

不同粒径多花黄精粉物理特性及体外模拟胃肠消化特性研究

赵晨晨, 吕家慧, 刘畅, 童若楠, 王梦锦, 刘恒, 邢丽花, 于娇, 耿璐娜, 俞年军

Physical Properties and *in Vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion Characteristics of *Polygonatum cyrtonema* Hua Powder with Different Particle Sizes

ZHAO Chenchen, L Jiahui, LIU Chang, TONG Ruonan, WANG Mengjin, LIU Heng, XING Lihua, YU Jiao, GENG Luna, and YU Nianjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120331>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于体外消化与发酵模型的多花黄精多糖对肠道菌群的影响

Effects of *Polygonatum cyrtonema* Hua. Polysaccharide on Intestinal Microorganisms Based on *in Vitro*-Simulated Digestion and Fermentation Model

食品工业科技. 2024, 45(9): 115–123 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050261>

不同粒径对核桃青皮粉物理特性及功能特性的影响

Effect of Different Particle Sizes on Physical and Functional Properties of Walnut Green Husk Powder

食品工业科技. 2024, 45(13): 91–98 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080181>

超微粉碎后粒径对大麦全粉品质特性的影响

Effects of Different Particle Sizes on the Quality of Barley Flour after Superfine Grinding

食品工业科技. 2022, 43(10): 80–86 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080063>

体外模拟胃肠消化对古茶树叶酵素中活性成分和抗氧化活性的影响

Effects of Simulated Gastrointestinal Digestion on Active Components and Antioxidant Activity of Fermented Tea (*Camellia sinensis*) Jiaosu *in Vitro*

食品工业科技. 2021, 42(18): 64–72 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010099>

不同种植方式及生长年限的铜鼓多花黄精营养品质分析及其评价体系的构建

Analysis of Nutritional Quality of Tonggu *Polygonatum cyrtonema* Hua from Different Planting Ways and Growing Years and Construction of Its Evaluation System

食品工业科技. 2024, 45(17): 316–326 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090239>

模拟胃肠道消化过程中迷迭香提取物总酚及抗氧化活性变化

Changes in Total Polyphenols and Antioxidant Activity in Rosemary Extract during Simulated Gastrointestinal Digestion

食品工业科技. 2019, 40(17): 294–298 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.17.048>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

赵晨晨, 吕家慧, 刘畅, 等. 不同粒径多花黄精粉物理特性及体外模拟胃肠消化特性研究 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 93–102.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120331

ZHAO Chenchen, LÜ Jiahui, LIU Chang, et al. Physical Properties and *in Vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion Characteristics of *Polygonatum cyrtonema* Hua Powder with Different Particle Sizes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 93–102. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120331

· 研究与探讨 ·

不同粒径多花黄精粉物理特性及体外模拟胃肠消化特性研究

赵晨晨¹, 吕家慧¹, 刘 畅¹, 童若楠¹, 王梦锦¹, 刘 恒¹, 邢丽花^{1,2}, 于 娇³, 耿璐娜^{4,5}, 俞年军^{1,2,5,*}

(1.安徽中医药大学药学院, 安徽合肥 230012;

2.省部共建安徽地道中药材品质提升协同创新中心, 安徽合肥 230012;

3.亳州学院, 安徽亳州 236800;

4.安徽敬道生物科技有限公司, 安徽亳州 236814;

5.直接口服中药饮片亳州市重点实验室, 安徽亳州 236000)

摘要:为探究超微粉碎处理对多花黄精粉特性的影响, 本文采用粉碎过筛处理制备不同粒径(50、100、200、325目)多花黄精粉末, 并用扫描电子显微镜及傅里叶红外光谱对其物理特性开展研究, 同时模拟体外胃肠消化过程。结果表明, 经过粉碎及过筛处理后, 多花黄精粉粒径大小具有显著性差异($P<0.05$)。粉碎过程仅破坏了粉体的表面结构, 并未破坏粉体的分子结构。多花黄精粉的休止角、溶解度随粒径的减小不断增加, 而堆密度、润湿时间、持水力不断下降。此外, 粉碎度为200目(75μm, 超微粉Ⅰ)的粉体活性物质多糖含量为15.37%, 显著高于其他样品($P<0.05$)。体外模拟胃肠消化过程中, 粉碎度为200目(75μm, 超微粉Ⅰ)的粉体多糖释放量最高, 且具有一定体外抗氧化能力。综上, 多花黄精粉碎时粉体过200目筛时, 多糖释放量最高。本实验为多花黄精粉末的产业化应用提供了理论依据。

关键词:多花黄精, 超微粉, 粒径, 粉体特性, 模拟胃肠消化, 抗氧化

中图分类号:TS219

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2024)21-0093-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120331

本文网刊:



Physical Properties and *in Vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion Characteristics of *Polygonatum cyrtonema* Hua Powder with Different Particle Sizes

ZHAO Chenchen¹, LÜ Jiahui¹, LIU Chang¹, TONG Ruonan¹, WANG Mengjin¹, LIU Heng¹, XING Lihua^{1,2}, YU Jiao³, GENG Luna^{4,5}, YU Nianjun^{1,2,5,*}

(1.School of Pharmacy, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China;

2.MOE-Anhui Joint Collaborative Innovation Center for Quality Improvement of Anhui Genuine Chinese Medicinal Materials, Hefei 230012, China;

3.Bozhou University, Bozhou 236800, China;

4.Anhui Jingdao Biotechnology Co., Ltd., Bozhou 236814, China;

5.Bozhou Key Laboratory of Direct Oral Chinese Medicine Slices, Bozhou 236000, China)

Abstract: To investigate the functional effects of superfine grinding treatment on *Polygonatum cyrtonema* Hua powder, in this study, the sample was ground and sieved by pharmacopoeia test sieves (50, 100, 200 and 325 mesh) to prepare *P. cyrtonema* Hua powder with different particle sizes. Its physical properties were studied using scanning electron microscopy

收稿日期: 2023-12-27

基金项目: 安徽省重大科技专项项目(202003a07020011); 直接口服中药饮片亳州市重点实验室开放基金项目(ZFYP20211205)。

作者简介: 赵晨晨(1997-), 男, 硕士, 研究方向: 中药资源评价, E-mail: 1731681134@qq.com。

* 通信作者: 俞年军(1965-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 中药资源评价, E-mail: ynj2005288@sina.com。

and Fourier transform infrared spectroscopy, while the *in vitro* gastrointestinal digestion process was simulated. The results showed that the particle size of *P. cyrtonema* Hua powder exhibited a significant difference ($P<0.05$) following grinding and sieving treatment. The grinding process only destroyed the surface structure of the powder, but did not destroy the molecular structure of the powder. The angle of repose and solubility of *P. cyrtonema* Hua powder exhibited a continuous increase with decreasing particle size, while bulk density, wettability and water holding capacity showed a decreasing trend. Additionally, the polysaccharide content of the sample with 200 mesh (15.37%) was significantly higher than that of other samples ($P<0.05$). Moreover, the polysaccharide release content of the powder with 200 mesh (75 μm , ultrafine powder I) during *in vitro* gastrointestinal digestion was higher than that of other powders. Ultrafine powder I also had a certain antioxidant ability. In summary, when the powder of *P. cyrtonema* Hua is sieved by 200 mesh sieve, the content of polysaccharide released is the highest. This experiment provides a theoretical basis for the practical application of *P. cyrtonema* Hua powders.

