

引用:李怀宇,路新如,曹乐乐,等. 灵芝孢子粉破壁技术及其功效影响研究进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2025, 38(5):813-822.

Citation:LI Huaiyu, LU Xinru, CAO Lele, HE Wanchong, KONG Feng, GUO Xingfeng. Research progress on the wall breaking technology of ganoderma spore and its impact on efficacy[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition),2025,38(5):813-822.

文章编号 1672-6634(2025)05-0813-10

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024120021

灵芝孢子粉破壁技术及其功效影响研究进展

李怀宇^{1,3},路新如^{1,2,3},曹乐乐^{1,3},贺万崇^{1,3},孔峰^{1,3},郭兴峰^{1,2,3}

(1. 聊城大学 药学与食品工程学院 聊城 252059; 2. 聊城大学 农学与生物学院,山东 聊城 252059;
3. 山东省蛋白与多肽类药物应用技术重点实验室,山东 聊城 252059)

摘要 灵芝作为中国传统的滋补类中药具有多种生理功效。灵芝孢子粉含有多种活性成分,对人体的神经系统、心血管系统和免疫系统等具有很好的功效。然而,灵芝孢子粉的细胞壁结构复杂、质地坚硬、难以分解,这限制了人体对孢子内有效物质的吸收。本文结合目前国内外研究现状,从物理法、生物法、化学法、机械法等方面综述了灵芝孢子粉的破壁技术,并阐述了不同破壁技术对灵芝孢子粉中活性物质及生物学功能的影响,以期为灵芝孢子粉高效破壁和灵芝产业高质量发展提供指导。

关键词 灵芝;灵芝孢子粉;破壁技术;生物活性物质

中图分类号 R282.71

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research progress on the wall breaking technology of ganoderma spore and its impact on efficacy

LI Huaiyu^{1,3}, LU Xinru^{1,2,3}, CAO Lele^{1,3}, HE Wanchong^{1,3},
KONG Feng^{1,3}, GUO Xingfeng^{1,2,3}

(1. School of Pharmaceutical Science and Food Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059; 2. Agricultural Science and Engineering School, Liaocheng University, Liaocheng 252059; 3. Shandong Key Laboratory of Applied Technology for Protein and Peptide Drugs, Liaocheng 252059)

Abstract *Ganoderma sichuanense*, also named *Ganoderma lucidum* in Chinese pharmacopoeia has a variety of physiological effects. *Ganoderma* spore powder contains various active ingredients that have excellent effects on the human nervous system, cardiovascular system, and immune system. However, the complex cell wall structure and hard texture of *Ganoderma* spores make them difficult to decompose, which limits the absorption of effective substances within the spores. The article reviews the current research progress of the wall-breaking technology of *Ganoderma* spore powder from various aspects including physical, biological, chemical, and mechanical methods. It also discusses the impact of different wall-breaking technolo-

收稿日期:2024-12-31

基金项目:山东省重点研发计划(2022TZXD0033);山东省食用菌产业技术体系建设项目(SDAIT-07-17);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0386,2023TSGC0362)资助

通信作者:郭兴峰,男,汉族,博士,副教授,研究方向:农产品加工与副产物高值化利用,E-mail:guoxf0906@126.com。

gies on the active substances and biological functions of *Ganoderma* spore powder, aiming to provide guidance for the efficient wall-breaking of *Ganoderma* spore powder and the high-quality development of the *Ganoderma* industry.

Keywords *Ganoderma sichuanense*; *Ganoderma* spore powder; wall-breaking technology; bioactive ingredients

0 引言

灵芝(*Ganoderma sichuanense*)是我国传统珍稀药用真菌,属于担子菌纲多孔菌目灵芝科,具有重要的保健和药用价值,历代医药学家均将灵芝视为滋补强壮、扶正固本功效的珍品。根据灵芝菌盖颜色的不同,可分为“青芝”、“赤芝”、“黄芝”、“白芝”、“黑芝”和“紫芝”六种类型^[2],《神农本草经》记载“六芝”为上品药材,长期服用可“轻身不老,延年益寿”,《本草纲目》记载“灵芝性平,味苦,无毒,主胸中结,益心气,补中,增智慧,不忘,久服轻身不老,延年神仙”。赤芝和紫芝被纳入《中华人民共和国药典》2000年版第一部。随着对灵芝的深入研究,其药用和保健价值不断被挖掘,2023年被纳入按照传统既是食品又是中药材的物质目录,为灵芝在医药食品领域的开发和利用奠定了坚实基础。

灵芝孢子粉是灵芝生长成熟期从菌褶中弹射出的卵形生殖细胞,大小通常为 $9\sim 12\ \mu\text{m}$ ^[5],富含灵芝三萜、灵芝多糖和灵芝脂肪酸等多种活性物质,具有保肝解毒、抗氧化、抗菌^[9]、抗糖尿病^[10]、抗肿瘤^[11]等功效。灵芝孢子细胞壁主要由几丁质、纤维素、木质素和葡聚糖等高分子有机物和钙、硅等无机元素构成,具有抗压、耐酸和不易降解等特性。灵芝孢子粉坚硬的细胞壁难以在人体内消化降解严重影响其活性物质的吸收,实验证明,服用未破壁的灵芝孢子粉时,只有12%左右的活性成分被人体吸收,对比破壁后的灵芝孢子粉,其有效成分利用率可达95%以上。因此,通过不同破壁技术对灵芝孢子粉进行破壁处理是促进灵芝孢子粉活性成分释放和功效发挥的重要手段。

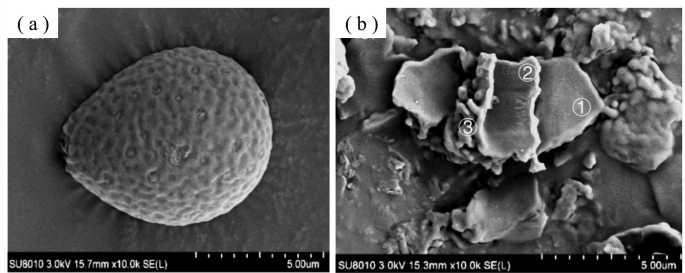
本文结合目前国内外研究现状,从物理法、生物法、化学法、机械法等方面综述了灵芝孢子粉的破壁技术,并阐述了不同破壁技术对灵芝孢子粉中活性物质及生物学功能的影响,以期对灵芝孢子粉高效破壁和灵芝产业高质量发展提供指导。

