

破壁灵芝孢子粉菌种鉴别及破壁工艺研究进展与产业前景

韩龄贤¹ 梁曾恩妮^{2,3} 姬海南¹ 赵 潺¹ 张梦玲¹

(1. 中国质量检验检测科学研究院化学品安全研究所, 北京 100176; 2. 洞庭实验室, 湖南 长沙 410125;
3. 湖南省农业科学院农产品加工与质量安全研究所, 湖南 长沙 410125)

摘要: 灵芝孢子粉是灵芝成熟阶段释放的生殖细胞, 凝聚了灵芝的核心营养与活性成分。文章系统综述了破壁灵芝孢子粉领域的最新研究进展, 重点聚焦保健食品用灵芝菌种的许可范围与鉴别技术、破壁工艺优化与品质管控、安全性评价、功能及机制四大核心方向。结合政策导向与市场需求, 提出强化源头菌种管控、构建全链条品质体系、深化机制研究与拓展精准应用场景的未来发展建议。

关键词: 破壁灵芝孢子粉; 菌种鉴别; 破壁工艺; 品质管控; 安全性评价; 功能与机制

Research progress on strain identification and wall-breaking technologies of wall-broken *Ganoderma lucidum* spore powder and its industrial prospects

HAN Lingxian¹ LIANG Zengenni^{2,3} JI Hainan¹ ZHAO Chan¹ ZHANG Mengling¹

(1. Institute of Chemicals Safety, Chinese Academy of Quality and Inspection & Testing, Beijing 100176, China;
2. Dongting Laboratory, Changsha, Hunan 410125, China; 3. Institute of Agricultural Product Processing and Quality Safety, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: *Ganoderma lucidum* spore powder consists of reproductive cells released during the mature stage of the fungus and concentrates the core nutrients and bioactive components of *Ganoderma lucidum*. Recent advances in the field of wall-broken *Ganoderma lucidum* spore powder were systematically summarized, with a focus on four core directions: the permitted scope and identification techniques of *Ganoderma* strains for health foods, optimization of wall-breaking processes and quality control, safety evaluation, and functions and mechanisms. Combined with policy orientation and market demand, future development suggestions were proposed, including strengthening strain management at the source, establishing a full-chain quality system, deepening mechanism research, and expanding precise application scenarios.

Keywords: wall-broken *Ganoderma lucidum* spore powder; strain identification; wall-breaking process; quality control; safety evaluation; function and mechanism

灵芝孢子粉是灵芝成熟时从其菌盖释放的卵形生殖细胞, 凝聚了灵芝的核心营养与活性成分^[1-2]。中国灵芝孢子粉药用历史达 2 000 余年^[3-4], 现代药理研究证实其具有调节免疫、保护肝脏、抑制肿瘤细胞增殖等多种活

性, 为健康领域应用奠定科学基础^[5]。然而, 灵芝孢子 4~6 μm 的微小粒径及双层坚硬壁壳, 导致内部多糖、三萜等核心成分难以溶出, 严重制约吸收利用效率^[6-7]。破壁技术是解锁灵芝孢子粉药用价值的关键, 破壁后的灵芝孢

基金项目: 中国质量检验检测科学研究院基本科研业务费项目(编号: 2025JK040); 湖南省农业科技创新基金项目(编号: 2025CX110); 洞庭实验室一般项目(编号: 2025-DTYB-002)

通信作者: 张梦玲(1991—), 女, 中国质量检验检测科学研究院副研究员, 博士。E-mail: zhangml@caqit.org.cn

收稿日期: 2026-01-10 **改回日期:** 2026-03-30

引用格式: 韩龄贤, 梁曾恩妮, 姬海南, 等. 破壁灵芝孢子粉菌种鉴别及破壁工艺研究进展与产业前景[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 10-17.

Citation: HAN Lingxian, LIANG Zengenni, JI Hainan, et al. Research progress on strain identification and wall-breaking technologies of wall-broken *Ganoderma lucidum* spore powder and its industrial prospects[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 10-17.

子粉,在免疫调节、肝脏保护等核心功效上的发挥效率可达灵芝子实体的75倍,人体吸收率更是提升至99%以上,为产业化开发提供核心支撑^[8-9]。从产业数据看,截至2023年9月,中国获批的灵芝类保健食品达2 176个,其中以破壁灵芝孢子粉为主要原料的产品占比58.36%(1 270个),产值达13亿美元^[3],这一数据充分印证了其在保健食品领域的核心地位,但也暗示着产业规模扩张背后对品质管控与技术创新的迫切需求。

中国产业政策的持续完善为破壁灵芝孢子粉行业规范化发展提供了制度保障。2020年破壁灵芝孢子粉被纳入保健食品原料目录,2021年配套技术解读文件发布,2023年《灵芝孢子粉采收及加工技术规范》(GB/T 29344—2023)实施,2025年国产复配保健食品试点启动,加之多省份“食药同源”试点拓展^[10],形成递进式政策支撑体系。政策导向正从“合规准入”向“高质量发展”转变,这要求产业端不仅满足基础标准,更需在菌种优化、工艺升级、精准应用等方面实现突破。当前产业发展面临多重机遇与挑战:原料端菌种合规性界定与鉴别是核心痛点,加工端破壁技术优化与品质稳定性提升亟待突破,市场端掺假检测技术需适配监管需求,安全与功能端则缺乏特殊人群长期数据与精准机制研究。基于此,系统梳理破壁灵芝孢子粉的核心研究进展,旨在为该领域的产业规范化、高质量发展提供重要参考。

1 保健食品用灵芝菌种许可范围界定与鉴别方法

1.1 灵芝菌种许可范围及非合规菌种风险分析

国家市场监督管理总局、国家卫生健康委员会、国家中医药管理局关于发布辅酶Q10等5种保健食品原料目录的公告明确原料破壁灵芝孢子粉菌种限定为多孔菌科真菌赤芝、紫芝及松杉灵芝。当前市场上韩国灵芝、美国灵芝、新大片等品种未被纳入许可范围,存在违规使用风险。潘少香等^[11]研究显示,赤芝粉及赤芝椴木粉的营养元素含量显著优于美国灵芝粉及新大片孢子粉,其硒含量分

