的持水力和持油力

Fig.6 Water holding capacities and oil holding capacities of CG, M100 and SG

注:（a）持水力;（b）持油力; ***P<0.001，*P<0.05。下图同。

2.2.6 粉末流动性分析

测量休止角和滑动角可以反映粉末的流动性。休止角和滑动角越大，粉体的流动性越差。EUL 粉末的休止角和滑动角如表 2 所示。CG（粗粉）的休止角为 32.93°，M100（100 目粉）的休止角为 41.66°，SG（超微粉）的休止角为 49.54°；统计分析显示，SG 的休止角显著高于 M100 与 CG（P<0.05）。滑动角方面，CG 为 39.20°，M100 为 44.44°，SG 为 54.47°，且 SG 的滑动角同样显著高于 M100 与 CG（P<0.05）。此外，与 CG 相比，M100 的休止角和滑动角显著增加（分别增加 8.73°和 5.24°）（P<0.05）。结果表明，超微粉碎导致颗粒流动性变差，原因是 SG 由于其较小的颗粒间空隙和较大的内聚力（图 3）而容易团聚，从而使流动性变差[41]。也可能是粉碎导致小颗粒增加从而填补了较大颗粒之间的空隙，形成团聚[42,43]。此外，杜仲叶含有丰富的杜仲胶，在超微粉碎过程中可能会暴露，也能促进粉末的团聚。

2.2.7 溶解度分析

在 30、60 和 90 ℃时，杜仲叶粉末的溶解度的变化如图 7 所示。CG、M100 和 SG 的溶解度随着温度的升高而增加。SG 在 30、60 和 90 ℃时的溶解度显著高于 M100 和 CG（P<0.05），说明 SG 具有最高的溶解度。同时，系统中热循环的增强促进了粉末的分散[44]，表现为各样品溶解度随温度的增加而增加。具有较大表面积的 SG 具有最高的溶解度，因为它的水溶性分子通过颗粒扩散并且更快地溶解[45]，这表明超微粉末有助于完成片剂、胶囊制品和方便物品的制备。

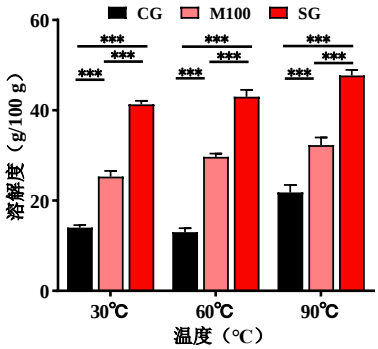

图 7 CG、M100 和 SG 的溶解度

Fig.7 Water solubility index of CG, M100 and SG

2.2.8 CEC 分析

样品的 CEC 值如图 8 所示。随着 NaOH 体积的增大，各溶液的 pH 值逐渐增大。然而，随着粒径的增大，杜仲叶粉末溶液的 pH 值减小。一般而言，CEC 会随着 pH 值的增加而降低，因为在膳食纤维粉末中侧链上含有的羧基、羟基能与阳离子发生键合，从而使消化道内的阳离子瞬时的含量发生变化[23]，如前所述，超微粉碎可能使杜仲叶粉末中膳食纤维侧链基团的羧基和羟基充分暴露于溶液中，并与溶液中的离子有足够的接触，从而降低了杜仲叶的 CEC[23]。

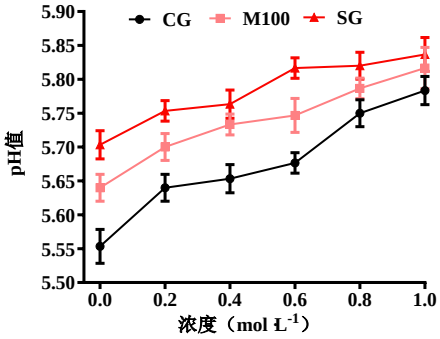

图 8 CG、M100 和 SG 的阳离子交换能力

Fig.8 Cation exchange capacity of CG, M100 and SG

2.3 多糖含量分析

CG、M100 和 SG 多糖含量如图 9 所示，分别为 19.49wt.%、20.34wt.%和 22.47wt.%。与 M100 和 CG 相比，SG 的多糖含量分别提高了 9.48wt.%和 13.26wt.%。与 CG 相比，M100 多糖含量提高了 4.19wt.%。产生这种结果的原因可能是 SG 的形成促进了多糖的溶解。表 1 表明，超微粉的粒径显著减小，表面积增加，WHC、OHC 和 WSI 的变化证明了这一点。这些变化促进了多糖的溶解，从而增加了多糖含量。