1 灵芝孢子粉中化学成分及生物功能

灵芝孢子粉是灵芝的生殖细胞,含有丰富的活性物质如灵芝三萜类、灵芝多糖类和蛋白质类等多种物质^[15]。这些生物活性物质使灵芝孢子粉在抗肿瘤、免疫调节、抗氧化^[20]、保护心血管^[21]、保肝护肝等方面发挥重要药理作用。目前研究灵芝孢子粉主要活性功能及其作用机制研究如图2所示。

1.1 灵芝多糖

灵芝多糖是从灵芝子实体、孢子粉、菌丝体或发酵液中提取的关键活性成分之一^[24],其分子量通常在 $10^3\sim 10^6\ \text{Da}$ 之间^[25]。灵芝多糖的化学结构复杂,主要由葡萄糖、岩藻糖、半乳糖、葡萄糖醛酸、阿拉伯糖等多种单糖组成,并通过 α -或 β -糖苷键相互连接。迄今为止,已报道的灵芝多糖种类多达200余种,其中以 β -型葡聚糖最为常见。梁锐^[28]通过甲基化分析、红外光谱和核磁共振波谱分析对灵芝孢子粉胞壁多糖结构进行解析,结果表明,分子量为 $1.90\times 10^5\ \text{g/mol}$ 的多糖是以 $\rightarrow 3,6)-\beta\text{-D-Glcp-(1}\rightarrow, \rightarrow 6)-\beta\text{-D-Glcp-(1}\rightarrow, \rightarrow 4,6)-\beta\text{-D-Glcp-(1}\rightarrow$ 和 $\rightarrow 3)-\beta\text{-D-Glcp-(1}\rightarrow$ 为主链,以 $\rightarrow 4)-\beta\text{-D-Glcp-(1}\rightarrow$ 和 $\beta\text{-D-Glcp-(1}\rightarrow$ 为支链的葡聚糖,其重复的结构单元如图3。



注:(a) 未破壁灵芝孢子粉,(b) 破壁灵芝孢子粉,其中①为外胞壁,②为内胞壁,③为胞间支柱,原生质体存在于内胞壁内。

图1 未破壁和破壁灵芝孢子粉电镜对比图^[14]

Fig. 1 Structure diagram of *Ganoderma sichuanense* spore powder

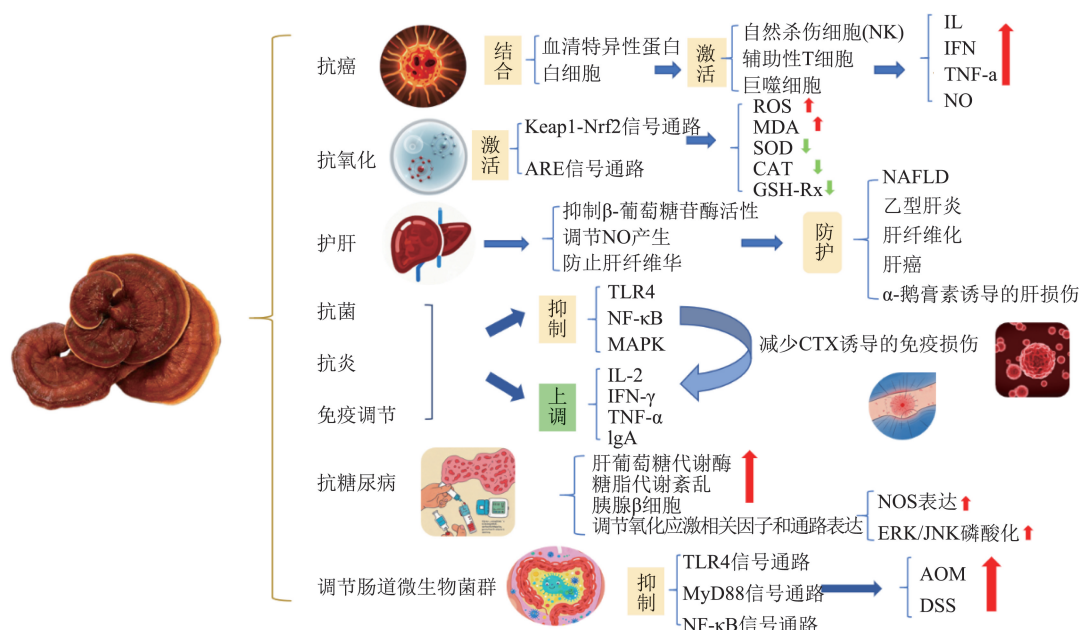


图2 灵芝孢子粉的功能及作用机制

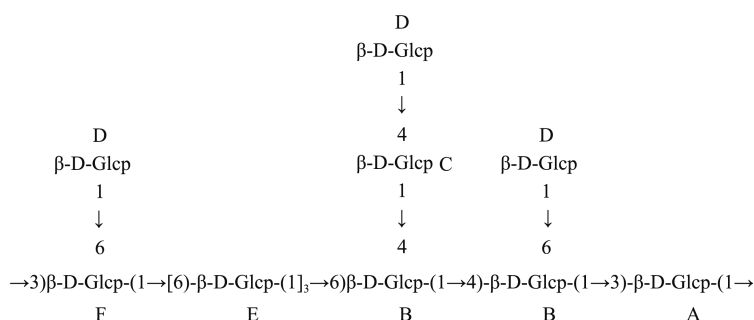
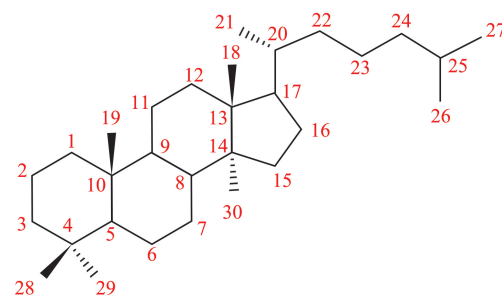
Fig. 2 Function and mechanism of *Ganoderma sichuanense* spore powder图3 灵芝多糖的重复结构单元^[28]Fig. 3 Repetitive structural units of *Ganoderma sichuanense* polysaccharides

图4 羊毛炔烷三萜的化学结构

Fig. 4 Chemical structure of lanostane triterpene

1.2 灵芝三萜

灵芝三萜属于羊毛炔型三萜类化合物,由羊毛炔碳骨架和五环三萜组成。灵芝三萜种类繁多,迄今为止,已从灵芝孢子粉中分离得到的三萜化合物有100余种,不同的三萜化合物有不同的功效,如C₃₀灵芝酸能够抑制代谢酶的活性,C₂₉甘诺洛西杜酮B在12.5 μmol/L浓度下对一氧化氮的抑制率为45.5%^[30],C₂₇灵芝酸乙酯A能够高效地逆转P-gp介导的多药耐药性^[31]。