Key words: *Polygonatum cyrtonema* Hua; superfine powder; particle size; powder properties; simulate gastrointestinal digestion; antioxidants

多花黄精(*Polygonatum cyrtonema* Hua)为百合科黄精属多年生草本植物,在我国主要分布于四川、贵州、安徽等地,其中安徽省为其主要产区之一^[1]。多花黄精(*P. cyrtonema* Hua)同滇黄精(*Polygonatum kingianum* Coll. et Hemsl.)、黄精(*Polygonatum sibiricum* Red.)为中药黄精的基源植物,其干燥根茎即为中药黄精,为药食同源,应用历史悠久,具有补气养阴、健脾、润肺、益肾的功效^[2]。黄精主要成分包含多糖、甾体皂苷类、黄酮类等^[3-6],其中多糖为黄精的主要质量评价指标,2020 版《中国药典》记载黄精多糖含量不得低于 7.0%。黄精药材具有增强免疫^[7]、抗衰老^[8]、抗炎^[9]、抗氧化^[10]、抗糖尿病^[11]、抗抑郁^[12]等作用,具有很高的药用及保健价值。

超微粉碎是采用现代物理或化学方法对材料进行微粉化的一种手段,可以使产品粒度达到微米级。研究表明超微粉碎技术可以提高药材活性成分的溶出率及其生物利用率,厚朴、铁皮石斛等研究印证了中药材经过超微粉碎,具有提高中药成分溶出度、生物利用度及增强疗效等优势^[13-14]。目前,黄精粉的研究焦点主要是探讨通过清蒸、酒蒸、九蒸九晒等多种传统加工方法处理后,不同粒径黄精粉在粉体物理特性以及体外溶出度方面的对比研究^[15-17]。此外,黄精的超细粉末可以通过调节肠道微生物及其代谢产物来改善 MH 大鼠的血压和血脂代谢异常状况,从而有助于缓解相关的代谢紊乱问题^[18],但有关多花黄精不同粒径粉体的外观形貌、溶解度、体外模拟胃肠消化过程及其活性变化的考察方面的研究较少。因此,本实验通过粉碎过筛处理制备不同粒径的多花黄精粉末,对不同粒径粉末的粒度分布、微观结构、粉体学性质、多糖含量进行考察,并通过模拟体外胃肠消化系统评价不同粒径多花黄精粉在胃肠消化过程中多糖的释放规律,采用 DPPH 自由基和羟自由基清除能力考察其抗氧化能力变化,为多花黄精的产品开发及利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

多花黄精(批号 20220508) 安徽省青阳县九华

中药材科技有限公司,经安徽中医药大学俞年军教授鉴定为多花黄精 *Polygonatum cyrtonema* Hua 干燥根茎,符合《中华人民共和国药典(2020 版)》一部各项规定;D-无水葡萄糖 中国食品药品鉴定研究院;其他试剂均为分析纯。

Nicolet IS5 傅里叶红外光谱仪、Multiskan FC 多功能酶标仪 美国赛默飞世尔科技公司;Ultra plus 场发射扫描电镜 德国卡尔蔡司公司;Mastersizer 2000 激光粒度仪 英国马尔文仪器有限公司;UV-5100 紫外可见分光光度计 上海元析仪器有限公司;HC-1000Y 多功能粉碎机 永康市诺邦富贸易有限公司;GT100X 球磨仪 北京格瑞德曼仪器设备有限公司;S400 pH 计 梅特勒-托利多集团。

1.2 实验方法

1.2.1 多花黄精粉体制备及粒径测定 将多花黄精样品于多功能粉碎机中粉碎,过药典三号筛(50 目,355 μm)得多花黄精粗粉。将粗粉在球磨仪中(2000 r/min, 1 min),多次研磨依次分级过筛 100 目(150 μm)、200 目(75 μm)、325 目(45 μm),得到多花黄精细粉、超微粉 I、超微粉 II。经 Mastersizer 2000 激光粒度仪采用湿法测定粒径,分散剂为乙醇,超声辅助分散。记录 D10、D50、D90,并根据公式(1)计算粒度分布跨度值 span。

$$\text{span} = \frac{D90 - D10}{D50} \quad \text{式 (1)}$$

1.2.2 多花黄精不同粉体微观结构的测定

1.2.2.1 微观形态观察 取制备好的 50、100、200、325 目多花黄精粉体适量,分别固定于载物台上,将样品置于 Ultra plus 场发射扫描电子显微镜下进行形貌特征观察。加速电压 2 kV, 放大倍数为 500~5000 倍。

1.2.2.2 傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析 取制备好的 50、100、200、325 目多花黄精粉体,按照粉末:溴化钾(1:100)比例混合,研磨、压片,然后放入 Thermo Nicolet IS5 红外光谱仪中扫描。样品扫描波数为 4000~400 cm^{-1} , 扫描次数为 32 次, 分辨率为 4 cm^{-1} 。

1.2.3 多花黄精不同粉体理化特性

1.2.3.1 休止角与堆密度测定 多花黄精粉休止角及堆密度的测定参考吴其国等^[15]的方法, 并稍作修改。将漏斗固定于铁架台上, 下放一张绘图纸, 漏斗底端距离纸平面约 5 cm。将 10 g 多花黄精粉倒入漏斗中, 使其垂直下落至纸平面, 自然堆积, 待其形成直径最大的圆锥体为止, 记录此时圆锥体的直径(D)和高度(H)。各样品平行操作 3 次, 取平均值。休止角按照公式(2)计算:

$$\tan\theta = \frac{2H}{D} \quad \text{式 (2)}$$

式中: H 为圆锥体的高度, cm; D 为圆锥体的直径, cm。

精密称定量筒质量(M_1), 将一定体积多花黄精粉末通过漏斗匀速倒入量筒, 精密称定此时量筒的质量(M_2), 并记录粉末体积(V)。各样品平行操作 3 次, 取平均值。堆密度按照公式(3)计算:

$$\rho(\text{g/mL}) = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad \text{式 (3)}$$

式中: M_1 为量筒的质量, g; M_2 为量筒加粉末的质量, g; V 为粉末体积, mL。

1.2.3.2 润湿性、持水力的测定 多花黄精粉润湿性及持水力的测定参考张珍林等^[19]的方法。向直径为 10 cm 的培养皿中加入 50 mL 水, 然后加入 0.1 g 多花黄精粉, 记录粉末被水完全润湿的时间 t(s)。各样品平行操作 3 次, 取平均值。参考此结果进行不同粒径多花黄精粉的润湿性比较。

精密称定多花黄精粉末 0.1 g(M_1), 置 15 mL 离心管中, 加入 10 mL 水, 并于 60 °C 恒温水浴 30 min, 再冰水浴 30 min, 4000 r/min 离心 15 min, 弃去上清液, 称定样品湿重(M_2)。各样品平行操作 3 次, 取平均值。持水力按照公式(4)计算:

$$\text{持水力}(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中: M_1 为粉末质量, g; M_2 为粉末湿重, g。

1.2.3.3 溶解性测定 多花黄精粉溶解性的测定参考蔡肖等^[20]方法并稍作修改。精密称定多花黄精粉 0.5 g, 加入 100 mL 超纯水, 恒温(分别 40、70、100 °C)磁力搅拌 30 min, 减压抽滤, 残渣烘干后称量。各样品平行操作 3 次, 取平均值。溶解度按照公式(5)计算:

$$\text{溶解度}(\%) = \left(1 - \frac{M_2}{M_1}\right) \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