别为后者的3倍和2倍;同时,藏灵芝、香血芝及新大片孢子粉中砷含量超出安全阈值,存在明确安全隐患。非合规菌种的核心危害在于“功效不确定性”与“安全不可控性”双重叠加:一方面,活性成分含量不足会导致产品功效不达标,损害消费者权益;另一方面,重金属超标等问题会引发长期健康风险,破坏产业信誉。更值得警惕的是,部分商家利用“小众灵芝品种”概念炒作,规避监管审查,这要求鉴别技术不仅要“辨真伪”,更要“判优劣”。

1.2 灵芝菌种鉴别技术与市场产品实证分析

针对菌种鉴别需求,多种技术已被应用于灵芝品种鉴定^[12]。相比单一形态学鉴别易受环境影响,单一分子生物学技术难以覆盖复杂掺假场景,多技术联用可实现“快速初筛—精准确认”的高效鉴别流程。朱惠照等^[13]结合拮抗试验、ITS-PCR扩增及种的特异性扩增技术,成功区分仙芝1号、仙源5号、日本红芝、韩国灵芝等品种。Chen等^[14]进一步建立顶空—气相色谱—离子迁移谱(HS-GC-IMS)与DNA微条码联用的方法,实现灵芝及其加工产品的系统溯源。该方法先通过HS-GC-IMS获取挥发性成分图谱,借助主成分分析对泰山灵芝、美国灵芝、韩国灵芝等进行快速初筛;再通过PCR扩增ITS序列确定物种分类,并基于特异性突变位点设计DNA微条码,最终完成精准鉴定。

为验证市场相关产品原料合规性,笔者所在团队开展实证研究:收集山东泰安、山东冠县、浙江湖州、安徽金寨、江西庐山5个主产区8种带“蓝帽子”标志的破壁灵芝孢子粉及对应子实体样本,采用形态学观察与ITS测序结合方法鉴定。形态学显示所有子实体均呈肾形或近圆形,菌盖红褐色,具放射状纵脊与环纹;孢子椭圆形或卵形,菌丝细长、高度分支并定向排列,初步判定为赤芝(图1)。通过特异性条带扩增显示,所有样本ITS序列同源度均高于99%,确认为赤芝(表1)。结果表明,所检产品原料菌种符合赤芝标准,产品质量具备良好合规基础。未来需扩大样本覆盖范围,建立全国性菌种合规性监测数据库,为产业监管提供数据支撑。

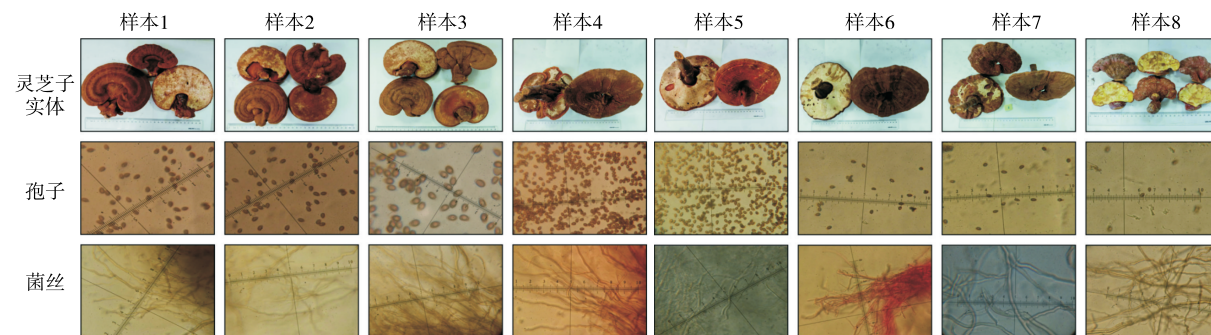


图1 灵芝子实体、孢子粉及菌丝形态

Figure 1 Morphology of *Ganoderma lucidum* fruiting body, spore powder, and mycelium