除灵芝多糖和三萜外,灵芝孢子粉中还含有灵芝甾醇、灵芝蛋白等多种活性成分。表1结合国内外研究结果列出了灵芝孢子粉中具体活性物质的功效和作用机制。

根据文献报道,灵芝孢子粉中的活性物质还具有众多其他功效,如稳定肠道菌群平衡^[53]、减轻癌症患者治疗过程出现的骨骼肌损伤、外周肌肉疲劳和中枢疲劳样行为、减轻单侧输尿管梗阻诱导的肾小管损伤和肾纤维化和降低牙周炎期间炎症因子的转录水平等,这使灵芝孢子粉在功能性食品应用方面具有十分广阔的前景。

2 灵芝孢子的破壁技术

因灵芝孢子的特殊双层骨架结构,严重影响其在人体内的消化吸收效率,目前通常通过在体外对灵芝孢子进行破壁处理,以提高人体对其生物活性物质的吸收利用效率。近些年,关于灵芝孢子的破壁技术的研究报道很多,主要破壁技术包括机械法、生物化学法和综合法等^[56]。表2对灵芝孢子粉破壁不同破壁方法、特

点及主要参数进行了归纳总结。

表 1 灵芝孢子粉活性物质功效及作用机制

Tab. 1 Efficacy and Mechanism of Active Substances in <i>Ganoderma sichuanens</i> spore powder			
成分	功效	作用机制	参考文献
灵芝三萜	抗氧化	灵芝三萜类化合物通过降低 MDA 含量和 TNF- α 、IL-1 β 、IL-6、caspase-3 和 Bax 的表达,以增加 SOD 和 GSH-Px 的活性和 Bcl-2 的表达。从而发挥抗氧化作用。	[32]
	改善阿尔兹海默症	灵芝三萜化合物通过抑制 ROCK 通路、增强 Axl/Pak1 自噬,促进 A β 清除,进而改善阿尔兹海默症的海马组织和细胞的认知障碍,减轻神经元损伤,抑制细胞凋亡。	[33,34]
	抗抑郁	灵芝三萜通过抑制 NLRP3 炎症小体,调节前额叶皮层中的 FXR(法尼醇 X 受体),并激活 AM-PA 受体的磷酸化与表达,以神经免疫调节和抗抑郁作用。	[35]
灵芝三萜	改善肾纤维化	灵芝三萜化合物通过抑制 TGF- β /Smad 信号通路的过度激活,减少细胞外基质(ECM)在肾脏中的沉积;同时抑制 TGF- β /Smad 和 MAPK(ERK、JNK、p38)信号通路,阻碍肾小管上皮-间充质转化(EMT),从而有效改善肾纤维化。	[36]
	保肝作用	灵芝三萜通过降低血清 ALT、AST、LDH 水平及肝脏 MDA 水平,同时提高肝脏 GSH、SOD 含量和 HO-1 蛋白表达,对乙酰氨基酚诱导的急性肝损伤发挥保护作用。	[37]
	抗肿瘤	灵芝三萜通过下调了 mTOR 信号通路中 PI3K、AKT 和 mTOR 的表达磷酸化蛋白,诱导食道磷癌细胞凋亡和自噬细胞死亡,发挥协同抗癌作用。	[38]
	抗病毒	灵芝三萜通过抑制病毒蛋白酶活性、病毒逆转录酶活性、病毒脱壳以及病毒吸附和穿透宿主细胞,来增强宿主的抵抗力,发挥抗病毒作用。	[39]
	抗衰老	灵芝三萜化合物通过抑制活性氧(ROS)产生和 p21、p16 蛋白表达,减轻细胞周期停滞,同时增强衰老细胞的端粒酶活性,并激活 PERK/NRF2 信号通路,以延缓细胞衰老。	[40]
	调节机体免疫	灵芝多糖可激活机体免疫反应,刺激效应细胞释放细胞因子,同时抑制过度免疫反应,维持免疫平衡。它还能通过淋巴细胞和骨髓细胞,增强对肿瘤及病毒、细菌、真菌等病原体的免疫防御。	[41]
	抗肿瘤	灵芝多糖通过抑制 Bcl-2 蛋白和环氧化酶 COX-2 的表达,促进 Bax 和 cleaved-Caspase-3 蛋白的表达,改善氧化应激反应,延缓肿瘤细胞生长,等来发挥抗肿瘤作用。	[42]
	保肝作用	灵芝多糖可以通过增强抗氧化酶的活性和抑制脂质过氧化物的产生来缓解急性肝损伤。	[22]
	抗炎	灵芝多糖通过以浓度依赖性方式调节炎症因子 IL-1 β 、TNF- α 和 IL-10 的表达,来抑制小鼠牙槽骨的吸收,从而减轻小鼠牙周炎的炎症,发挥抗炎作用。	[43]
	降血糖	灵芝多糖及菌群代谢物通过促进 IR-HepG2(HepG2 细胞胰岛素抵抗模型)细胞胰岛素信号级联中的关键蛋白 IRS-1、AKT、GSK-3 β 、GLUT2 的表达以及抑制 PEPCK 蛋白的表达,以缓解缓解肝脏胰岛素抵抗的生物学作用,从而发挥降血糖作用。	[44]
灵芝多糖	神经保护作用	灵芝多糖通过调节小胶质细胞炎症及行为反应和促进细胞凋亡相关蛋白的表达来抑制氧化应激诱导的神经元凋亡。	[45]
	抗肿瘤	己糖激酶 2(HK2)是癌细胞高表达的关键酶。灵芝甾醇凭借其其与 HK2 的强亲和力,有效地抑制了 Warburg 效应。	[46,47]
	免疫调节	灵芝甾醇具有显著的抗补体活性,通过抑制补体系统中的经典途径,调节机体对病原体的识别与清除,从而发挥免疫调节作用	[48]
	抗氧化	降低 H ₂ O ₂ 诱导的受损 Caco-2 细胞中 MDA(丙二醛)的水平,提高抗氧化酶的活性,以缓解细胞的氧化应激反应。	[49]
	抗炎	通过减弱脂多糖诱导的细胞极化,抑制促炎介质和促炎因子产生来抑制巨噬细胞的炎症。	[50]
灵芝甾醇	抗氧化	灵芝蛋白肽通过激活 Nrf2 通路,实现 NQO1 和 HO-1 等抗氧化酶的上调,从而缓解氧化应激。	[51]
	抗炎	灵芝真菌免疫调节蛋白通过抑制 p38 MAPK 磷酸化来调节 RAW264. 7 中炎性细胞因子的表达,以提高其抗炎活性。	[52]