式中: M_1 为多花黄精粉末质量, g; M_2 为烘干后残渣质量, g。

1.2.4 多花黄精不同粉体多糖含量测定

1.2.4.1 溶液的制备 按照徐如静等^[21]的实验方法制备多花黄精供试品溶液、葡萄糖对照品溶液及 5% 苯酚溶液。葡萄糖对照品溶液制备: 称取 105 °C

干燥至恒重的 33.00 mg D-无水葡萄糖, 用超纯水溶解, 定容至 100 mL, 即得 0.33 mg/mL 的对照品溶液; 供试品溶液制备: 取圆底烧瓶, 各加入 0.25 g 多花黄精不同粒径粉末, 加 80% 乙醇 150 mL, 水浴回流 1 h, 趁热滤过, 残渣用 80% 热乙醇洗涤 3 次。将残渣及滤纸置圆底烧瓶中, 加水 150 mL, 水浴回流, 滤过, 残渣及烧瓶用超纯水洗涤 4 次, 合并滤液及洗液, 纯水定容至 250 mL。5% 苯酚溶液制备: 精密称取 5.00 g 苯酚, 溶解于 100 mL 超纯水中, 得到 5% 苯酚溶液。

1.2.4.2 标准曲线的建立 参照徐如静等^[21]的实验方法建立葡萄糖的标准曲线: 精密量取对照品溶液 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mL 于试管中, 各加入超纯水至 2.0 mL, 精密加入 5% 苯酚溶液 1 mL 和浓硫酸 7 mL, 沸水浴 30 min 后冰水浴 10 min, 摆匀, 490 nm 处测定其吸光度。

1.2.4.3 多糖含量测定 分别取不同粒径的多花黄精粉末(各 6 份), 按照 1.2.4.1 中供试品溶液制备方法制备样品溶液。精密吸取样品溶液 1.0 mL, 按照 1.2.4.2 项下苯酚-硫酸法进行显色, 在 490 nm 波长下测定吸光度, 并根据所建立的标准曲线计算多花黄精不同粒径粉末多糖含量。

1.2.5 多花黄精不同粉体体外模拟胃、肠消化模型建立

1.2.5.1 体外胃消化模拟 采用洪晴悦^[22]和杨明琛等^[23]方法稍作修改建立体外模拟胃消化模型。称取 3.10 g NaCl、0.17 g CaCl₂、1.12 g KCl、0.60 g NaHCO₃, 超纯水溶解, 定容至 1 L, 并用 1 mol/L HCl 调节 pH 为 2.0。向上述溶液中加入 1.60 g 胃蛋白酶(10000 U/g), 溶解, 静置过夜后, 即得胃消化液。分别取 100 mL 的胃消化液, 加入不同粒径多花黄精粉末 0.20 g, 于 37 °C, 20 r/min 恒温水浴条件下, 避光孵育 2 h。孵育过程中, 分别在 5、10、15、30、45、60、90、120 min 时移取消化液 3 mL, 沸水浴 2 min, 灭酶活, 待测多糖含量。

1.2.5.2 体外肠道消化模拟 采用洪晴悦^[22]和王宗玄等^[24]方法稍作修改建立体外模拟肠消化模型。称取 0.54 g NaCl、0.35 g CaCl₂、0.66 g KCl, 超纯水溶解, 定容至 1 L, 并用 1 mol/L NaOH 调节 pH 为 7.0。向上述溶液中加入 0.41 g 胰蛋白酶(2500 U/mg), 溶解, 即得肠道消化液。取胃消化模拟 45 min 的样品, 向其中加入 50 mL 肠道消化液, 于 37 °C, 20 r/min 恒温水浴条件下, 避光孵育 1.5 h。孵育过程中, 分别在 0、5、10、15、30、45、60、90 min 时移取消化液 3 mL, 沸水浴 2 min, 灭酶活, 待测多糖含量。

1.2.6 多花黄精不同粉体经体外模拟胃肠消化后多糖释放量测定 对照品溶液的制备同 1.2.4.1, 精密称定 33.00 mg D-无水葡萄糖, 100 mL 超纯水溶解, 即得。

标准曲线的建立:同“1.2.4.2 标准曲线的建立”,精密量取对照品溶液0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0mL于试管中,各加入超纯水至2.0mL,加入5%苯酚溶液1mL和浓硫酸7mL,沸水浴30min后冰水浴10min,摇匀,490nm处测定其吸光度。

供试品溶液的制备:取各阶段的消化液样品,离心(4000r/min,15min),取上清夜。每组精密量取0.5mL溶液稀释到5.0mL,即得供试品溶液。

含量测定:精密量取供试品溶液1.0mL,采用苯酚-硫酸法测定各消化液中多糖含量。方法同标准曲线的建立步骤。

1.2.7 多花黄精不同粉体经体外模拟胃肠消化后抗氧化活性比较

1.2.7.1 DPPH自由基清除率的测定 参照关媛等^[25]和陈丽叶等^[26]的方法,并稍作修改。取1.2.5.1和1.2.5.2胃肠消化液样品,离心(4000r/min,15min),取上清液。取2mL上清液,加入0.1mmol/L的DPPH-乙醇溶液2mL,充分混匀,37℃黑暗条件下静置30min。以维生素C作为阳性对照。在517nm处测定样品溶液的吸光度,并根据公式(6)计算。

$$\text{DPPH}\cdot\text{清除率}(\%) = \frac{[A_0 - (A_1 - A_2)]}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

式中: A_0 : DPPH-乙醇溶液的吸光度; A_1 : 样品和DPPH-乙醇溶液的吸光度; A_2 : 样品溶液的吸光度。

1.2.7.2 羟自由基清除率的测定 参照陈丽叶等^[26]的方法,并稍作修改。取1.2.5.1和1.2.5.2胃肠消化液样品,离心(4000r/min,15min),取上清液。在试管中分别加入1mL上清液、1mL FeSO₄溶液(9mmol/L)和1mL H₂O₂溶液(9mmol/L),摇匀,室温放置10min,然后加入1mL水杨酸-乙醇溶液(9mmol/L),摇匀,37℃水浴30min,取出,冷却至室温,3000r/min离心20min。以维生素C作为阳性对照。在510nm处测定样品溶液的吸光度,并根据公式(7)计算。

$$\text{羟自由基清除率}(\%) = \frac{[A_0 - (A_1 - A_2)]}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (7)}$$