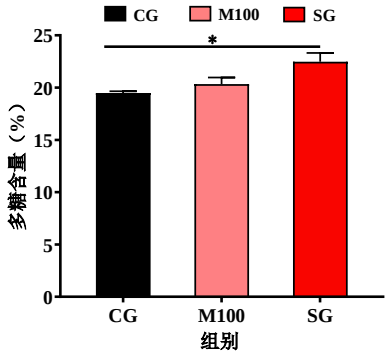

图 9 CG、M100 和 SG 的多糖含量

Fig.9 Polysaccharide content of CG, M100 and SG

2.4 杜仲叶多糖的体外降糖活性分析

如图 10 所示，*α*-葡萄糖苷酶和 *α*-淀粉酶的抑制效果随质量浓度的增加而增加，稳定于 8 mg·mL^{-1}。这表明杜仲叶粉末多糖具有体外降糖作用。与对 *α*-葡萄糖苷酶和 *α*-淀粉酶抑制率分别为 43.74%和 41.50%的 CG 多糖相比，M100 多糖对 *α*-葡萄糖苷酶和 *α*-淀粉酶的抑制率分别为 50.04%和 59.78%，表现出更高的抑制作用。此外，与 M100 多糖相比，SG 多糖表现出更高的活性，对 *α*-葡萄糖苷酶和 *α*-淀粉酶的抑制活性分别为 49.62%和 54.41%。

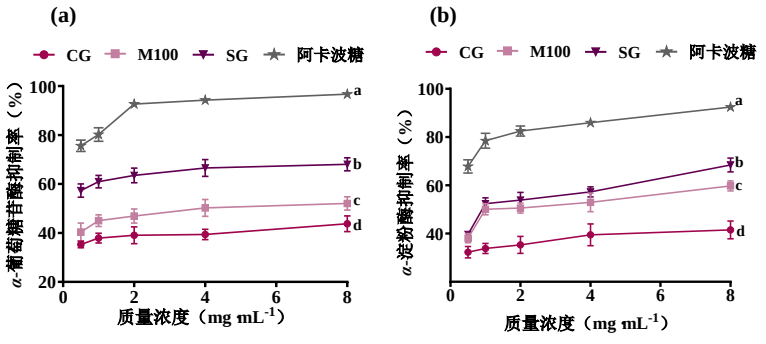

图 10 CG、M100 和 SG 多糖的体外降糖活性

Fig.10 In vitro hypoglycemic activity of CG, M100 and SG polysaccharide

注：（a）对 α-葡萄糖苷酶的抑制率；（b）对 α-淀粉酶的抑制率；不同的字母代表样品在 8 mg mL^{-1} 时有显著性差异（P<0.05）

杜仲叶多糖侧链基团的的羟基和羧基可以与消化酶的氨基酸残基相互作用，导致 α-淀粉酶活性降低[46]。因此，SG 多糖 α-淀粉酶抑制较高可能是由于其多糖含量较高，导致游离的羟基和羧基含量较高。此外，消化酶与酚类物质之间的相互作用也会抑制酶活性，包括氢键、疏水键相互作用和离子相互作用，从而导致抑制剂-酶或抑制剂-淀粉-酶复合物的形成[47]。因此，破碎的增加导致更多的亲水性基团暴露，从而增强了对 α-葡萄糖苷酶的抑制活性。此外，阿卡波糖导致腹胀的副作用也得到证实，因为阿卡波糖对淀粉水解酶有很强的抑制活性，从而导致了未消化的碳水化合物的积累[48]。本实验在 8 mg mL^{-1} 质量浓度下，SG 多糖 α-淀粉酶抑制活性达到阿卡波糖的 74.01%，SG 多糖的 α-葡萄糖苷酶抑制能力达到阿卡波糖的 70.39%，表明超微粉碎有利于提高植物材料的生物活性。

2.5 杜仲叶多糖的体外抗氧化活性分析

杜仲叶粗粉、100 目粉和超微粉多糖对 DPPH 的清除作用如图 11 所示。结果表明，在 8 mg mL^{-1} 条件下，SG 多糖对 DPPH 的清除率最高，为 58.08%，其次为 M100 多糖（52.04%）和 CG 多糖（43.74%）。