2.1 机械法

机械法是利用某种机械通过研磨、挤压、剪切、撞击等作用对灵芝孢子粉施加外力,从而达到破坏灵芝孢子壁促进灵芝孢子粉功效成分释放的方法。利用机械法对灵芝孢子粉细胞壁进行破壁处理不仅操作简单,而且具有破壁率高等特点。常见的机械破壁法有:超微粉碎法、高压均质法、超声波破壁法等。

表2 灵芝孢子粉的破壁方法及特点

Tab. 2 Wall breaking methods and characteristics of *Ganoderma sichuanense* spore powder

破壁方法	特点	主要参数	参考文献
机械法	优点:操作简单、成本低、效率高,适合大规模生产。	超微粉碎法:①破壁率随着主轴转速和粉碎时间逐渐增加。在转速 2 200 r/min,粉碎时间 20 min 时灵芝孢子粉的破壁率最大为 98%。②未破壁的灵芝孢子多糖得率为 0.83%,破壁后的孢子粉多糖得率为 1.55%,因此,破壁可以提高孢子多糖的得率。	[56-58]
	缺点:因破壁过程可能会产生高温,所以有效成分会氧化变质,并且,存在重金属污染的风险。	高压均质法:在均质压力 150 MPa、均质次数 3 次、料液比 1:100 (g/mL) 条件下,灵芝孢子粉的破壁率 94.35%。	
		超声破壁法:灵芝孢子粉经过超声波破壁处理后比表面积显著增加,松紧密度得到优化,色度更加均匀,粒度明显减小,流动性有所降低。	
生物法	优点:过程相对温和,能够较好的保留灵芝孢子粉的活性物质。	酶通过活性位点与灵芝孢子粉细胞壁特异性结合,能够高效破坏细胞壁结构,促使细胞壁中的糖类成分溶出。酶的特异性催化作用使得整个反应过程易于控制,且提取物稳定性良好。在优化条件:溶壁酶添加量 2%,酶解时间 5 h,料液比 1:10(g/mL),温度 40 ℃,pH 6.5 下,灵芝孢子粉细胞壁中水溶性糖的含量可达 17.86%。	[59-62]
	缺点:成本较高,且对酶或微生物种类等其他破壁条件的要求较高。		
化学法	优点:化学试剂能够快速溶解细胞壁,设备要求低。	取 50 g 灵芝孢子粉均匀分散于 500 mL 浓度为 0.1 mol/L 的 H ₂ SO ₄ 溶液中,随后将混合物置于 100 ℃ 的条件下搅拌加热,持续 4 h。反应结束后,通过加入 BaOH 溶液调节 pH 至 7.5,以实现中和。在加热过程中,H ₂ SO ₄ 能够有效	[63]
	缺点:存在化学试剂残留的问题,可能会破坏灵芝孢子粉的活性物质,并且使后续处理更加复杂。	穿透灵芝孢子粉的双层细胞壁结构,并在其表面形成大量微孔。这一过程不仅破坏了细胞壁的完整性,还进一步降解了孢子囊粉内部的大分子多糖。	
综合法	优点:破壁率高,杂质残留少、有效地提高了生产效率。	γ 射线辐照联合球磨法:在 15.231 kGy 的照射,球磨时间 5 min 时,破壁率可达到 97.18%。	[64,65]
	缺点:因涉及多种破壁方法,所以工艺较复杂,技术要求较高。	超声波辅助酶法:在酶浓度 2.5%、乙醇:物质为 20:1(mL/g)及超声功率 480 W 条件下,利用该法提取的灵芝三萜含量可以达到 11.65 mg/g。	

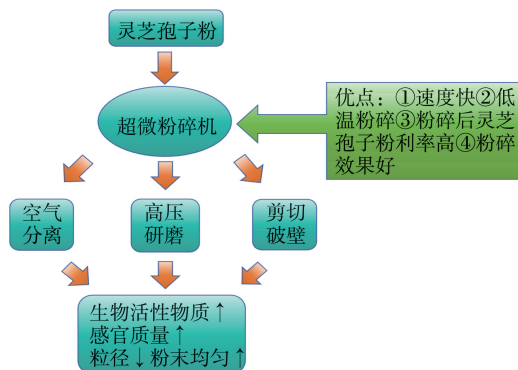
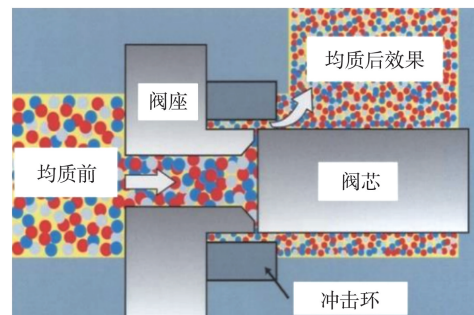


图5 超微粉碎对灵芝孢子粉处理和功效影响示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the effect of ultrafine pulverizer on the processing and efficacy of *Ganoderma sichuanense* spore powder图6 高压均质法对灵芝孢子粉破壁作用示意图^[72]Fig. 6 Schematic diagram of the wall breaking effect of high-pressure homogenization method on *Ganoderma sichuanense* spore powder

2.1.1 超微粉碎法。超微粉碎法是一种通过机械产生的挤压、冲击、研磨和剪切力使物质颗粒破碎成微米或纳米级的破壁技术。郭颖梅^[56]利用超微粉碎法对灵芝孢子粉进行破壁时,先对灵芝孢子粉进行了蒸馏水浸泡、高压均质和低温等预处理,再对其进行破壁处理,破壁率为98%左右。经过超微粉碎的灵芝孢子粉粒径细且分布均匀,原料的利用率可达到最大化^[67],从而提高了灵芝孢子粉的药用和食用价值。Qi等^[68]发现,对灵芝孢子粉进行室温机械研磨处理可以显著提高其在消化过程中营养物质的释放效率。在肠道消化阶段,未经研磨处理的灵芝孢子粉中多糖和三萜类成分的生物可利用性分别为29.52%和5.37%。相比之下,经过机械研磨后的灵芝孢子粉,其多糖的生物可利用性提升至39.73%~72.45%,三萜类成分的生物可

利用性则提高到 16.44%~24.97%。这表明机械研磨处理能够有效打破灵芝孢子粉的坚硬外壳,促进营养成分的释放,从而提高其在消化过程中的吸收效率。杜乐乐等研究了超声波破碎法、球磨法和超微粉碎法三种灵芝孢子破壁方法。结果表明,随着处理时间的延长,三种方法的破壁率均呈上升趋势。然而,在这三种方式中,超微粉碎法的破壁率显著高于其他两种方法,其破壁率为 96.97%。