式中: A_0 : 空白对照组的吸光度(消化液代替样品); A_1 : 样品组吸光度; A_2 : 样品对照组的吸光度(水代替水杨酸)。

1.3 数据处理

实验数据均为3次平行实验,实验结果以平均

值±标准差表示。采用Graphpad prism及SPSS 17.0软件进行作图及统计分析, $P<0.05$ 表示数据具有统计学显著差异。

2 结果与分析

2.1 多花黄精不同粉体粒径分布

由表1结果所示,多花黄精粉体依次分别通过50、100、200和325目筛获得的粗粉、细粉、超微粉I、超微粉II的粒径有显著性差异($P<0.05$)。与粗粉相比,细粉、超微粉I、超微粉II的D50由333.72μm降低到16.70μm。随着粒径的减小,多花黄精粉的体积平均粒径显著降低($P<0.05$),由333.55μm减小到20.27μm;而比表面积显著升高($P<0.05$)。span为跨度值,其数值越小,表明粒径分布越窄,粒径越均匀。不同粒径粉体的span值具有显著性差异($P<0.05$),以粗粉的分布均匀性最佳,超微粉I的粒径均匀性相对较差。超微粉I的颗粒均匀性相对较差可能与粉体过筛的筛网目数有关,其过筛范围是200~325目,相对其他粉体来说跨度相对较大。这一结果与粉碎对核桃青皮粉的粒径影响一致,过100和200目筛的核桃青皮粉较过40、60、80目粉体的颗粒均匀性相对较差^[27]。实验结果表明粉碎处理能够有效提高粉体的粉碎程度,且不同粉体的粒径具有显著性差异。

2.2 多花黄精不同粉体结构特征

2.2.1 扫描电子显微镜微观形态观察 通过场发射扫描电镜检测了多花黄精粉的形貌和表面特征(图1)。随着粉体粒径不断变小,粉体的颜色由黄色逐渐变为灰白色。A(粗粉)和B(细粉)颗粒尺寸较大,形状不规则,粉末特性较为完整。C(超微粉I)和D(超微粉II)相较于粗粉和细粉,颗粒尺寸明显变小,且粉末之间有轻微聚集。粉碎程度增大,其比表面积随之增大,从而增加了粉末的表面能,在粉末表面产生了大量极性基团。因此,表面凝聚力增加,从而使粉末更容易吸附和团聚^[28]。粉末的粉碎程度能够有效地改变其表面结构^[29]。以上结果表明,粉碎程度增加会在一定程度上破坏多花黄精的组织结构,影响其物理化学性质,可能影响有效成分的溶出。

2.2.2 红外光谱(FT-IR)分析 不同粒径多花黄精粉末在4000~400cm⁻¹范围内的FT-IR光谱特征如图2所示。超微粉碎后,不同粒径多花黄精粉的峰位置和形状基本相似。说明超微粉碎对多花黄精粉

表1 不同多花黄精粉体的粒径大小

Table 1 Particle size of different *P. cyrtonema* Hua powder

样品	D10(μm)	D50(μm)	D90(μm)	体积平均粒径(μm)	比表面积(m ² ·g ⁻¹)	span
粗粉	207.81±1.44 ^a	333.72±2.05 ^a	485.76±3.16 ^a	333.55±2.09 ^a	0.05±0.01 ^d	0.83±0.01 ^c
细粉	15.29±0.21 ^b	104.62±1.16 ^b	208.94±2.85 ^b	109.18±1.16 ^b	0.17±0.01 ^c	1.85±0.01 ^b
超微粉I	6.81±0.02 ^c	25.91±0.15 ^c	72.95±0.67 ^c	33.71±0.22 ^c	0.45±0.01 ^b	2.56±0.03 ^a
超微粉II	5.98±0.43 ^c	16.70±0.01 ^d	37.48±1.62 ^d	20.27±0.32 ^d	0.56±0.03 ^a	1.89±0.12 ^b

注:同列不同字母代表有统计学显著性差异($P<0.05$)。

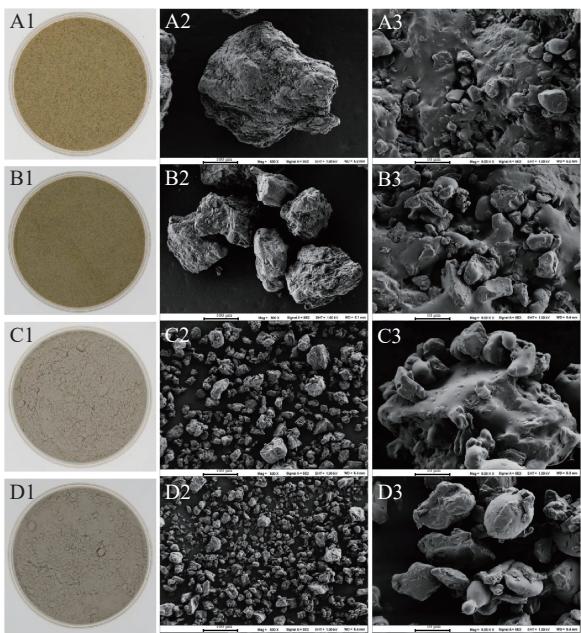


图 1 不同粒度多花黄精粉末的照片和扫描电镜图像

Fig.1 Photos and SEM images of *P. cyrtonema* Hua powder with different particle sizes

注: A1~D1: 多花黄精粉末照片, A2~D2: 多花黄精粉末电镜扫描图像(500 \times), A3~D3: 多花黄精粉末电镜扫描图像(5000 \times)。中的官能团没有明显影响。在波数 3394 cm $^{-1}$ 处出现一个圆滑的峰, 是由纤维素和半纤维素中-OH 的伸缩振动产生的^[27]。2924 cm $^{-1}$ 附近的吸收峰由多糖类亚甲基上的 C-H 的收缩振动产生; 在 1631 cm $^{-1}$ 附近出现的吸收峰可能是 C=O 的特征峰, 表明多花黄精粉中糖醛酸含有较多^[30]; 在 1023 cm $^{-1}$ 处出现的强吸收峰可能是 C-O 的特征峰^[31]。这与超细粉碎对蘑菇^[28]、方竹笋^[30]、三七^[32]等的研究结果一致, 超细粉碎没有改变主要特征峰, 未改变粉体的分子结构。

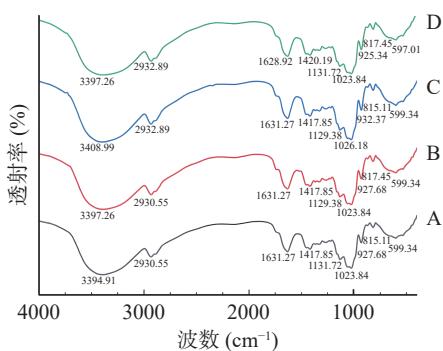


图 2 不同粒径多花黄精粉末的傅里叶红外光谱图

Fig.2 Fourier infrared spectra of *P. cyrtonema* Hua powder with different particle sizes

注: A: 粗粉, B: 细粉, C: 超微粉 I, D: 超微粉 II。

2.3 多花黄精不同粉体物理特性

休止角是评价粉体流动性的一个重要因素, 休止角数值越小, 表明粉体的流动性越好^[33]。由表 2 可知, 多花黄精粉体随着粒径不断变小, 粉体的休止角呈不断变大的趋势, 由粗粉休止角 24.52° 增大至超微粉 II 55.25°, 且不同粒径粉体之间的休止角均具有

显著性差异($P<0.05$)。多花黄精粉体粒径越小, 休止角不断增大的原因可能是随着粉体粒径的减小, 粉体的比表面积增大, 粉体黏着性增大, 使得粉体流动性变差, 从而导致休止角变大^[34]。这一结果与扫描电镜结果相一致, 随着粒径变小, 粉体间具有一定的聚集现象。

表 2 不同粒径多花黄精粉体的物理特性
Table 2 Physical properties of *P. cyrtonema* Hua powder with different particle sizes