在 0~8 mg mL^{-1} 范围内，CG，M100 和 SG 多糖对超氧阴离子自由基 O_2^- 的清除率如图 11 所示。杜仲叶粉末质量浓度越高，样品对 O_2^- 清除率就越高。杜仲叶粉末多糖对 O_2^- 清除率由高到低依次为：SG 多糖>M100 多糖>CG 多糖。在 8 mg mL^{-1} 时，SG 多糖对 O_2^- 清除率（45.09%）显著高于 M100 提取物（39.52%）（P<0.05）和 CG 提取物（35.37%）（P<0.05），与其清除 DPPH 的趋势相同。

图 11 显示了杜仲叶粉末多糖对 OH 的抗氧化活性值。所有样品在 8 mg mL^{-1} 时均显示出最高的抗氧化活性。结果显示，SG 提取物对 OH 清除率（65.41%）高于 M100 提取物（60.78%）和 CG 提取物（50.50%），这可以从 DPPH 自由基清除和 O_2^- CR 作用的结果中得出。这也与本研究测试的微观结构密切相关（图 3），SG 多糖与 M100 多糖具有较好的凝聚力，增加了 EUL 活性基团的有效接触表面积，使它们能够更有效地与自由基结合，从而获得更好的抗氧化活性[23,27]。

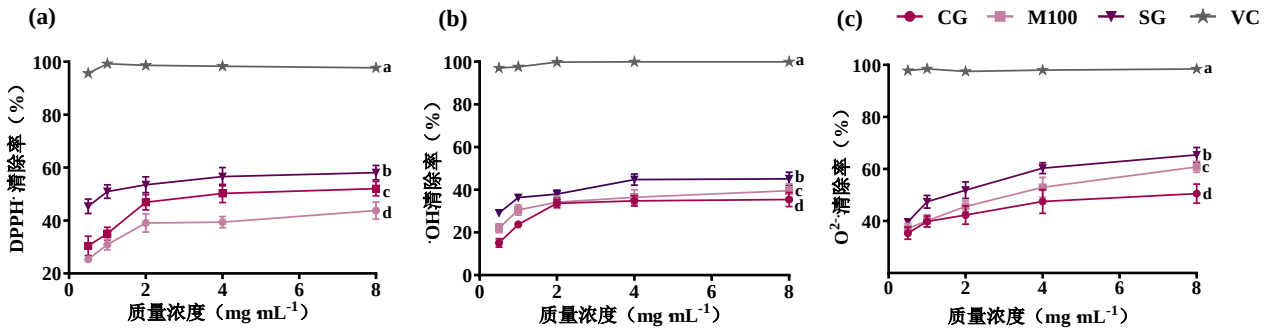

图 11 CG、M100 和 SG 多糖的体外抗氧化活性

Fig.11 In vitro antioxidant activity of CG, M100 and SG polysaccharide

注：a. CG、M100 和 SG 多糖对 DPPH 的清除作用；b. CG、M100 和 SG 多糖对 O_2^- 的清除作用；c. CG、M100 和 SG 多糖对 OH 的清除作用。不同的字母代表样品在 8 mg mL^{-1} 时有显著性差异，P<0.05。

3 结论

该文探究了超微粉碎处理对杜仲叶粉末理化特性及生物活性的影响。经超微粉碎处理后，杜仲叶粉末的理化性质显著改善，体外降糖活性和抗氧化活性得到提高，但杜仲叶的微观结构没有改变。超微粉末具有更小的粒径和更大的表面积，其堆积密度为 0.43×10^3 kg m^{-3}、振实密度为 0.60×10^3 kg m^{-3}、持水力为 27.22%、持油力为 23.02%，及其溶解度均高于 100 目粉末和粗粉末，休止角 49.54°、滑动角 54.47°，表明其流动性较差。同时，杜仲叶超微粉末的多糖质量分数为 22.47%，其多糖对 α-葡萄糖苷酶（49.62%）和 α-淀粉酶（54.41%）的抑制率，以及对 DPPH、O_2^-、OH 的清除率均显著优于 M100 和 CG，表明超微粉末具有较好的降糖活性和抗氧化活性。综上所述，超微粉碎是一种有效的杜仲叶加工方法，能显著影响杜仲叶的理化性质和生物活性，有望推动杜仲叶在制药和食品行业的大规模发展。

参考文献

[1] 朱会宇,李依涵,李红雨,等.杜仲的药理作用、开发应用及剂型应用研究进展[J].农技服务,2025,42(3):52-57.

[2] REN N, GONG W W, ZHAO Y C, et al. Innovation in sweet rice wine with high antioxidant activity: *Eucommia ulmoides* leaf sweet rice wine [J]. Front Nutr, 2023, 9: 1108843.