2.1.2 高压均质法。高压均质法是通过高压均质机对原料施加高压使其能够以极高的速度通过高压均质阀微小的缝隙并失压,这一过程产生强大的剪切、撞击和空穴作用,从而使食品颗粒得以破裂。早期主要用于乳液的加工,随着对高压均质技术的研究发现高压均质法不仅可以提高乳液稳定性,还具有增强药物的递送和制备纳米型材料等功能^[71]。刘春延等采用高压均质法处理灵芝孢子粉时发现均质压力为 150 MPa、均质次数为 3 次、料液比为 1:100(g/mL)时,灵芝孢子粉破壁率可达 94.35%,破壁后灵芝孢子粉在抗肿瘤实验中表现出良好的效果。

2.1.3 超声波破壁法。超声波破壁法是基于超声波在液体中传播时产生的机械效应和空化效应,经超声处理后物料表面会形成大量气泡,气泡破裂时会产生微射流和冲击波,进而形高剪切力使物料细胞壁破裂,有效物质释放的方法^[73]。江和栋等利用超声波对灵芝孢子粉进行破壁,结果表明超声波处理后灵芝孢子粉的粒度明显减小,比表面积显著增加,色度更加均匀,流动性降低,促进了有效物质的释放。

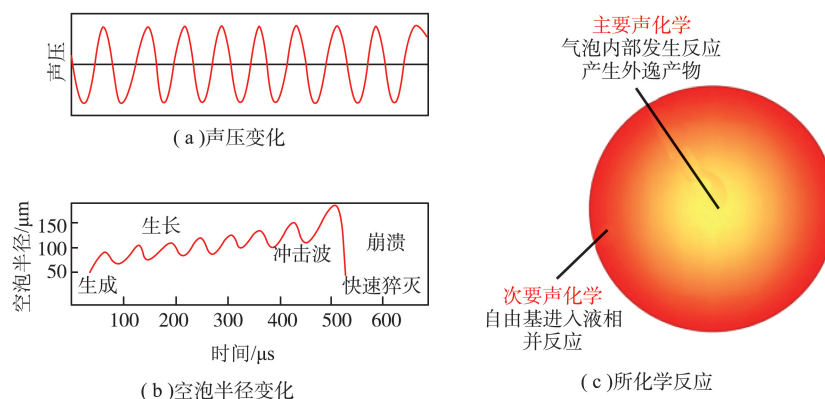


图 7 超声波空化对灵芝孢子粉作用示意图^[73]

Fig. 7 Schematic diagram of ultrasonic cavitation on *Ganoderma sichuanense* spore powder

2.2 生物法

生物法是利用酶或微生物对灵芝孢子的细胞壁进行处理从而达到破壁效果的方法,包含两种方式。一种是灵芝孢子粉和微生物共同发酵,通过发酵产生某些代谢产物,破坏灵芝孢子细胞壁,实现破壁的效果。Chaiyavat Chaiyasut 等^[74]利用植物乳杆菌发酵来破坏灵芝孢子,结果表明发酵 3 天灵芝孢子部分破碎,5、7 天完全破碎。刘国等^[75]研究发现,枯草芽孢杆菌和嗜酸乳杆菌与灵芝孢子粉共同发酵可实现高效破壁。该方法主要通过微生物代谢产生的酶类等物质破坏灵芝孢子粉的细胞壁,破壁率可达 85%。此法具有成本低、操作简便、无需复杂设备且能有效避免活性成分损失等优点,为灵芝孢子粉的高效利用提供了一种绿色、经济且高效的新途径。另一种是通过添加多种活性酶如纤维素酶、几丁质酶和葡萄糖苷酶等来降解细胞壁,从而实现破壁的目的。灵芝子实体主要由纤维素、半纤维素和木质素等组成,丁霄霄等研究酶法提取灵芝子实体多糖的最优工艺时利用纤维素酶、半纤维素酶和木瓜蛋白酶对灵芝子实体进行处理,显著促进了多糖的释放。所以可以根据灵芝孢子粉细胞壁的主要成分选择合适酶提高破壁效率。李国平^[77]研究表明,复合酶破壁法处理的灵芝孢子粉破壁效果显著。且通过反复冻融,可以促进孢子内活性物质的高效释放,提升灵芝孢子粉的生物利用度。罗童妍等研究表明,当溶壁酶添加量为 2%、酶解时间 5 h、料液比 1:10(g/mL)、温度 40℃、pH 值 6.5 时,灵芝孢子粉胞壁水溶性多糖提取量可达 17.86%。

2.3 化学法

化学破壁法是一种利用酸、碱或其他有机溶剂来破坏或分解灵芝孢子粉细胞壁结构的技术。根据破壁机制的不同,化学破壁法主要分为化学渗透法和酸碱处理法等。吕思敏等研究发现,灵芝孢子粉经酸浸高压

处理后多糖、三萜类化合物和麦角固醇的含量显著提高。所以酸浸高压法能够有效地破坏灵芝孢子粉胞壁,促进活性成分的释放,提高其生物利用度。胡文冉等研究发现化学处理能够有效地打破棉纤维的细胞壁,克服纤维难以研磨的问题。灵芝孢子粉的细胞壁含有丰富的纤维素,可以尝试开展应用绿色高效的化学试剂对灵芝孢子粉进行预处理探索以提高其破壁率,实现灵芝孢子粉的高效破壁。在对灵芝孢子多糖的结构鉴定及其抗肿瘤活性的研究中,Liu等^[63]指出 H_2SO_4 在加热过程中能够有效地穿透灵芝孢子粉的双层细胞壁结构,在其表面形成大量微孔,降解孢子囊粉内部的大分子多糖,这一过程破坏了细胞壁的完整性,降解了孢子囊粉内部的大分子多糖,使其分子量降低,水溶性增强,有利于多糖提取和活性的研究。

2.4 综合法

灵芝孢子粉的破壁方法多种多样,单一方法处理灵芝孢子粉各有利弊,例如机械法破壁法可降低成本,缩短处理时间,但存在重金属含量超标的风险;生物法虽对环境友好,但微生物和酶等杂质容易滞留在灵芝孢子粉中为后续提纯带来巨大麻烦;化学法的破壁率较高,适用范围广,然而化学法很容易造成营养物质的变性等。为解决各种方法的弊端,可将几种方法结合起来共同处理灵芝孢子粉细胞壁。不仅可以有效地解决某些问题,而且还可以提高灵芝孢子粉的破壁率。