表 1 灵芝子实体菌种鉴定

Table 1 Identification of *Ganoderma lucidum* fruiting body strains

文章号	登录号	参考物种	同源度	比对结果评分	E 值	具体注释
样本 1	MF476199.1	<i>Ganoderma lucidum</i>	644/645 (99.84%)	1 188	0.0	用 ITS1 和 ITS4 引物进行扩增, 序列结果比对到了灵芝分离物 46 的小亚基核糖体 RNA 基因部分序列; 内部转录间隔区 1、5.8S 核糖体 RNA 基因以及内部转录间隔区 2 的完整序列; 以及大亚基核糖体 RNA 基因的部分序列
样本 2	MF476199.1	<i>Ganoderma lucidum</i>	639/640 (99.84%)	1 179	0.0	用 ITS1 和 ITS4 引物进行扩增, 序列结果比对到了灵芝分离物 46 的小亚基核糖体 RNA 基因部分序列; 内部转录间隔区 1、5.8S 核糖体 RNA 基因以及内部转录间隔区 2 的完整序列; 以及大亚基核糖体 RNA 基因的部分序列
样本 3	MF476199.1	<i>Ganoderma lucidum</i>	668/672 (99.40%)	1 219	0.0	用 ITS1 和 ITS4 引物进行扩增, 序列结果比对到了灵芝分离物 46 的小亚基核糖体 RNA 基因部分序列; 内部转录间隔区 1、5.8S 核糖体 RNA 基因以及内部转录间隔区 2 的完整序列; 以及大亚基核糖体 RNA 基因的部分序列
样本 4	JQ781864.1	<i>Ganoderma lingzhi</i>	636/637 (99.84%)	1 173	0.0	用 ITS1 和 ITS4 引物进行扩增, 序列结果比对到了灵芝标本 Dai1247 的 18S 核糖体 RNA 基因部分序列; 内部转录间隔区 1、5.8S 核糖体 RNA 基因以及内部转录间隔区 2 的完整序列; 以及 28S 核糖体 RNA 基因的部分序列
样本 5	JQ781863.1	<i>Ganoderma lingzhi</i>	640/641 (99.84%)	1 179	0.0	用 ITS1 和 ITS4 引物进行扩增, 序列结果比对到了灵芝标本 Li245 的 18S 核糖体 RNA 基因部分序列; 内部转录间隔区 1、5.8S 核糖体 RNA 基因以及内部转录间隔区 2 的完整序列; 以及 28S 核糖体 RNA 基因的部分序列
样本 6	MF476200.1	<i>Ganoderma lucidum</i>	651/655 (99.39%)	1 186	0.0	用 ITS1 和 ITS4 引物进行扩增, 序列结果比对到了灵芝分离物 46 的小亚基核糖体 RNA 基因部分序列; 内部转录间隔区 1、5.8S 核糖体 RNA 基因以及内部转录间隔区 2 的完整序列; 以及大亚基核糖体 RNA 基因的部分序列
样本 7	MF476198.1	<i>Ganoderma lucidum</i>	652/655 (99.54%)	1 192	0.0	用 ITS1 和 ITS4 引物进行扩增, 序列结果比对到了灵芝分离物 61 的小亚基核糖体 RNA 基因部分序列; 内部转录间隔区 1、5.8S 核糖体 RNA 基因以及内部转录间隔区 2 的完整序列; 以及大亚基核糖体 RNA 基因的部分序列
样本 8	JQ781863.1	<i>Ganoderma lingzhi</i>	638/639 (99.84%)	1 175	0.0	用 ITS1 和 ITS4 引物进行扩增, 序列结果比对到了灵芝标本 Li245 的 18S 核糖体 RNA 基因部分序列; 内部转录间隔区 1、5.8S 核糖体 RNA 基因以及内部转录间隔区 2 的完整序列; 以及 28S 核糖体 RNA 基因的部分序列

2 破壁灵芝孢子粉工艺优化、品质稳定性及掺假检测技术

2.1 破壁技术

灵芝孢子粉破壁工艺已形成多元化技术体系, 不同工艺在破壁效率、活性成分保留及产业化适配性上存在显著差异。刘俊丽等^[15]证实球磨破壁可显著提升营养成分溶出效率。Sriket 等^[6]发现振动研磨孢子粉破碎率更高, 而球磨易引发脂质氧化。Qi 等^[1]指出低温超细研磨更利于维持孢子粉形态完整性。新型工艺中, 江和栋等^[16]优化了微波—超声协同工艺; 刘俊丽等^[15]则确定高压脉冲电场最佳参数。通过对比分析发现, 破壁技术选

择需遵循“功效导向+产业适配”双原则: 球磨工艺虽存在氧化风险, 但通过低温改性、惰性气体保护等优化, 可实现产业化提质增效。微波—超声协同等新型工艺可实现高效破壁与成分保留, 但产业化应用受成本、能耗限制。未来技术突破方向应聚焦“绿色高效”, 开发低能耗、低氧化、高破壁率的新型工艺, 同时建立工艺参数与产品功效的关联模型, 实现精准调控。

2.2 破壁率检测与贮藏稳定性调控

破壁率是灵芝孢子粉品质评价的核心指标。传统血球计数板法虽可实现基础计数, 但难以满足规模化生产快速检测需求。潘在晨等^[17]开发的高光谱—化学计量学方法实现快速无损检测, 预测集决定系数达 0.868 2 以上。

该方法的核心价值在于填补了产业化快速检测的技术空白,但需进一步提升低破壁率区间的检测精度,并开发适配生产线的实时监测设备,实现“在线检测—实时调控”的闭环管理。在贮藏稳定性方面,张明等^[18]确定避光、真空、-18℃低温为最佳贮藏方案,祝敏珉等^[19]通过微胶囊技术提升氧化稳定性,确定最佳参数为破壁灵芝孢子粉质量分数33.1%、银耳原胶6.5%、明胶30.4%,体系pH4.1。除优化贮藏条件外,未来可结合新型天然保鲜剂与智能包装技术,通过氧气、湿度感应调控,实现全周期品质稳定;微胶囊技术虽效果显著,但需关注壁材安全性与成分释放效率,避免影响产品功效。

2.3 掺假检测技术

破壁灵芝孢子粉市场掺假问题突出,常见手段包括添加淀粉等廉价填充剂、新旧粉体混掺以及销售提油残粉。当前,光谱技术、电子鼻技术与化学计量学结合的方法在掺假检测中优势显著:电子鼻技术可通过风味信息快速分类样品,近红外光谱及数据融合策略在定性鉴别与定量分析中表现突出。风味信息关联检测方面,Qiao等^[3]构建电子鼻检测方案,以傅里叶变换红外光谱和紫外—可见分光光度法校准,通过提取风味信息实现品质区分,证实特征风味成分为品质评价关键指标。主成分分析表明,电子鼻响应值可有效分离不同品质样品;模式识别算法对比显示,均值预处理结合支持向量机模型准确率最高(98.7%),对3个未知样品和1个已知样品分类准确率达100%。

光谱技术及数据融合策略的掺假检测应用已获多项研究证实。Jiang等^[20]结合近红外光谱(NIRS)与高光谱成像(HSI)技术,采用数据融合策略开展检测,通过49种预处理方法及组合、5种特征变量选择技术优化模型,结果显示单一技术中NIRS在掺假识别和水平预测上优于HSI;中层融合(MLF)更适用于掺假识别,其中随机青蛙(RF)算法准确率、精确率、召回率及 F_1 值均达100%。Shi等^[21]建立近红外(NIR)光谱检测体系,采用偏最小二乘判别分析实现掺假样品快速准确鉴定;分别以偏最小二乘(PLS)和人工神经网络回归构建掺假水平预测模型,结果显示PLS模型预测性能优异,校准与验证相关系数均大于0.99,交叉验证均方根误差仅0.921%,预测均方根误差3.112%。