[3] 张丽华,王子阳,李顺峰,等.不同杜仲叶茶活性成分及抗氧化活性的比较[J].中国酿造,2024,43(11):194-199.

[4] 张启菲,邵亭亭,钱芳芳,等.杜仲活性成分及其药理作用研究进展[J].食品与药品,2025,27(4):414-424.

[5] 郎茜,龚蕾,叶婧,等.杜仲叶多糖对糖尿病大鼠的降血糖作用[J].现代食品科技,2020,36(10):85-92.

[6] 王淑娴,陈衍真,樊英,等.杜仲叶水提物酶辅助提取工艺优化及其护肝活性研究[J].食品安全质量检测学报,2025,16(15):203-212.

[7] ISHIMITSU A, TOJO A, SATONAKA H, et al. *Eucommia ulmoides* (Tochu) and its extract geniposidic acid reduced blood pressure and improved renal hemodynamics [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 141: 111901.

[8] HUANG J S, CHEN Z X, WU Z Y, et al. Geniposide stimulates autophagy by activating the GLP-1R/AMPK/mTOR signaling in osteoarthritis chondrocytes [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2023, 167: 115595.

[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): 2222-2255.

[10] KUMAR A, SAHU R, TRIPATHY S K. Energy-efficient advanced ultrafine grinding of particles using stirred mills-A review [J]. Energies, 2023, 16(14): 5277.

[11] 刘琳琳,李诗雨,吕铭守,等.超微粉碎对芹菜叶粉品质及加工特性影响研究[J].中国调味品,2025,50(5):129-136.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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): 993-1001.

[15] ZHAO G W, LIANG X L, WANG C L, et al. Effect of superfine pulverization on physicochemical and medicinal properties of Qili Powder [J]. Revista Brasileira De Farmacognosia-Brazilian Journal of Pharmacognosy, 2014, 24(5): 584-590.

[16] RAO Z N, KOU F B, WANG Q M, et al. Effect of superfine grinding chestnut powder on the structural and physicochemical properties of wheat dough [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259(1): 129257.

[17] LI M, LI T, HU X Y, et al. Structural, rheological properties and antioxidant activities of polysaccharides from mulberry fruits (*Murus alba* L.) based on different extraction techniques with superfine grinding pretreatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 1774-1783.

[18] 张利娜,张丽珍,杨冬业,等.黄花倒水莲碳点的制备及对水中 Ag^{+}的光学检测[J/OL].化工新型材料,2025,1-6.

[19] LIU Y, LIU L Z, YU X H, et al. The effect of superfine grinding on physicochemical properties of Germinated Brown Rice [J]. The Food Industry, 2017, 38(2): 208-212.

[20] ZHAO X Y, SUN L, ZHANG X W, et al. Effects of ultrafine grinding time on the functional and flavor properties of soybean protein isolate [J]. Colloids and Surfaces B-Biointerfaces, 2020, 196: 111345.

[21] ZHANG Z Q, CHEN S C, WANG Q L, et al. Effects of traditional grinding and superfine grinding technologies on the properties and volatile components of *Protaetia brevitarsis* larvae powder [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2023, 173: 114307.

[22] RONG S, ZHAO S Q, XU K, et al. Procyanidins extracted from the litchi pericarp attenuate atherosclerosis and hyperlipidemia associated with consumption of a high fat diet in apolipoprotein-E knockout mice [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2018, 97: 1639-1644.

[23] HUANG X, LIANG K H, LIU Q, et al. Superfine grinding affects physicochemical, thermal and structural properties of *Moringa Oleifera* leaf powders [J]. Industrial Crops and Products, 2020, 151: 112472.

[24] QIN X T, YANG C R, SI J Y, et al. Fortified yogurt with high-quality dietary fiber prepared from the by-products of grapefruit by superfine grinding combined with fermentation treatment [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2023, 188: 115396.

[25] GUO Y X, CHEN X F, GONG P, et al. In vitro digestion and fecal fermentation of *Siraitia grosvenorii* polysaccharide and its impact on human gut microbiota [J]. Food & Function, 2022, 13(18): 9443-9458.

[26] GUO Y X, CHEN X F, GONG P, et al. Effects of simulated saliva-gastrointestinal digestion on the physicochemical properties and bioactivities of *Siraitia grosvenorii* polysaccharides [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(7): 4495-4506.