齐慧等^[81]为提高灵芝孢子粉的破壁率和多糖含量,采用 γ 射线辐照联合球磨技术共同处理灵芝孢子粉。结果表明,当辐照条件为15.231 kGy,球磨时间为5 min时,灵芝孢子粉破壁率可达到97.18%,而单一球磨法的破壁率为92.28%。Chen等^[65]研究发现超声波辅助酶法可以提高灵芝三萜的提取效率。当酶浓度为2.5%、乙醇:物质为20:1 mL/g、超声功率为480 W时,灵芝三萜的含量可以达到11.65 mg/g。Zhao等^[82]指出在冰浴条件下对灵芝孢子粉进行超声处理,破壁率从45%提高到了75%,几乎是未冰浴的2倍。刘俊丽^[83]比较了高压脉冲电场、冻融-超声波和高速球磨仪三种破壁方法对灵芝孢子粉破壁率以及多糖和总三萜溶出量的影响,结果表明冻融-超声波处理的灵芝孢子粉的破壁率最高,为 $91.76\pm 0.10\%$,多糖和总三萜的溶出量分别为 1.53 ± 0.09 g/100 g、 2.72 ± 0.15 g/100 g。冻融-超声波可将灵芝孢子粉的胞壁破碎成大小不等的残片,胞壁内形成孢子空腔,有利于胞内活性物质大量溶出。因此冻融-超声波破壁法不仅可以提高灵芝孢子粉的破壁率,而且还可以促进其活性物质释放。

3 展望

为了更好地促进灵芝孢子粉中活性成分的释放,破壁处理是灵芝孢子粉产品加工中必不可少的步骤。目前针对新技术及多种破壁技术的组合研究应用仍相对较少,采用安全性更好、破壁率更高的一种或多种破壁技术的联合对灵芝孢子粉进行破壁处理不仅可以有效提高灵芝孢子粉产品的破壁效果,而且可以增加灵芝孢子粉有效成分的保留,是灵芝孢子粉破壁技术发展的趋势,有着广阔的应用前景。尤其随着人工智能(AI)技术的飞速发展,AI技术未来有望在灵芝孢子粉破壁领域通过构建模拟模型对破壁过程的工艺参数如温度、压力、时间等进行优化,从而精确控制破壁进程,提高灵芝孢子粉的破壁率和产品质量。

目前,针对灵芝孢子粉破壁技术及其功效研究方面也存在研究不够深入的问题。未来的研究应聚焦于以下几个关键方向:一是不同破壁技术的工业化应用及成本分析研究,以评估其在大规模生产中的可行性和经济性;二是不同破壁技术对灵芝孢子粉活性成分生物利用度的动态监测研究,以确保灵芝孢子粉在实际应用中的生物可及性及功效;三是不同破壁技术对灵芝孢子粉活性成分的贮藏稳定性研究,以延长产品货架期、提高产品品质。通过针对灵芝孢子粉破壁技术及其功效深入研究,有望进一步挖掘灵芝孢子粉的潜在价值,推动其在更多领域的广泛应用,为灵芝产业高质量发展和健康食品产业发展提供支撑。

参 考 文 献

- [1] 崔宝凯,潘新华,潘峰,等. 中国灵芝属真菌的多样性与资源[J]. 菌物学报, 2023, 42(1): 170-178.
- [2] 林志彬. 中西医结合研究诠释《神农本草经》有关灵芝的论述[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2019, 33(9): 645-646.
- [3] 陈可冀,张永祥. 传承精华、守正创新,揭示灵芝“神奇”的科学奥秘——评《灵芝的药理与临床》[J]. 中国中西医结合杂志, 2020, 40

(12); 1512-1513.

- [4] 钟显, 程敏, 林微微. 灵芝食用历史及安全性材料追溯[J]. 现代农业科技, 2020(1): 80-83.
- [5] 曹云波. 不同产地破壁灵芝孢子粉的理化指标分析[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [6] ZHAO C, FAN J L, LIU Y Y, et al. Hepatoprotective activity of *Ganoderma lucidum* triterpenoids in alcohol-induced liver injury in mice, an iTRAQ-based proteomic analysis[J]. Food Chemistry, 2019, 271(15): 148-156.
- [7] GAO Y Y, ZHOU Y H, LIU X P, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharide promotes broiler health by regulating lipid metabolism, antioxidants, and intestinal microflora[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135918.
- [8] ZHANG G P, PAN Y M, WANG Y N, et al. Physicochemical properties, non-volatile flavor components and antioxidant activity analysis of *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst. extracts dried by different methods[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105412.
- [9] AZAHAR N I, SWAN S Y, MOHD MOKHTAR N, et al. Evaluation of antioxidant, antibacterial and anticancer activities of *Ganoderma lucidum* extracts[J]. Materials Today: Proceedings, 2024, 107: 82-91.
- [10] YANG Z, HE Y M, ZHANG Q, et al. A novel PTP1B inhibitor extracted from *Ganoderma lucidum* ameliorates insulin resistance by regulating IRS1-GLUT4 cascades in the insulin signaling pathway[J]. Food & Function, 2018, 9(1): 397-406.
- [11] LUO Y Y, LUO X H, XUE Z J, et al. Exploring the anti-lung cancer mechanism of *Ganoderma lucidum* and its relationship with the level of immune cell infiltration based on network pharmacology and molecular docking[J]. Oncologie, 2024, 26(5): 831-843.
- [12] 刘洋, 覃媚媚, 罗印斌, 等. 灵芝孢子主要活性成分及其功能研究进展[J]. 北方园艺, 2020(5): 138-146.
- [13] 张守勤, 朱俊洁, 王长征, 等. 灵芝孢子食用方法与破壁技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2004(2): 160-162.
- [14] ZHENG W W, LAN S Q, ZHANG W X, et al. Polysaccharide structure evaluation of *Ganoderma lucidum* from different regions in China based on an innovative extraction strategy[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 335: 122079.
- [15] AHMAD M F, ABDULRAHMAN A A, AHMAD F A, et al. *Ganoderma lucidum*: Insight into antimicrobial and antioxidant properties with development of secondary metabolites[J]. Heliyon, 2024, 10(3): e25607.
- [16] AHMAD M F. *Ganoderma lucidum*: a rational pharmacological approach to surmount cancer[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2020, 260: 113047.
- [17] LIU F, ZHAO Q, GUO C L, et al. Removing the sporoderm from the sporoderm-broken spores of *Ganoderma lucidum* improves the anticancer and immune-regulatory activity of the water-soluble polysaccharide[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1006127.
- [18] ZHAO Y, LI Q Y, WANG M H, et al. Structural characterization of polysaccharides after fermentation from *Ganoderma lucidum* and its antioxidant activity in HepG2 cells induced by H_2O_2 [J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100682.
- [19] CÖR D, KNEZ Ž, HRNČIČ M K. Antitumour, antimicrobial, antioxidant and antiacetylcholinesterase effect of *Ganoderma lucidum* terpenoids and polysaccharides: a review[J]. Molecules, 2018, 23(3): 649.
- [20] DARIJA C A, ŽELJKO K, MAŠA K M. Antioxidant, antibacterial, antitumor, antifungal, antiviral, anti-inflammatory, and neuroprotective activity of *Ganoderma lucidum*: an overview[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 934982.
- [21] CHAN S W, TOMLINSON B, CHAN P, et al. The beneficial effects of *Ganoderma lucidum* on cardiovascular and metabolic disease risk[J]. Pharmaceutical Biology, 2021, 59(1): 1161-1171.
- [22] CHEN S D, GUAN X Y, YONG T Q, et al. Structural characterization and hepatoprotective activity of an acidic polysaccharide from *Ganoderma lucidum*[J]. Food Chemistry: X, 2022, 13(publish): 100204.
- [23] AHMAD M F, AHMAD F A, ZEYAUULLAH M, et al. *Ganoderma lucidum*: novel insight into hepatoprotective potential with mechanisms of action[J]. Nutrients, 2023, 15(8): 1874.
- [24] YANG M H, QIN X M, LIU X J. A review of polysaccharides from *Ganoderma lucidum*: preparation methods, structural characteristics, bioactivities, structure-activity relationships and potential applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 303: 140645.
- [25] LU J H, HE R J, SUN P L, et al. Molecular mechanisms of bioactive polysaccharides from *Ganoderma lucidum* (Lingzhi), a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 765-774.
- [26] ZHANG Z Y, CUI F J, SUN L, et al. Recent advances in *Ganoderma lucidum* polysaccharides: structures/bioactivities, biosynthesis and regulation[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103281.
- [27] 袁堃, 吴子威, 赵娜娜, 等. 灵芝多糖提取方法及含量测定的研究进展[J]. 菌物研究, 2025(1): 1-9.
- [28] 梁锐. 灵芝孢子粉胞壁多糖的分离纯化和结构表征[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- [29] GALAPPATHTHI M C A, PATABENDIGE N M, PREMARATHNE B M, et al. A review of *Ganoderma* triterpenoids and their bioactivities[J]. Biomolecules, 2022, 13(1): 24.
- [30] SU H G, PENG X R, SHI Q Q, et al. Lanostane triterpenoids with anti-inflammatory activities from *Ganoderma lucidum*[J]. Phytochemistry, 2020, 173: 112256.