3 破壁灵芝孢子粉安全性评价

3.1 吸收与代谢特性

安全性是灵芝孢子粉类产品推广应用的核心前提,破壁灵芝孢子粉的安全性研究是保障其应用的关键,意义重大;而作为纯度更高的深加工产品,市面新增的去壁灵芝孢子粉,其安全性研究同样不容忽视。吸收与代谢过程是评估安全性的重要基础,直接关系到活性成分的体内作用规律与潜在蓄积风险。Cai等^[22]研究了破壁灵芝孢子粉在体外模拟消化与发酵过程中的特性变化。经胃肠消化模拟后,孢子形态发生轻微改变,且残渣中多糖含量降低约96.5%。由于消化后残渣绝对质量减少,单位

质量中的三萜含量相对上升,总三萜含量达 (24.7 ± 1.3) mg/g。在短链脂肪酸生成试验中,水提物组的丙酸、丁酸及戊酸产量均高于醇提物组,表明灵芝孢子多糖在促进短链脂肪酸合成中起关键作用,并进一步提示水提物所含成分具有更好的代谢调节与抗炎潜力。针对去壁灵芝孢子粉,Yu等^[23]采用经美国FDA生物分析指南验证的方法,考察单次口服8.0 g/kg去壁灵芝孢子粉后,大鼠体内12种三萜类活性成分的药代动力学与组织分布特征。药代动力学结果显示,12种三萜类成分的达峰时间为0.25~2.33 h,峰值质量浓度42.52~643.13 ng/mL,曲线下面积72.74~943.00 ng·h/mL,提示其在体内吸收代谢平缓,无异常蓄积峰值。组织分布结果表明,该成分在大鼠体内分布广泛且迅速,主要富集于肝、肺、脾、肾、心及胃肠道等脏器与消化组织,经肝肠循环代谢后逐步消除,无特异性脏器蓄积或代谢阻滞现象,佐证了该给药剂量下去壁灵芝孢子粉的体内安全性。

3.2 毒理学评价

毒理学试验是直接验证产品安全性的核心手段。俞宇寒等^[24]重点归纳了破壁灵芝孢子粉的急性毒性、遗传毒性、重复给药毒性及幼龄动物毒性等毒理学研究结果,证实其在相关试验中安全性良好,无明显毒性。针对去壁灵芝孢子粉,吕晗莹等^[25]探讨去壁灵芝孢子粉(每日剂量0.8,1.8,4.0 g/kg,灌胃)6周重复给药对幼龄SD大鼠的毒性及发育影响。结果显示,各剂量对大鼠主要毒性、发育及免疫等指标无明显影响;仅高剂量组出现可逆性尿液异常,各剂量组水迷宫表现提示学习记忆增强。Xia等^[26]对SD大鼠进行26周去壁灵芝孢子粉(每日剂量0.4,1.2,4.0 g/kg,灌胃)重复给药毒性试验。经体况、血液生化、免疫及病理等多维度检测,未见显著全身毒性,其无可见不良作用水平(NOEL)为4.0 g/kg,约为人体等效剂量的20倍,说明去壁灵芝孢子粉安全性良好。

4 破壁灵芝孢子粉的功能与作用机制

4.1 增强免疫力与抗疲劳

灵芝孢子粉具备显著的免疫调节作用,相关结论已得到多类试验模型与成分分析研究的佐证。杨继鸿等^[27]采用斑马鱼巨噬细胞减少症模型、斑马鱼心衰模型、 H_2O_2 诱导的心肌及内皮细胞氧化应激模型、脂多糖诱导的小胶质细胞炎症模型评估了去壁灵芝孢子粉免疫调节与心脏保护作用。结果表明,其可提升巨噬细胞形成及吞噬能力,改善心脏舒缩功能,减轻神经炎症与氧化应激所致心肌、内皮细胞损伤,具备免疫调节和心脏保护功效。陈丽芳等^[28]针对昆明雌性小鼠的研究表明,灵芝孢子粉蜂胶复合物(每日剂量75,150,450 mg/kg)经灌胃干预30 d后,中、高剂量组可显著增强小鼠腹腔巨噬细胞吞噬能力、脾淋巴细胞增殖能力,极显著提升血清溶血素水平与迟发型变态反应,低剂量组也能显著提高血清溶血素水平,有效增强小鼠免疫功能。此外,Huang等^[29]研究表明,

灵芝孢子粉(100 mg/kg 灌胃 10 d)可缓解胶原蛋白诱导型关节炎小鼠的关节损伤、肿胀及痛觉过敏,逆转中性粒细胞异常积累与活性氧过量生成。Li 等^[30]研究表明,去壁灵芝孢子粉三萜类物质含量最高,免疫调节活性最强(破壁灵芝孢子粉次之),可缓解中性粒细胞减少症,其免疫活性与 20-羟基灵芝酸 G、灵芝酸 A 等化合物相关。

免疫功能与抗疲劳能力存在双向调控关系,二者协同维持机体生理稳态——免疫功能直接影响抗疲劳能力,而长期疲劳则会削弱免疫防御机制^[31]。王焕等^[32]研究表明,灵芝孢子粉以每日 100, 300, 500 mg/kg 剂量给 ICR 小鼠灌胃 30 d,可显著延长其游泳时间,其中高剂量组雌鼠、雄鼠游泳时间分别延长 205.6%, 93.5%;生化检测显示,该干预能提高小鼠肝糖原与血糖水平,降低尿素氮含量,并调控 AKP、LDH 活性。上述结果证实,灵芝孢子粉可通过增加糖原储备、调节能量代谢、增强机体负荷适应性发挥抗疲劳作用。莫文菊等^[33]的随机安慰剂对照研究发现,乳腺癌术后化疗患者每日口服 2 g 去壁灵芝孢子粉,连续 12 周后,其癌因性疲乏发生率及评分显著低于对照组;同时患者 CD³⁺、CD⁴⁺免疫细胞比例上升,CD⁸⁺比例下降,IL-2、IL-10 水平升高,IL-6 等炎症因子水平降低,血常规指标改善,肠道普拉梭菌丰度提升,表明去壁灵芝孢子粉可同步减轻癌因性疲乏、调节免疫功能、优化肠道菌群结构并抑制炎症反应。