样品	粗粉	细粉	超微粉 I	超微粉 II
休止角(°)	24.52 \pm 1.62 ^d	31.24 \pm 0.80 ^c	44.19 \pm 1.39 ^b	55.25 \pm 1.14 ^a
堆密度(g/mL)	0.799 \pm 0.00 ^a	0.755 \pm 0.01 ^b	0.515 \pm 0.01 ^c	0.414 \pm 0.01 ^d
润湿性(s)	286.33 \pm 1.70 ^a	169.33 \pm 0.94 ^b	140.67 \pm 1.70 ^c	84.00 \pm 1.63 ^d
持水力(%)	3.47 \pm 0.53 ^a	3.38 \pm 0.22 ^a	3.16 \pm 0.18 ^a	1.75 \pm 0.09 ^b

注: 同行不同字母代表样品间的显著差异($P<0.05$)。

堆密度是反映粉体学性质的一个重要指标, 与粉体的黏着力和流动性有一定的关系, 对于制剂有重要意义^[35]。多花黄精随着粉体粒径不断变小, 堆密度也呈现逐渐变小的趋势, 由粗粉堆密度 0.799 g/mL 变小至超微粉 II 0.414 g/mL, 且不同粒径粉体之间的堆密度均具有显著性差异($P<0.05$)。这可能是由于多花黄精粉体粒径减小时, 粉体间的黏着性增大, 出现架空、空洞等堆积效应, 导致粉体间空隙增大, 从而使堆密度降低^[36]。相较于粗粉, 超微粉粉体间空隙增大, 具有较好的填充性能, 在直接压片时具有更好的可压性和塑性^[37]。

润湿性是与固体制剂溶解性和崩解性有关的重要的物理性质, 也是评价粉末加工性能的一个重要指标。在平行条件下, 粉体完全润湿所需要的时间越短, 则对应粉体的润湿性越好^[38]。多花黄精随着粉体粒径不断变小, 粉体完全润湿所需要的时间呈现不断变少的趋势, 由粗粉的 286.33 s 变小为超微粉 II 的 84.00 s, 且不同粒径粉体之间的润湿性均具有显著性差异($P<0.05$)。超微粉的润湿性强于粗粉和细粉, 这也说明超微粉拥有更好的速溶性。

多花黄精随着粉体粒径不断变小, 持水力也呈现逐渐变小的趋势, 由粗粉持水力 3.47% 变小至超微粉 II 1.75%, 且粗粉、细粉、超微粉 I 间持水力无显著性差异($P>0.05$)。结果表明, 随着粉体粒径减小, 多花黄精粉体的持水能力逐渐下降, 超微粉 II 持水能力显著性降低($P<0.05$)。可能是由于粉体粒径过小时, 粉体颗粒之间产生黏附聚合作用, 导致粉体与水接触不充分, 从而造成持水力的下降。这与敖婧芳等^[27]对核桃青皮的研究结果一致, 随着粒径的减小, 核桃青皮粉的持水力均有所下降。

为揭示温度和粉体粒径与溶解度的关系, 考察了多花黄精不同粒径粉体在 40、70、100 °C 时的溶解度变化。结果如图 3 所示, 在相同温度下, 多花黄精粉的溶解度随着粉体粒径的减小而不断增加, 可能是由超微粉碎后粉体的比表面积增加以及颗粒和溶

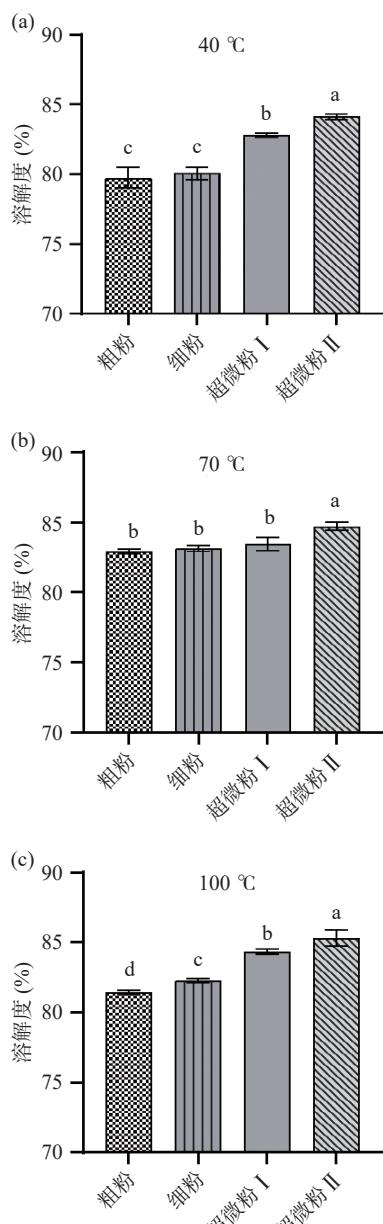


图3 不同粒径多花黄精粉体的溶解度

Fig.3 Solubility of *P. cyrtonema* Hua powder with different particle sizes

注: 不同字母代表有统计学显著性差异($P<0.05$); 图4、图7同。

剂之间的相互作用增加引起的。在40 °C时,多花黄精粉体从粗粉到超微粉II的溶解度由79.76%增加至84.13%,粗粉同细粉间溶解度无显著性差异($P>0.05$),同超微粉I及超微粉II的溶解度有显著性差异($P<0.05$);而在100 °C时,不同粒径粉体间溶解度均有显著性差异($P<0.05$)。当温度由40 °C增加至100 °C时,粗粉的溶解度先升高至82.9%然后保持平稳,以70 °C时溶解度最高;细粉的溶解度先升高至83.12%然后保持平稳,以70 °C时溶解度最高;超微粉I和超微粉II的溶解度均不断升高,超微粉I溶解度提高至84.33%,超微粉II溶解度提高至85.31%。文献报道,在相同温度下,60、100、300目蘑菇粉随着粒径减小,溶解度增加;当温度由30 °C

上升到90 °C时,不同粒径蘑菇粉的溶解度均呈现增加的趋势^[28]。研究结果表明粉体的溶解度同温度和粒径有密切关系。

2.4 多花黄精不同粉体多糖含量

以葡萄糖浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,建立线性回归方程,方程为 $y=0.071x+0.3316(R^2=0.9993)$ 。由图4可知,在45~355 μm粒径范围内,随着多花黄精粉体粒径不断减小,水溶性多糖含量先升高后降低,其中多花黄精超微粉I水溶性多糖含量最高(15.37%),且同粗粉、细粉、超微粉II有显著性差异($P<0.05$)。这可能是由于一定程度的超微粉碎降低了多花黄精粉体的平均粒径,增强细胞的破裂程度,释放出更多的水溶性多糖。而当粉碎时间过长,剧烈的机械作用力可能严重破坏了细胞结构,导致水溶性多糖含量下降。丁强等^[39]对茯苓的研究结果表明随着茯苓粉末粒径的减小,有效成分水溶性总多糖的含量先增加后略有下降。

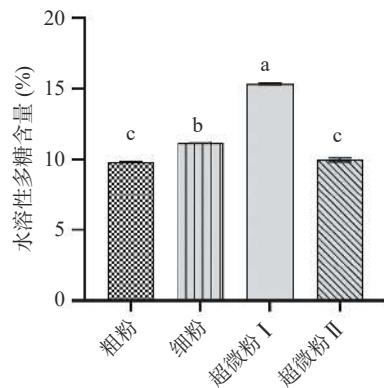


图4 不同粒径多花黄精粉体水溶性多糖含量

Fig.4 Polysaccharide content of *P. cyrtonema* Hua powder with different particle sizes