- [31] LI P, CHEN S Y, SHEN S X, et al. Ethyl lucidenates a reverses P-glycoprotein mediated vincristine resistance in K562/A02 cells[J]. Natural Product Research, 2019, 33(5): 732-735.
- [32] TENG X Q, ZHANG W Q, SONG Y Y, et al. Protective effects of *Ganoderma lucidum* triterpenoids on oxidative stress and apoptosis in the spleen of chickens induced by cadmium[J]. Environmental science and pollution research international, 2019, 26(23): 23967-23980.
- [33] QI L F R, LIU S, LIU Y C, et al. Ganoderic acid A promotes amyloid- β clearance (in vitro) and ameliorates cognitive deficiency in Alzheimer's disease (mouse model) through autophagy induced by activating Axl[J]. International journal of molecular sciences, 2021, 22(11): 5559.
- [34] YU N H, HUANG Y P, JIANG Y, et al. *Ganoderma lucidum* triterpenoids (GLTs) reduce neuronal apoptosis via inhibition of ROCK signal pathway in APP/PS1 transgenic Alzheimer's disease mice[J]. Oxidative medicine and cellular longevity, 2020, 2020: 9894037.
- [35] BAO H K, LI H R, JIA Y, et al. Ganoderic acid A exerted antidepressant-like action through FXR modulated NLRP3 inflammasome and synaptic activity[J]. Biochemical Pharmacology, 2021, 188: 114561.
- [36] GENG X Q, MA A, HE J Z, et al. Ganoderic acid hinders renal fibrosis via suppressing the TGF- β /Smad and MAPK signaling pathways[J]. Acta pharmacologica Sinica, 2020, 41(5): 670-677.
- [37] 敖艳霞, 冯彩玲, 吴岩斌, 等. 灵芝总三萜对乙酰氨基酚肝损伤的保护作用[J]. 海峡药学, 2022, 34(4): 8-12.
- [38] SHAO C S, ZHOU X H, ZHENG X X, et al. Ganoderic acid D induces synergistic autophagic cell death except for apoptosis in ESCC cells[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2020, 262: 113213.
- [39] 卢烽, 姜涛, 杨宝学. 灵芝三萜的药理学研究进展[J]. 菌物研究, 2024, 22(1): 60-78.
- [40] YAN X, Y, YUAN H, LUO Y, et al. Ganoderic acid D protects human amniotic mesenchymal stem cells against oxidative stress-induced senescence through the PERK/NRF2 signaling pathway[J]. Oxidative medicine and cellular longevity, 2020, 2020: 8291413.
- [41] LI R, ZHANG J, ZHANG T H. Immunomodulatory activities of polysaccharides from *Ganoderma* on immune effector cells[J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127933.
- [42] KONG M, YAO Y, ZHANG H M. Antitumor activity of enzymatically hydrolyzed *Ganoderma lucidum* polysaccharide on U14 cervical carcinoma-bearing mice[J]. International Journal of Immunopathology and Pharmacology, 2019, 33: 2058738419869489.
- [43] CHEN Z, QIN W G, LIN H B, et al. Inhibitory effect of polysaccharides extracted from Changbai Mountain *Ganoderma lucidum* on periodontal inflammation[J]. Heliyon, 2023, 9(2): e13205.
- [44] 刘世锋, 董文静, 杨兰, 等. 灵芝多糖及其菌群代谢产物对 HepG2 细胞胰岛素抵抗的改善作用及机制[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 314-321.
- [45] LIU X J, YANG L D, LI G Y, et al. A novel promising neuroprotective agent; *Ganoderma lucidum* polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 229: 168-180.
- [46] HU Y L, CAO K L, WANG F, et al. Dual roles of hexokinase 2 in shaping microglial function by gating glycolytic flux and mitochondrial activity[J]. Nature Metabolism, 2022, 4(12): 1756-1774.
- [47] BAO F Y, YANG K Y, WU C R, et al. New natural inhibitors of hexokinase 2 (HK2): Steroids from *Ganoderma sinense*[J]. Fitoterapia, 2018, 125: 123-129.
- [48] SEO H W, HUNG T M, NA M, et al. Steroids and triterpenes from the fruit bodies of *Ganoderma lucidum* and their anti-complement activity[J]. Archives of pharmacological research, 2009, 32(11): 1573-1579.
- [49] GUO X M, JIA S, ZENG F J, et al. Sterol compounds from *Ganoderma atrum*: isolation, antimicrobial activity and protective effect on Caco-2 cell oxidation damage[J]. Food Chemistry Advances, 2022, 1: 100117.
- [50] XU J, XIAO C M, XU H S, et al. Anti-inflammatory effects of *Ganoderma lucidum* sterols via attenuation of the p38 MAPK and NF- κ B pathways in LPS-induced RAW 264.7 macrophages[J]. Food and Chemical Toxicology, 2021, 150: 112073.
- [51] YANG T, FANG H, LIN D M, et al. *Ganoderma Lucidum* polysaccharide peptide (GL-PP2): a potential therapeutic agent against sepsis-induced organ injury by modulating Nrf2/NF- κ B pathways[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 285: 138378.
- [52] LI Q Z, CHEN X, MAO P W, et al. N-Glycosylated *Ganoderma lucidum* immunomodulatory protein improved anti-inflammatory activity via inhibition of the p38 MAPK pathway[J]. Food & function, 2021, 12(8): 3393-3404.
- [53] WEN L R, SHENG Z L, WANG J P, et al. Structure of water-soluble polysaccharides in spore of *Ganoderma lucidum* and their anti-inflammatory activity[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131374.
- [54] ABULIZI A, HU L, MA A, et al. Ganoderic acid alleviates chemotherapy-induced fatigue in mice bearing colon tumor[J]. Acta pharmacologica Sinica, 2021, 42(10): 1703-1713.
- [55] JIN Z X, CUI W Y, ZHENG C J, et al. Assessing the therapeutic potential of *Ganoderma lucidum* spore oil in alleviating periodontal tis-