4.2 肝脏保护、代谢稳态与心血管健康

肝脏功能、代谢稳态与心血管健康密切关联,破壁灵芝孢子粉可通过多靶点、多通路实现协同保护。在肝脏保护方面,刘洋等^[34]探讨灵芝孢子粉多糖(每日剂量 150, 600 mg/kg,灌胃,连续给药 14 d)在对乙酰氨基酚肝损伤中的保护作用,发现其对乙酰氨基酚肝损伤能够起到保护作用,表现为降低促凋亡基因 *Caspase-3*、*BAX* 的表达,减少肝脏组织坏死面积。金海等^[35]研究显示,破壁灵芝孢子粉以每日 0.25, 0.50, 1.00 g/kg 剂量灌胃给药 22 周,可显著改善二乙基亚硝胺/四氯化碳诱导的肝癌 C57BL/6J 小鼠模型病变,其机制与激活 Nrf2/Keap1 信号通路、抑制炎症反应及氧化应激损伤相关。

在代谢调节方面,Wang 等^[36]针对 2 型糖尿病大鼠的研究表明,每日 1 g 破壁灵芝孢子粉灌胃给药 4 周,可改善大鼠糖脂代谢状态:干预前 2 周即出现血糖下降,4 周时脂质合成及氧化应激水平均优于对照组。RT-PCR 检测显示,脂质代谢相关基因(*Acox1*、*ACC*、*Insig-1/2*)及糖原合成相关基因(*GS2*、*GYG1*)表达上调,而 *SREBP-1*、*Acl*y 等基因表达无显著变化。该研究证实,破壁灵芝孢子粉可通过促进糖原合成、抑制糖异生降低血糖,同时调节胆固醇稳态改善血脂。

在心血管保护方面,Zheng 等^[37]对高脂饮食诱导的动脉粥样硬化合并主动脉钙化 LDLR^{-/-}小鼠模型研究发现,灵芝孢子粉每日 1 400 mg/kg 灌胃干预 36 周,可显著缩小

动脉粥样硬化斑块面积、减轻主动脉钙化。其机制主要包括两条核心路径:① 改善巨噬细胞 ABCA1/G1 介导的胆固醇外流,减少泡沫细胞堆积并抑制主动脉内皮异常激活,阻断动脉粥样硬化进展;② 失活血管平滑肌细胞(HASMCs)中 RUNX2 介导的成骨分化通路,阻断主动脉钙化进程。进一步的高效液相色谱检测结合活性验证证实,灵芝孢子粉中含有的灵芝酸 A、B、C6、G 及灵芝三萜醇等主要三萜类成分,可发挥与灵芝孢子粉整体一致的生物活性,是介导上述肝脏一代谢—心血管协同保护效应的关键活性物质基础。

4.3 神经保护与肠道菌群稳态

灵芝孢子粉在神经保护领域的作用已被多项研究证实,且其作用机制常与肠道菌群稳态调控密切相关。在神经保护方面,黄薇等^[38]发现破壁灵芝孢子粉以 720 mg/(kg·d)的剂量灌胃给药 28 d,可对阿尔茨海默病大鼠发挥显著神经保护效应,不仅能提升大鼠学习记忆能力、减轻海马神经元损伤,还可下调 p-tau 蛋白及 NLRP3、ASC 等炎症相关因子表达。Zhao 等^[39]的研究进一步佐证了灵芝孢子粉的神经保护潜力,其发现去壁灵芝孢子粉以 360, 720 mg/(kg·d)剂量灌胃给药 14 d,可显著改善链脲佐菌素诱导的间歇性阿尔茨海默病大鼠记忆力,逆转模型大鼠体内 A β 、Tau 蛋白及 Ser199、Ser202、Ser396 位点磷酸化水平的升高,同时恢复 BDNF、TrkB 及其 Tyr816 位点磷酸化的正常表达。

在肠道菌群调控及相关机制研究中,灵芝孢子粉功效与神经保护的关联得以进一步揭示。杨开等^[40]以破壁灵芝孢子粉为原料提取制备灵芝孢子粉低聚糖,通过肠道菌群体外发酵模型验证其菌群调控作用,结果显示,与空白对照组相比,该低聚糖可显著提升短链脂肪酸产量(伴随适量气体生成,利于增强肠道蠕动),同时显著提高双歧杆菌、乳酸杆菌等有益菌相对丰度,降低大肠杆菌等有害菌丰度,证实其对人体肠道菌群具有显著益生调节作用。Liu 等^[41]的研究表明,破壁灵芝孢子粉可通过选择性富集毛螺菌科,其代谢产生的烟酰胺核苷能提升肾脏 NAD⁺水平,修复衰老肾脏组织;同时调控类固醇代谢改善肾功能,间接保障神经稳态,该效应在自然衰老及辐射诱导早衰小鼠模型中均得到证实。

4.4 其他

除上述功能外,破壁灵芝孢子粉在骨骼健康维护、抗肿瘤、皮肤保护及胃黏膜保护等领域亦展现显著作用。在骨骼健康方面,罗添润等^[42]以去卵巢骨质疏松大鼠为研究对象,采用 400, 1 600 mg/kg 剂量的灵芝孢子粉进行为期 10 周的灌胃干预。结果显示,给药组大鼠股骨骨密度、骨生物力学指标及血清雌二醇水平均显著升高,同时骨小梁分离度与骨代谢指标显著降低,Micro-CT 检测可见骨小梁致密增多。该研究明确证实,灵芝孢子粉可有效改善大鼠骨质疏松症状,其作用机制与调节内分泌物

能、平衡骨代谢进程密切相关。在抗肿瘤方面,吴向平等^[43]聚焦于去壁灵芝孢子粉的水溶成分,证实该成分对于头颈鳞癌细胞具有显著的抑制效果,具体表现为抑制癌细胞增殖与转移、诱导细胞凋亡以及阻滞细胞周期于G2/M期。深入机制研究表明,其作用源于上调E-钙黏蛋白(E-cadherin)表达、下调间质标志物水平及调控周期蛋白相关功能。