2.5 多花黄精不同粉体体外模拟胃肠消化液中多糖释放量变化

绘制标准曲线,建立线性回归方程: $y=0.0609x+0.0115, R^2=0.9994$ 。由回归方程的结果可知,此方法具有较好的线性,可用于测定不同粒径多花黄精粉体胃肠溶出液中的多糖的含量。

2.5.1 体外模拟胃消化液中多糖释放量 不同粒径多花黄精粉末在体外模拟胃消化过程中多糖的溶出曲线如图5所示。在5~120 min内,随着体外胃消化模拟时间的延长,多花黄精细粉、超微粉I、超微粉II的多糖溶出量均呈现先增加,后下降再逐渐趋于平稳的趋势,这可能是多花黄精细粉、超微粉I、超微粉II溶出的多糖在胃液中部分消化,随着消化时间增加多糖的溶出速度和消化速度逐渐持平,故多糖得率趋于平稳;而粗粉的多糖溶出量是先下降,后上升再趋于平稳,表明粗粉在消化液中多糖溶出慢,而溶出的多糖同时被胃部消化一部分,随着消化时间增加,溶出多糖增加,因此多糖含量先下降后上升最后趋于平稳。在模拟胃液消化的5~120 min每个时间

节点, 超微粉 I 的多糖溶出量均最高, 其次是超微粉 II、细粉、粗粉。由此表明, 多花黄精粉体的粒径大小对体外模拟胃消化过程中多糖的溶出有影响, 以超微粉 I 的模拟胃消化效果最佳。

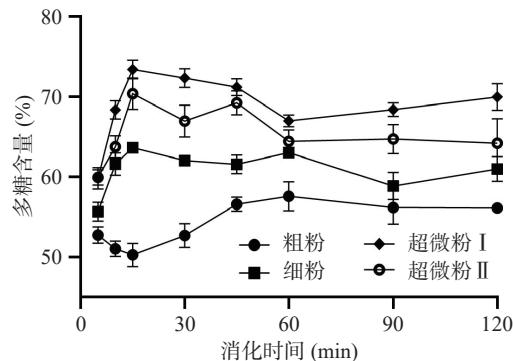


图 5 体外胃消化模拟液中多糖含量

Fig.5 Polysaccharide content in simulated gastric digestion solution *in vitro*

2.5.2 体外模拟肠道消化液中多糖释放量 不同粒径多花黄精粉末在体外模拟肠道消化过程中多糖的溶出曲线如图 6 所示。在 0~90 min 模拟体外肠道消化过程中, 随着模拟时间的延长, 不同粒径多花黄精粉末的多糖溶出量变化趋势一致。其中, 超微粉 I 的多糖溶出量最高, 其次是超微粉 II、细粉、粗粉。消化 90 min 时, 粗粉、细粉、超微粉 I、超微粉 II 的肠消化液中多糖含量分别为 64.51%、66.69%、75.09%、72.09%。此结果与多花黄精粉末在体外模拟胃部消化过程中多糖溶出结果一致, 超微粉 I 的多糖溶出量最高。多花黄精粉体的粒径大小对体外模拟肠道消化多糖溶出有影响, 以超微粉 I 的模拟肠消化效果最佳。本实验结果表明粉体的粒径大小与体外模拟胃肠道消化过程中活性物质的释放有关, 聂梅梅等^[40]对怀山药研究表明在胃肠消化过程中, 随着粒径的变小, 超微粉的多糖释放量大于粗粉, 与本实验结果一致。

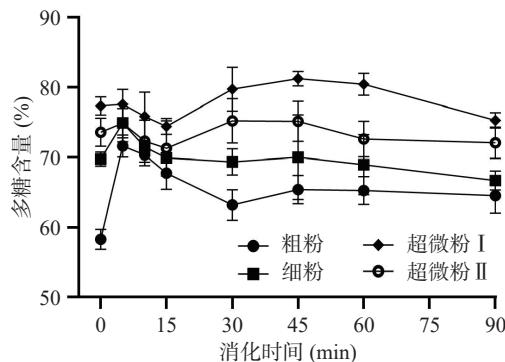


图 6 体外肠道消化模拟液中多糖含量

Fig.6 Polysaccharide content in simulated intestinal digestion solution *in vitro*

2.6 多花黄精不同粉体经胃肠消化后抗氧化活性

不同粒径多花黄精粉经体外模拟胃肠消化后对 DPPH 自由基和羟自由基的清除能力如图 7 所示。

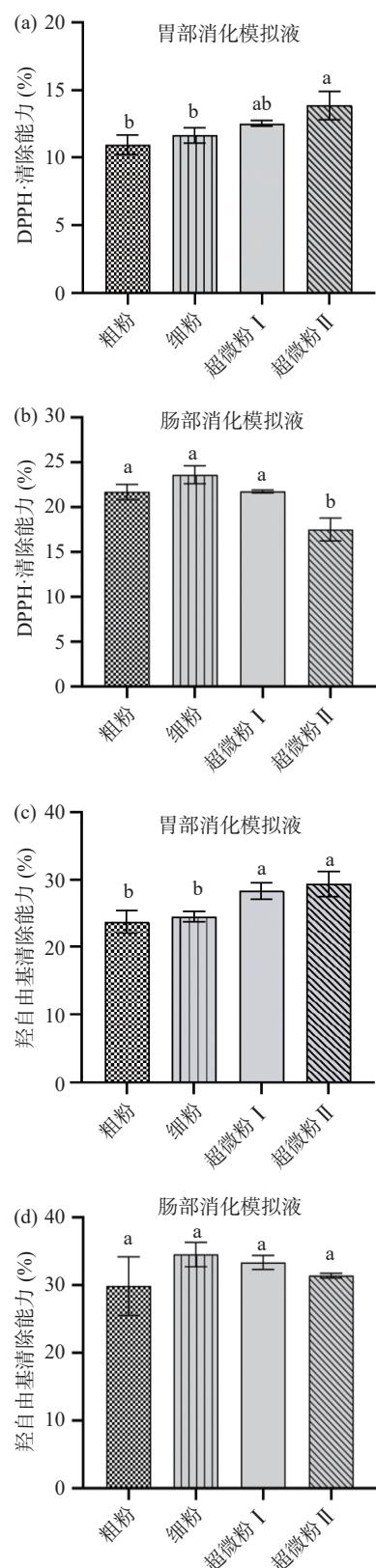


图 7 不同粒径多花黄精粉末体外消化液抗氧化能力

Fig.7 Antioxidant capacity of extracorporeal digestive solution of *P. cyrtonema* Hua powder with different particle sizes

阳性对照组 V_C 对 DPPH 自由基清除率为 95.86%, 对羟自由基清除率为 98.45%。由图 7 可知, 不同粒径多花黄精粉经模拟胃肠道消化后, 对 DPPH 自由基及羟自由基均有一定的清除能力, 以模拟肠道消化后抗氧化活性较强。不同粒径多花黄精粉经模拟胃