[27] 吴国学,杨书婷,刘栋,等.基于HPLC指纹图谱结合化学计量学方法分析评价鸡血藤超微粉的质量[J].军事医学,2024,48(11):832-837.

[28] XU J H, TU Z C, WANG H, et al. Discrimination and characterization of different ultrafine grinding times on the flavor characteristic of fish gelatin using E-nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS [J]. Food Chemistry, 2024, 433: 137299.

[29] 罗白玲,刘敦华,董文江,等.超微粉碎对咖啡果皮理化性质、结构及吸附能力的影响[J].热带作物学报,2020,41(6):1219-1226.

[30] MENG Q R, CHEN F, GAO W J. Effects of superfine grinding on asparagus pomace. Part II: Changes on intestinal function and health [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2021, 140: 110799.

[31] 李家祺,黄晓兵,彭芍丹,等.超微粉碎处理对椰粕营养与理化特性的影响[J].食品与机械,2025,41(2):152-159.

[32] RUAN L, LU L, ZHAO X Y, et al. Effects of natural antioxidants on the oxidative stability of *Eucommia ulmoides* seed oil: Experimental and molecular simulation investigations [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132640.

[33] 余巧玲,戴铭标,何国山,等.海水环境中聚乳酸需氧生物分解能力的研究[J].广东化工,2024,51(23):21-23.

[34] WANG C Y, TANG L, JIANG T, et al. Geographical traceability of *Eucommia ulmoides* leaves using attenuated total reflection Fourier transform infrared and ultraviolet-visible spectroscopy combined with chemometrics and data fusion [J]. Industrial Crops and Products, 2021, 160: 113090.

[35] YE R H, GUO Q Y, HUANG J Q, et al. *Eucommia ulmoides* polysaccharide modified nano-selenium effectively alleviated DSS-induced colitis through enhancing intestinal mucosal barrier function and antioxidant capacity [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2023, 21(1): 222.

[36] LIANG X J, WAN D, TAN L, et al. Dynamic changes of endophytic bacteria in the bark and leaves of medicinal plant *Eucommia ulmoides* in different seasons [J]. Microbiological Research, 2024, 280: 127567.

[37] ZHANG W C, ZHAO Y, XU L, et al. Superfine grinding induced amorphization and increased solubility of α-chitin [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 237: 116145.

[38] GONG P, PEI S Y, LONG H, et al. Potential inhibitory effect of Auricularia auricula polysaccharide on advanced glycation end-products (AGEs) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262(1): 129856.

[39] ZHENG Y J, WANG X Y, SUN Y, et al. Effects of ultrafine grinding and cellulase hydrolysis separately combined with hydroxypropylation, carboxymethylation and phosphate crosslinking on the *in vitro* hypoglycaemic and hypolipidaemic properties of millet bran dietary fibre [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2022, 172: 114210.

[40] XIONG X, CAO X J, ZENG Q Z, et al. Effects of heat pump drying and superfine grinding on the composition of bound phenolics, morphology and microstructure of lychee juice by-products [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2021, 144: 111206.

[41] 杨世雄,高飞虎,张玲,等.不同超微粉碎强度对甘薯全粉特性的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2025,47(4):80-89.

[42] GONG P, HUANG Z H, GUO Y X, et al. The effect of superfine grinding on physicochemical properties of three kinds of mushroom powder [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(8): 3528-3541.

[43] GUO Y X, CHEN X F, GONG P, et al. *Siraitia grosvenorii* as a homologue of food and medicine: A review of biological activity, mechanisms of action, synthetic biology, and applications in future food [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(13): 6850-6870.

[44] WU Z G, AMEER K, JIANG G H. Effects of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activities of Sanchi (*Panax notoginseng*) flower powders [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2021, 58(1): 62-73.

[45] 王凯,刘晶,刘敬科,等.超微粉碎对杂粮理化性质的影响及应用研究进展[J].粮油食品科技,2025,33(2):34-42.

[46] YUAN Q, LIN S, FU Y, et al. Effects of extraction methods on the physicochemical characteristics and biological activities of polysaccharides from okra (*Abelmoschus esculentus*) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 127: 178-186.

[47] WU G, HUI X D, WANG R B, et al. Sodium caseinate-blackcurrant concentrate powder obtained by spray-drying or freeze-drying for delivering structural and health benefits of cookies [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 299: 110466.

[48] 张昭婉,唐若心,刘鉴深,等.超微粉碎协同复合酶处理小麦麸皮对游离酚释放及其抗氧化作用与降血糖活性的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2025,46(2):36-44.