在皮肤保护方面,刘春媛等^[44]针对皮肤衰老相关机制展开研究,发现灵芝孢子粉提取物通过预处理可保护新生儿真皮成纤维细胞免受叔丁基过氧化氢诱导的衰老损伤。其抗衰机制具体表现为:降低细胞内丙二醛含量,提升超氧化物歧化酶与谷胱甘肽过氧化物酶的活性,稳定线粒体膜电位,抑制 β -半乳糖苷酶活性,同时激活Nrf2/HO-1通路的mRNA表达,最终实现减弱氧化损伤、延缓皮肤衰老的核心作用。在胃黏膜保护方面,方雅玲等^[45]的研究证实了破壁灵芝孢子粉的预防性保护价值,以每日600,1200,2400 mg/kg的剂量对小鼠进行连续7 d的灌胃预处理,结果显示该制剂可显著减轻无水乙醇及吲哚美辛诱导的急性胃黏膜损伤,各剂量组均呈现损伤评分降低、抑制率提高、损伤发生率下降的特征。其中,破壁灵芝孢子粉对无水乙醇诱导的溃疡抑制作用尤为突出,明确其可有效抑制小鼠急性胃溃疡的发生。

5 展望

破壁灵芝孢子粉作为兼具传统药用底蕴与现代科学依据的保健食品原料,其研究与应用已进入规模化、精细化发展阶段,但在技术创新、标准完善、机制阐释等方面仍存在广阔的探索空间。结合当前研究现状与产业需求,未来可重点聚焦以下方向展开深入研究与实践。

(1) 强化源头管控技术创新,完善菌种质量标准体系。当前菌种鉴别技术虽已实现从形态学观察到分子生物学检测的跨越,但针对市场上新型非合规菌种的快速鉴别能力仍需提升。未来应着力开发更高效、精准的多技术联用鉴别体系,如基于基因组学、代谢组学的特征标志物筛选与检测方法,实现菌种从“定性鉴别”向“定量评价”与“风险预警”的升级。

(2) 推动加工工艺迭代升级,构建全链条品质管控体系。在破壁技术方面,现有机机械研磨、微波—超声协同等技术仍存在提升空间,未来应重点研发低能耗、低氧化、高破壁率的绿色高效破壁技术,如超临界流体破壁、生物酶解辅助破壁等新型工艺,并通过多因素耦合优化模型,实现工艺参数的精准调控。在品质检测领域,需进一步完善破壁率快速检测方法的产业化应用,开发适用于生产线实时监测的高灵敏度、无损检测设备;针对贮藏稳定性问题,应深入探索新型天然保鲜剂与智能包装技术的结合应用,构建“工艺优化—贮藏调控—品质追溯”全链条品质管控体系,有效延长产品保质期。同时,针对市场掺假问题,需推动检测技术的标准化与普惠化,开发低成本、易操作的

现场快速检测试剂盒,助力市场监管效率提升。

(3) 深化安全性与功效机制研究,拓展精准应用场景。当前安全性研究虽已证实破壁灵芝孢子粉的良好安全性,但针对特殊人群(如孕妇、婴幼儿、慢性病患者)的长期安全性数据仍较为匮乏,未来需开展大样本、长周期的人群队列研究,明确不同人群的适宜剂量与潜在风险。在功效机制方面,现有研究多集中于整体层面,针对单一活性成分(如特定三萜、多糖)的体内作用靶点、信号通路仍需进一步细化。基于上述研究,可推动破壁灵芝孢子粉从“规模扩张”向“高质量发展”的转型,为大健康产业提供重要支撑。

参考文献

- [1] 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 and Agriculture, 2024, 104(11): 6 657-6 666.
- [2] 张彬, 姚晶, 王金翠, 等. 破壁灵芝孢子粉中54种农残检测及基质效应研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(11): 154-162.
ZHANG B, YAO J, WANG J C, et al. Study on the detection of 54 pesticide residues and matrix effects in broken-wall *Ganoderma lucidum* spore powder[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(11): 154-162.
- [3] QIAO J L, LI J Y, LIU C, et al. Efficient detection technology of *Ganoderma lucidum* spore powder quality based on electronic nose[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 511: 162158.
- [4] ZHANG J, CUI X G, LUO W H, et al. The qualitative and quantitative analysis of *Ganoderma lucidum* spore powder chemical compounds as p38 MAPK inhibitors by the generation and verification of pharmacophore modelling[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 194: 115817.
- [5] SHARIF SWALLAH M, BONDZIE-QUAYE P, WANG H, et al. Potentialities of *Ganoderma lucidum* extracts as functional ingredients in food formulation[J]. Food Research International, 2023, 172: 113161.
- [6] 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.
- [7] SHI Y J, ZHENG H X, HONG Z P, et al. Antitumor effects of different *Ganoderma lucidum* spore powder in cell- and zebrafish-based bioassays[J]. Journal of Integrative Medicine-Jim, 2021, 19(2): 177-184.
- [8] 王伟影, 陈梦, 饶琛, 等. 市售灵芝孢子粉7种重金属元素含量测定及膳食暴露风险评估[J]. 中国现代应用药学, 2022, 39(17): 2 216-2 221.
WANG W Y, CHEN M, RAO C, et al. Determination of the content of 7 heavy metals in *Ganoderma* spore powder and assessment of the dietary exposure[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2022, 39(17): 2 216-2 221.