部消化后,其对DPPH自由基及羟自由基的清除能力随着粒径减小呈现不断上升的趋势,超微粉Ⅰ及超微粉Ⅱ抗氧化活性最高;超微粉Ⅰ及超微粉Ⅱ对DPPH自由基清除率分别为12.52%和13.86%,对羟自由基清除率分别为28.34%和29.37%。经模拟肠道消化后,不同粒径多花黄精粉对DPPH自由基及羟自由基的清除能力随着粒径减小呈现先上升再下降的趋势。综合不同粒径粉体胃肠消化液对DPPH自由基及羟自由基的清除能力,认为超微粉Ⅰ抗氧化活性相对较高。粉体的粒径与其经模拟体外消化后的抗氧化能力有关,这一研究结果与绿茶粉粒径大小同模拟人体消化后抗氧化活性变化一致,随着粒径的变小,胃肠消化液对DPPH自由基的清除能力均呈现先上升后下降的趋势,分别以74.85 μm和34.62 μm最高^[41]。

超微粉Ⅰ粉末中多糖及其在胃肠消化液中多糖释放量均高于其他粒径粉体,但是其对DPPH自由基及羟自由基的清除能力并未明显高于其他粒径粉体,结果表明粉体中多糖含量同其胃肠消化液的抗氧化活性不呈正相关。粉体胃肠消化液是一个混合的组分,其抗氧化活性是反应体系中所有抗氧化物质共同发挥作用的结果,多花黄精胃肠消化液的抗氧化活性可能与消化液中黄精多糖浓度有一定关系,但同时也可能受到其他的成分影响,具体机制有待进一步探究。

3 结论

本文采用粉碎及过筛处理制备了4种不同粒径的多花黄精粉体,研究了不同粒径粉体的物理特性、活性成分多糖含量、模拟体外胃肠消化特性及其抗氧化能力。实验结果表明,粉碎及过筛处理后,多花黄精粉体粒径显著下降($P<0.05$)。SEM及FT-IR结果表明粉碎处理,仅破坏了粉体的表面结构,并未破坏粉体的分子结构。随着粉体粒径的减小,多花黄精粉的休止角变大,而堆密度、润湿时间、持水力不断下降;粉体粒径的大小及温度的高低同其溶解度有直接关联,可以显著影响粉体溶解度的大小。超微粉Ⅰ的活性物质多糖含量显著高于其他粒径粉末($P<0.05$),其在经模拟体外胃肠消化过程中多糖释放量最高且其具有抗氧化能力,表明一定范围内的微粉碎能够提高多花黄精活性成分的溶出及其抗氧化活性。本实验为微粉碎在多花黄精产品产业化应用提供了理论依据。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 程鹤.安徽多花黄精种质资源调查及质量评价研究[D].合肥:安徽中医药大学,2022. [CHENG H. Investigation and quality evaluation of *Polygonatum cyrtonema* Hua germplasm resources in Anhui Province[D]. Hefei: Anhui University of Chinese Medicine, 2020.]
- [2] 国家药典委员会.中华人民共和国药典[M].一部.北京:中国医药科技出版社,2020:306. [Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China[M]. Volume I. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 306.]
- [3] 施吉祥,徐希明,余江南.黄精多糖提取工艺、结构及药理活性研究进展[J].中国野生植物资源,2019,38(2):36-42. [SHI J X, XU X M, YU J N. Review: Extraction method, structural identification and pharmacological activity of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2019, 38(2): 36-42.]
- [4] 汪娟,梁爽,陈应鹏,等.黄精属植物非皂苷类化学成分研究进展[J].辽宁中医药大学学报,2016,18(1):74-78. [WANG J, LIANG S, CHEN Y P, et al. Research advances in non-saponin chemical constituents of *Polygonatum* genus[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2016, 18(1): 74-78.]
- [5] 宁火华,袁铭铭,邬秋萍,等.多花黄精化学成分分离鉴定[J].中国实验方剂学杂志,2018,24(22):77-82. [NING H H, YUAN M M, WU Q P, et al. Identification of chemical constituents from *Polygonatum cyrtonema*[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2018, 24(22): 77-82.]
- [6] 陶爱恩,张晓灿,杜泽飞,等.黄精属植物中黄酮类化合物及其药理活性研究进展[J].中草药,2018,49(9):2163-2171. [TAO A E, ZHANG X C, DU Z F, et al. Research progress on flavonoids in plants of *Polygonatum* Mill. and their pharmacological activities[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2018, 49(9): 2163-2171.]
- [7] LIU N, DONG Z H, ZHU X S, et al. Characterization and protective effect of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide against cyclophosphamide-induced immunosuppression in Balb/c mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107(Pt A): 796-802.
- [8] LUAN Y, JIANG Y, HUANG R, et al. *Polygonati Rhizoma* polysaccharide prolongs lifespan and healthspan in *Caenorhabditis elegans*[J]. Molecules, 2023, 28(5): 2235.
- [9] HE L L, YAN B X, YAO C Y, et al. Oligosaccharides from *Polygonatum cyrtonema* Hua: Structural characterization and treatment of LPS-induced peritonitis in mice[J]. Carbohydr Polym, 2021, 255: 117392.
- [10] LI L, THAKUR K, LIAO B Y, et al. Antioxidant and antimicrobial potential of polysaccharides sequentially extracted from *Polygonatum cyrtonema* Hua[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 317-323.
- [11] 徐君,王秋丽,俞年军,等.多花黄精生品及九蒸品粗多糖降糖功效对比研究[J].中华中医药杂志,2022,37(1):391-394. [XU J, WANG Q L, YU N J, et al. Comparative study on the hypoglycemic effect of crude polysaccharides from raw materials and nine-steam-nine-bask processing *Polygonati Rhizoma*[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine, 2022, 37(1): 391-394.]
- [12] SHEN F M, XIE P, LI C T, et al. Polysaccharides from *Polygonatum cyrtonema* Hua reduce depression-like behavior in mice by inhibiting oxidative stress-calpain-1-NLRP3 signaling axis[J]. Oxid Med Cell Longev, 2022, 2022: 2566917.
- [13] 何云山,谭周进.超微技术对铁皮石斛粗多糖浸出的影响[J].现代农业科技,2020(4):214-215. [HE Y S, TAN Z J. Effect of ultramicro technique on extraction of crude polysaccharides from *Dendrobium officinale*[J]. Modern Agricultural Science and