- sue damage in murine periodontitis model[J]. Applied Biological Chemistry, 2024, 67(1): 87.
- [56] 郭颖梅. 灵芝孢子破壁、多糖和谷胱甘肽提取、多糖分离纯化及活性研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.
- [57] 刘春延, 张国财, 程方志, 等. 灵芝孢子粉破壁工艺优化及其抗肿瘤作用[J]. 食品科学, 2016, 37(14): 51-55.
- [58] 江和栋, 李广焱, 牛仙, 等. 破壁对灵芝孢子粉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 51-56.
- [59] CHENG Z Y, SONG H Y, YANG Y J, et al. Optimization of microwave-assisted enzymatic extraction of polysaccharides from the fruit of *Schisandra chinensis* Baill[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 76: 161-168.
- [60] AZMIR J, ZAIDUL I S M, RAHMAN M M, et al. Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(4): 426-436.
- [61] NADAR S S, RAO P, RATHOD V K. Enzyme assisted extraction of biomolecules as an approach to novel extraction technology: a review[J]. Food Research International, 2018, 108: 309-330.
- [62] 罗童妍, 唐庆九, 梁锐, 等. 酶法提取灵芝孢子粉胞壁水溶性糖的工艺优化及分子量分布[J]. 食用菌学报, 2024, 31(2): 76-84.
- [63] LIU H M, ZHENG J, WANG X Y, et al. Structure identification of *Ganoderma lucidum* spore polysaccharides and their antitumor activity in vivo[J]. Molecules, 2024, 29(10): 2348.
- [64] 齐慧, 陈亮, 武小芬, 等. γ 射线辐照结合球磨处理灵芝孢子粉破壁新工艺研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, 38(5): 54-63.
- [65] CHEN D D, RUAN F J Z, YUAN M Y, et al. Application of ultrasound-assisted enzymatic extraction to enhance triterpenoid content and the biological properties of Vietnamese *Ganoderma lucidum* extract[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): e16635.
- [66] 马艺沔, 丁自勉, 陈向东, 等. 灵芝孢子粉破壁技术、质量分析与深加工相关研究进展[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2019, 21(5): 892-899.
- [67] 岳贤田, 杨继亮. 超微粉碎技术在天然产物提取中的应用[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(11): 150-152.
- [68] QI Y Y, ZHONG S, PAN F, et al. Effects of different wall-breaking methods on the nutrient release of *Ganoderma lucidum* spore powder during in vitro digestion[J]. Journal of the Science of Food Agriculture, 2024, 104(11): 6657-6666.
- [69] 杜乐乐, 赵敏, 付廷明, 等. 破壁灵芝孢子粉的制备及免疫活性研究[J]. 食用菌, 2016, 38(6): 57-60.
- [70] 李宝玉, 丘欣灵, 陈家福, 等. 食品破壁技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 258-267.
- [71] INGUVA P, GRASSELLI S, HENG P W S. High pressure homogenization-an update on its usage and understanding[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, 202: 284-302.
- [72] 王利. 高压均质机在润滑脂生产中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [73] 唐永康. 基于超声波与机械粉碎破壁技术的榛子蛋白提取工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [74] CHAIYASUT C, CHAKKRAPONG K, SASITHORN S. Breaking the spores of *Ganoderma lucidum* by fermentation with lactobacillus plantarum[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(43): 7379-7382.
- [75] 刘国, 李海龙, 高爱新. 一种利用益生菌发酵灵芝孢子粉的方法, CN104286827A[P/OL]. 2014-09-16.
- [76] 丁霄霄, 李凤伟, 商曰玲, 等. 灵芝多糖的复合酶法提取工艺优化 食品研究与开发[J] 食品研究与开发, 2020, 41(5): 34-39+53.
- [77] 李国平. 破壁灵芝孢子粉酶解生产工艺的研究[J]. 江西化工, 2017(5): 135.
- [78] 李宝玉, 丘欣灵, 陈家福, 等. 食品破壁技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 258-267.
- [79] 吕思敏, 何小冰, 张丽婷, 等. 酸浸高压法破壁对灵芝孢子中三种主要成分变化影响的研究[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(6): 93-97.
- [80] 胡文冉, 杨洋, 李波, 等. 化学预处理与傅里叶变换红外光谱相结合分析棉花纤维细胞壁组分[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(2): 261-268.
- [81] SRIKET C, KUIMALEE S, YARNPAKDEE S, et al. Elucidating the physicochemical and structural properties of *Ganoderma lucidum* spores: comparative analysis of various disruption techniques[J]. Powder Technology, 2024, 439: 119731.
- [82] ZHAO D, ZHANG M W, LI J S, et al. Investigation of ice-assisted sonication on the microstructure and chemical quality of *Ganoderma lucidum* spores[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(11): E2253-E2265.
- [83] 刘俊丽. 灵芝孢子粉破壁方法及工艺试验研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2020.

(责任编辑:刘庆松)