- [9] 包县峰, 徐勇, 刘维明, 等. 灵芝孢子粉生物活性成分及药理作用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 325-331.
- BAO X F, XU Y, LIU W M, et al. Research progress in bioactive ingredients and pharmacological functions of *Ganoderma lucidum* spores[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 325-331.
- [10] ZHONG B, LI F L, ZHAO J Y, et al. Sporoderm-broken spore powder of *Ganoderma lucidum* ameliorate obesity and inflammation process in high-fat diet-induced obese mice[J]. Food & Nutrition Research, 2022, 66: 8 745.
- [11] 潘少香, 赵岑, 同新焕, 等. 不同品种灵芝子实体及孢子粉元素成分分析及重金属安全性评价[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 319-324.
- PAN S X, ZHAO C, YAN X H, et al. Element composition analysis and heavy metal safety evaluation of different varieties of *Ganoderma lucidum* fruit bodies and their spore powders[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 319-324.
- [12] THAKUR P, KHANAL S, TAPWAL A, et al. Exploring *Ganoderma lucidum*: morphology, cultivation and market potential[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2024, 40(11): 369.
- [13] 朱惠照, 李明焱, 楚桐丽, 等. “仙芝 1 号”赤芝新品种鉴定[J]. 食用菌学报, 2009, 16(3): 25-28.
- ZHU H Z, LI M Y, CHU T L, et al. Identification of a new *Ganoderma lucidum* strain, Xianzhil[J]. Acta Edulis Fungi, 2009, 16(3): 25-28.
- [14] CHEN H, GUO H, ZHANG X Y, et al. Strategy on rapid discrimination of different varieties based on the combination of HS-GC-IMS and DNA Mini-barcode, spore powder of *Ganoderma* as a case study[J]. Microchemical Journal, 2024, 200: 110212.
- [15] 刘俊丽, 崔清亮, 张玉蕾, 等. 对破壁处理灵芝孢子粉功能特性的测定与分析[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(2): 14-18.
- LIU J L, CUI Q L, ZHANG Y L, et al. Determination and analysis of functional characteristics of *Ganoderma lucidum* spore powder treated by wall-breaking technique[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(2): 14-18.
- [16] 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.
- JIANG H D, LI G Y, NIU X, et al. Effect of broken wall on the quality of *Ganoderma lucidum* spore powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(23): 51-56.
- [17] 潘在晨, 仲怿, 方玲, 等. 基于高光谱技术的灵芝孢子粉破壁率快速检测方法研究[J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(6): 760-766.
- PAN Z C, ZHONG Y, FANG L, et al. A rapid, hyperspectral-based method for determining sporoderm-broken rate of *Ganoderma lucidum* spore powder[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2024, 41(6): 760-766.
- [18] 张明, 马超, 王崇队, 等. 储藏环境对破壁灵芝孢子粉品质的影响研究[J]. 中国果菜, 2020, 40(6): 47-51.
- ZHANG M, MA C, WANG C D, et al. Study on the effect of storage environment on the quality of spore powder of *Ganoderma lucidum*[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(6): 47-51.
- [19] 祝敏珉, 雷俊, 陈俊滔, 等. 灵芝孢子粉微胶囊的制备及其氧化稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 207-211.
- ZHU M M, LEI J, CHEN J T, et al. Preparation and oxidative stability of *Ganoderma lucidum* spore microcapsules[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(9): 207-211.
- [20] JIANG Z W, ZHONG L J, XUE J J, et al. Data fusion based on near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging technology for rapid adulteration detection of *Ganoderma lucidum* spore powder[J]. Microchemical Journal, 2023, 193: 109190.
- [21] SHI X Y, GAN X Q, WANG X B, et al. Rapid detection of *Ganoderma lucidum* spore powder adulterated with dyed starch by NIR spectroscopy and chemometrics[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 167: 113829.
- [22] CAI M, MU H, XING H Y, et al. *In vitro* gastrointestinal digestion and fermentation properties of *Ganoderma lucidum* spore powders and their extracts[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 110235.
- [23] YU H H, ZHANG G L, XU J, et al. Pharmacokinetic and tissue distribution analysis of sporoderm-removed *Ganoderma lucidum* spore powder in rats[J]. Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 2025, 1 259: 124626.
- [24] 俞宇寒, 宋翼升, 张立将. 灵芝及灵芝孢子粉的毒理学与安全性评价研究进展[J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(8): 1 147-1 154.
- YU Y H, SONG Y S, ZHANG L J. Research progress on toxicology and safety evaluation of *Ganoderma* and *Ganoderma* spore powder[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2023, 40(8): 1 147-1 154.
- [25] 吕晗莹, 宋翼升, 王汉波, 等. 去壁灵芝孢子粉幼龄大鼠安全性评价研究[J]. 中国比较医学杂志, 2021, 31(7): 21-30.
- LYU H Y, SONG Y S, WANG H B, et al. Safety evaluation of wall-removed *Ganoderma lucidum* spore powder in juvenile rats[J]. Chinese Journal of Comparative Medicine, 2021, 31(7): 21-30.
- [26] XIA L J, SUN R M, ZHANG L Y, et al. A 26-week repeated dose toxicity evaluation of sporoderm-removed *Ganoderma lucidum* spores in rats[J]. Food and Chemical Toxicology, 2023, 182: 114175.
- [27] 杨继鸿, 张国亮, 李丛舒, 等. 去壁灵芝孢子粉片的含量测定与免疫调节及心脏保护功能研究[J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(2): 203-212.
- YANG J H, ZHANG G L, LI C S, et al. Study on content determination and immunomodulatory and cardioprotective effects of sporoderm-removed *Ganoderma lucidum* spore powder tablet[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2024, 41(2): 203-212.
- [28] 陈丽芳, 王会宾, 叶克难. 灵芝孢子粉蜂胶复合物对小鼠免