- Technology, 2020(4): 214–215.]
- [14] 褚洪标, 张洋萍, 肖琳, 等. 厚朴不同粒径粉体溶出行为比较研究 [J]. 药物分析杂志, 2015, 35(12): 2220–2227. [CHU H B, ZHANG Y P, XIAO L, et al. Comparative study of basic chemical dissolvability of *Magnolia officinalis* powders with different sizes [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2015, 35(12): 2220–2227.]
- [15] 吴其国, 胡叶青, 范珍, 等. 不同粒径九蒸九晒九华黄精粉粉体学性质及体外溶出度比较 [J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2019, 16(2): 76–82. [WU Q G, HU Y Q, FAN Z, et al. The micromeritics properties and in vitro dissolution comparison of Jiu Hua Rhizoma polygnoati powder with different particle size steamed and shined nine times [J]. Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition), 2019, 16(2): 76–82.]
- [16] 吴其国, 赵玉民, 胡叶青, 等. 清蒸和酒蒸九华黄精不同粒径粉的粉体学性质比较 [J]. 山西中医学院学报, 2019, 20(4): 264–266, 271. [WU Q G, ZHAO Y M, HU Y Q, et al. Comparison of micromeritics properties on water steamed and wine steamed Jiuhua *Polygonatum sibiricum* powder of different particle sizes [J]. Journal of Shanxi University of Chinese Medicine, 2019, 20(4): 264–266, 271.]
- [17] 吴其国, 胡叶青, 李文艳. 清蒸和酒蒸九华黄精不同粒径粉的体外溶出度考察 [J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2019, 37(2): 35–38. [WU Q G, HU Y Q, LI W Y. In vitro dissolution of different particle sizes powder of Jiu Hua Rhizoma polygnoati steamed in water and rice wine [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2019, 37(2): 35–38.]
- [18] SU J, WANG Y J, YAN M Q, et al. The beneficial effects of *Polygonatum sibiricum* Red. superfine powder on metabolic hypertensive rats via gut-derived LPS/TLR4 pathway inhibition [J]. Phytotherapy, 2022, 106: 154404.
- [19] 张珍林, 殷智超. 响应面设计优化霍山石斛超细粉体的制备工艺 [J]. 安徽学院学报, 2017, 33(5): 15–20. [ZHANG Z L, YIN Z C. Response surface design optimization of preparation process for ultrafine powder of *Dendrobium huoshanense* [J]. Journal of West Anhui University, 2017, 33(5): 15–20.]
- [20] 蔡肖, 刘军玲, 邢丽花, 等. 霍山石斛超微粉物理特性及石斛多糖中单糖分析 [J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(10): 143–152. [CAI X, LIU J L, XING L H, et al. Physical properties of *Dendrobium huoshanense* superfine powder and analysis of monosaccharides in *Dendrobium* polysaccharides [J]. China Food Additives, 2023, 34(10): 143–152.]
- [21] 徐如静, 梁娟, 俞年军, 等. 九华黄精炮制前后多糖类成分结构变化研究 [J]. 安徽中医药大学学报, 2021, 40(2): 91–96. [XU R J, LIANG J, YU N J, et al. Structural change of polysaccharide constituents from *Polygonatum cyrtonema* in Jiuhua mountain after processing [J]. Journal of Anhui University of Chinese Medicine, 2021, 40(2): 91–96.]
- [22] 洪晴悦. 不同热加工对青稞主要生物活性成分和体外消化与肠菌发酵特性的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2021. [HONG Q Y. Effects of different thermal processing on main bioactive components, in vitro digestion and fermentation characteristics of Qingke [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]
- [23] 杨明琛, 袁梦欣, 陆维, 等. 黄精多糖体外消化特性及对 II 型糖尿病小鼠肠道菌群的调节作用 [J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 14–21. [YANG M C, YUAN M X, LU W, et al. In vitro digestion properties of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide and its regulatory action on the gut microbiota in T2DM mice [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 14–21.]
- [24] 王宗玄, 桑若杰, 李旭燕, 等. 不同谷物粉的粉体特性及血糖生成指数体外评价 [J]. 现代食品技, 2023, 39(8): 165–170. [WANG Z X, SANG R J, LI X Y, et al. Characteristics of different cereal powders and in vitro evaluation of their glycemic index [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 165–170.]
- [25] 关媛, 严淑昕, 钱少林, 等. 桂郁金多糖结构表征及其体外抗氧化活性研究 [J]. 中成药, 2023, 45(12): 4166–4170. [GUAN Y, YAN S X, QIAN S L, et al. Structural characterization and in vitro antioxidant activity of *Curcuma kwangsiensis* polysaccharides [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(12): 4166–4170.]
- [26] 陈丽叶, 常希光, 冯晓光, 等. 山药多糖的体外抗氧化活性 [J]. 食品科学, 2021, 42(19): 122–128. [CHEN L Y, CHANG X G, FENG X G, et al. In vitro antioxidant activity of Chinese yam polysaccharides [J]. Food Science, 2021, 42(19): 122–128.]
- [27] 敖婧芳, 沈荷玉, 王军, 等. 不同粒径对核桃青皮粉物理特性及功能特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 91–98. [AO J F, SHEN H Y, WANG J, et al. Physical and functional characteristics of walnut green husk powder with different particle sizes [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 91–98.]
- [28] 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.
- [29] 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: 2431–7.
- [30] 史早, 张甫生, 杨金来, 等. 超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及微观结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 40–47. [SHI Z, ZHANG F S, YANG J L, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and microstructure of *Chimonobambusa quadrangularis* shoot powders [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24): 40–47.]
- [31] SUN J, WANG N, WANG C Y, et al. Effects of superfine pulverization technology on the morphology, microstructure, and physicochemical properties of *Apium graveolens* L. root [J]. Microse Res Tech, 2022, 85(7): 2455–2466.
- [32] 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, 2021, 58(1): 62–73.
- [33] 冉欢, 夏晓霞, 雷小娟, 等. 双酶协同酶解处理对冬枣粉理化特性及结构特征的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 240–246. [RAN H, XIA X X, LEI X J, et al. Dual enzyme synergistic enzymatic hydrolysis and its effect on physicochemical properties and structural characteristics of *Ziziphus jujuba* Mill. powder [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(11): 240–246.]
- [34] 张珍林, 殷智超. 霍山石斛超细粉体特性研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2017, 29(8): 1328–1332. [ZHANG Z L, YIN Z C. Characteristics investigation of *Dendrobium huoshanense* ultrafine powder [J]. Natural Product Research and Development, 2017, 29(8): 1328–1332.]
- [35] 程芬, 王盛民, 詹源文, 等. 矿物药超高压射流粉碎可行性研究 [J]. 湖北农业科学, 2012, 51(4): 804–806. [CHEN F, WANG S M, ZHAN Y W, et al. Study on the feasibility of smashing mineral medicine by hyper high pressure water jets [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(4): 804–806.]

- [36] 周葵, 张雅媛, 游向荣, 等. 不同粒径青香蕉粉的粉体特性 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 6–9,14. [ZHOU K, ZHANG Y Y, YOU X R, et al. Properties of green banana powder in different particle sizes [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(7): 6–9,14.]
- [37] 孙强. 当归超微粉直接压片工艺及其片剂质量标准研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007. [SUN Q. Study on direct compression technique and quality control of angelica sinensis micropowder tablet [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.]
- [38] 马爽. 刺五加叶超微粉粉体特征及其抗氧化、降糖活性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2022. [MA S. Study on characteristics, antioxidant, and hypoglycemic activity of ultrafine power of *Acanthopanax senticosus* leaves [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2022.]
- [39] 丁强, 吴嬗嬗, 耿璐娜, 等. 荸苓微粉的粉体特征、多糖含量及抗氧化性研究 [J]. 食品工业, 2023, 44(2): 141–145. [DING Q, WU C C, GONG L N, et al. Comparison of powder properties, polysaccharide contents and *in vitro* antioxidant activity of *Poria cocos* powders with different particle sizes [J]. The Food Industry, 2023, 44(2): 141–145.]
- [40] 聂梅梅, 肖亚冬, 李大婧, 等. 超微粉碎对怀山药粉抗氧化和体外消化性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(21): 224–228. [NIE M M, XIAO Y D, LI D J, et al. Effects of superfine grinding on antioxidant and digestive characteristics of Chinese yam powder [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(21): 224–228.]
- [41] SHU Y, LI J, YANG X P, et al. Effect of particle size on the bioaccessibility of polyphenols and polysaccharides in green tea powder and its antioxidant activity after simulated human digestion [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(3): 1127–1133.