- 疫功能的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 294-297, 302.
- CHEN L F, WANG H B, YE K N. Effect of *Ganoderma lucidum* spores and propolis complex on immune function in mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 294-297, 302.
- [29] HUANG S, ZHAN Z C, XU F, et al. *Ganoderma lucidum* spore powder alleviates rheumatoid arthritis-associated pain hypersensitivity through inhibiting accumulation, N1 polarization, and ROS production of neutrophils in mice[J]. Frontiers in Immunology, 2025, 16: 1569295.
- [30] LI Z H, SHI Y Q, ZHANG X H, et al. Screening immunoactive compounds of *Ganoderma lucidum* spores by mass spectrometry molecular networking combined with *in vivo* zebrafish assays[J]. Frontiers in Pharmacology, 2020, 11: 287.
- [31] OMDAL R. The biological basis of chronic fatigue: neuroinflammation and innate immunity[J]. Current Opinion in Neurology, 2020, 33(3): 391-396.
- [32] 王换换, 申正杰, 肖航, 等. 灵芝孢子粉对小鼠抗疲劳作用及生化机制初探[J]. 营养学报, 2019, 41(2): 173-177.
- WANG H H, SHEN Z J, XIAO H, et al. Preliminary research on the anti-fatigue effect of *Ganoderma lucidum* spore powders and its biochemical mechanism[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2019, 41(2): 173-177.
- [33] 莫文菊, 黄孝闻, 叶魏武, 等. 去壁灵芝孢子粉改善乳腺癌患者辅助化疗期间癌因性疲乏研究[J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(14): 1 921-1 928.
- MO W J, HUANG X W, YE W W, et al. Effect of sporoderm-removed *Ganoderma lucidum* spore powder on cancer-related fatigue in patients with breast cancer during adjuvant chemotherapy[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2024, 41(14): 1 921-1 928.
- [34] 刘洋, 韩忠明, 刘琳玲, 等. 灵芝孢子粉多糖对 APAP 肝损伤的保护作用研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 289-295.
- LIU Y, HAN Z M, LIU L L, et al. Protect effects of *Ganoderma lucidum* spore polysaccharide on liver injury caused by acetaminophen[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 289-295.
- [35] 金海, 刘倩, 朱加兴, 等. 破壁灵芝孢子粉对肝癌小鼠的治疗及作用机制[J]. 世界中医药, 2025, 20(4): 593-598.
- JIN H, LIU Q, ZHU J X, et al. Therapeutic effects and mechanisms of wall-broken *Ganoderma lucidum* spore powder on hepatocellular carcinoma in mice[J]. World Chinese Medicine, 2025, 20(4): 593-598.
- [36] WANG F, ZHOU Z K, REN X C, et al. Effect of *Ganoderma lucidum* spores intervention on glucose and lipid metabolism gene expression profiles in type 2 diabetic rats[J]. Lipids in Health and Disease, 2015, 14(1): 49.
- [37] ZHENG G B, ZHAO Y, LI Z H, et al. GLSP and GLSP-derived triterpenes attenuate atherosclerosis and aortic calcification by stimulating ABCA1/G1-mediated macrophage cholesterol efflux and inactivating RUNX2-mediated VSMC osteogenesis[J]. Theranostics, 2023, 13(4): 1 325-1 341.
- [38] 黄薇, 叶树, 丁志贤, 等. 破壁灵芝孢子粉调控 NLRP3 炎症体介导的焦亡对阿尔茨海默病大鼠学习记忆能力的影响[J]. 中华中医药杂志, 2024, 39(6): 3 073-3 077.
- HUANG W, YE S, DING Z X, et al. Effects of sporoderm-broken spores of *Ganoderma lucidum* modulating NLRP3 inflammasome-mediated pyroptosis on learning memory ability in Alzheimer's disease rats[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2024, 39(6): 3 073-3 077.
- [39] ZHAO H L, CUI S Y, QIN Y, et al. Prophylactic effects of sporoderm-removed *Ganoderma lucidum* spores in a rat model of streptozotocin-induced sporadic Alzheimer's disease[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2021, 269: 113725.
- [40] 杨开, 张雅杰, 张酥, 等. 灵芝孢子粉低聚糖的制备及调节肠道菌群功能研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 37-42.
- YANG K, ZHANG Y J, ZHANG S, et al. Preparation of *Ganoderma lucidum* spore oligosaccharide and its regulation on gut microbiota[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9): 37-42.
- [41] LIU X J, ZHAO J M, LIU J, et al. *Ganoderma lucidum* sporoderm-broken spore powder alleviates kidney aging by modulating gut microbiota[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2025, 353(Pt A): 120344.
- [42] 罗添润, 孙继超, 王玮, 等. 灵芝孢子粉对去卵巢大鼠骨量、骨生物力学和骨代谢的影响[J]. 中国骨质疏松杂志, 2024, 30(3): 374-378, 384.
- LUO T R, SUN J C, WANG W, et al. Effect of *Ganoderma lucidum* spores on bone mass, bone biomechanics, and bone metabolism in ovariectomized rats[J]. Chinese Journal of Osteoporosis, 2024, 30(3): 374-378, 384.
- [43] 吴向平, 太乙迪, 王嫣, 等. 去壁灵芝孢子粉水溶成分抑制头颈鳞癌细胞增殖及转移[J]. 安徽医科大学学报, 2023, 58(9): 1 434-1 441.
- WU X P, TAI Y D, WANG Y, et al. Aqueous-soluble components of sporoderm-removed *Ganoderma lucidum* spore powder inhibit the proliferation and metastasis of head and neck squamous cell carcinoma[J]. Acta Universitatis Medicinalis Anhui, 2023, 58(9): 1 434-1 441.
- [44] 刘春媛, 刘振华, 陈云霞, 等. 灵芝孢子粉提取物延缓皮肤衰老作用研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7): 59-65.
- LIU C Y, LIU Z H, CHEN Y X, et al. Anti-skin aging effect of *Ganoderma lucidum* spore extract[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 59-65.
- [45] 方雅玲, 张玉琴, 吴长辉, 等. 灵芝孢子油、破壁灵芝孢子粉及灵芝孢子提取物对小鼠急性胃溃疡的保护作用[J]. 药物评价研究, 2022, 45(2): 308-313.
- FANG Y L, ZHANG Y Q, WU C H, et al. Protective effect of *Ganoderma lucidum* spores oil, broken *Ganoderma lucidum* spore, and *Ganoderma lucidum* spore extract on formation of acute gastri ulcer in mice[J]. Drug Evaluation Research, 2022, 45(2): 308-313.