DOI:10.12441/spyswjs.20250729001 [文章编号] 1673-1689(2025)10-0001-09

蒸汽爆破技术在食用菌产业中的应用研究进展

杨 杰[1,2] 郑 娜[1,2] 赖春妹[1,2] 刘明逸[2,3] 李诗博[2,3] 魏珊杉[2,3] 赖谱富[2] 肖 正[2*]

(1. 福建农林大学生命科学学院,福建 福州 350002; 2. 福建省农业科学院农产品加工研究所,福建 福州 350003; 3. 福建农林大学食品科学学院,福建 福州 350002)

摘要:蒸汽爆破技术作为一种新兴的物理预处理手段,正逐步应用于食用菌产业。该技术通过高温高压蒸汽对物料进行瞬时爆破处理,可显著改善原料的物理结构与化学组成,在食用菌栽培基质改性、活性物质提取及副产物高值化利用等方面展现出独特优势,为食用菌产业的高质量发展提供了新的技术路径。作者主要综述了蒸汽爆破技术的装备、原理及影响因素,以及该技术在食用菌栽培基质改性、食用菌活性物质提取和食用菌副产物高值化利用方面的应用效果,旨在推动食用菌产业各环节持续向好发展,最终实现经济效益和生态效益的协同共赢。

关键词:蒸汽爆破;食用菌产业;栽培基质改性;活性物质提取;食用菌副产物回收

Advances in Application of Steam Explosion Technology in Edible Mushroom Industry

YANG Jie[1,2] *ZHENG Na*[1,2] *LAI Chunmei*[1,2] *LIU Mingyi*[2,3] *LI Shibo*[2,3] *WEI Shanshan*[2,3] *LAI Pufu*[2] *XIAO Zheng*[2*]

(1. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of Food Science and Technology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 3. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Steam explosion technology, an emerging physical pretreatment method, is increasingly applied in the edible mushroom industry. This technology subjects materials to instantaneous explosion under high-temperature and high-pressure steam, significantly improving their physical structures and chemical composition. It exhibits unique strengths in modifying edible mushroom cultivation substrates, extracting active compounds, and utilizing by-products as resources. This provides a new technical path for the high-quality development of the edible mushroom industry. The author primarily summarizes the equipment, principles, and influencing factors of steam explosion technology, as well as its diverse roles in modifying cultivation substrates, extracting active substances from edible mushrooms, and achieving high-value utilization of edible mushroom by-products. The aim is to promote positive development across all segments of the edible mushroom industry, achieving a win-win scenario for both economic and ecological benefits.

Keywords: steam explosion; edible mushroom industry; cultivation substrate modification; active substance extraction; edible mushroom by-product recovery

中国食用菌产业历经近四十年发展,已成为继粮、棉、油、菜、水果之后的农业“第六大产业”[1]。从发展阶段来看,中国食用菌产业已实现从传统分散种植到工厂化集中种植,再到智能化种植的三阶段跨越[2]。但食用菌全产业链各环节仍存在较大的提升空间:在种植环节,栽培基质中木质纤维素结构

基金项目:国家“十四五”重点研发计划项目(2024YFD2100800);中央引导地方科技发展专项项目(2024L3019);中国农业科学院“5511”协同创新工程项目(XTCXGC2021014);福建省农业科学院科技创新团队建设项目(CXTD2021018-2);福建省自然科学基金项目(2023J01201,2023J01377)。

通信作者:肖正(1988—),男,博士,助理研究员,主要从事食用菌加工研究。E-mail:1019266760@qq.com

收稿日期:2025-07-29 **修回日期:**2025-09-11

复杂，降解转化效率低，生物活性物质与小分子聚合物未被充分利用，制约了食用菌的生长效率[3]；在加工环节，食用菌虽富含多糖、氨基酸等130余种生物活性成分，被誉为“下一代食品”[4-5]，但精深加工率不足10%，附加值提升空间大[6]；在副产物回收环节，每生产1 kg食用菌会产生5~6 kg副产物（包括菌盖、菌柄及废弃基质等），这类副产物富含膳食纤维等活性成分，但传统处理方式易引发生态污染，同时增加环境治理成本，因此副产物的高值化利用成为产业可持续发展的关键[7-8]。

蒸汽爆破技术作为一种新兴的物理预处理手段，凭借其经济性、安全性、环保性及规模化处理能力，已成为食用菌产业技术创新的重要方向。研究表明，该技术通过高温高压蒸汽瞬时爆破处理，能显著改善原料的物理结构与化学组成[9]。在栽培基质改性方面，可优化基质的物理与化学性质[10]，提升保水透气性与利用效率[11]，促进菌丝体生长；在深加工领域，能破坏细胞壁屏障，提高多糖等活性成分的溶出效率[12]；在副产物利用方面，可将废渣废料转化为高附加值功能性产品[13]。该技术的深入应用不仅能解决产业瓶颈，还将推动食用菌产业向高效、绿色、循环方向转型，为农业供给侧结构性改革与乡村振兴提供支撑。

作者详细梳理了蒸汽爆破技术的装备、原理及参数设置，及其在食用菌栽培基质改性、活性物质提取和副产物高值化利用中的应用，以期促进食用菌产业链各环节协同发展，最终实现经济效益与生态效益协同共赢。

1 蒸汽爆破技术的设备及原理

蒸汽爆破技术起源于20世纪80年代的美国，最初用于木质纤维素预处理，主要包含蒸汽裂解和爆炸减压2个关键阶段，具有安全、绿色、经济的特点[14]。该技术的典型设备由蒸汽反应器、蒸汽发生器、排出阀、回收罐等组成，见图1[14-15]。在蒸汽裂解阶段，反应室密闭后通入高温高压蒸汽，使物料内部形成高温高压环境，蒸汽渗透至细胞内部并升高物料温度；随后进入爆炸减压阶段，饱和蒸汽的高压被瞬间释放，引发热降解、类酸性水解、类机械断裂及氢键破坏与重排等一系列变化。在此过程中，膨胀气体产生的冲击波破坏纤维素化学键并促使其结构重排，使纤维素更易形成有序结构[16]；同时，强大的剪切力会破坏原料致密结构，并在其表面形成孔隙，为小分子活性物质的分离提供通道[17]。

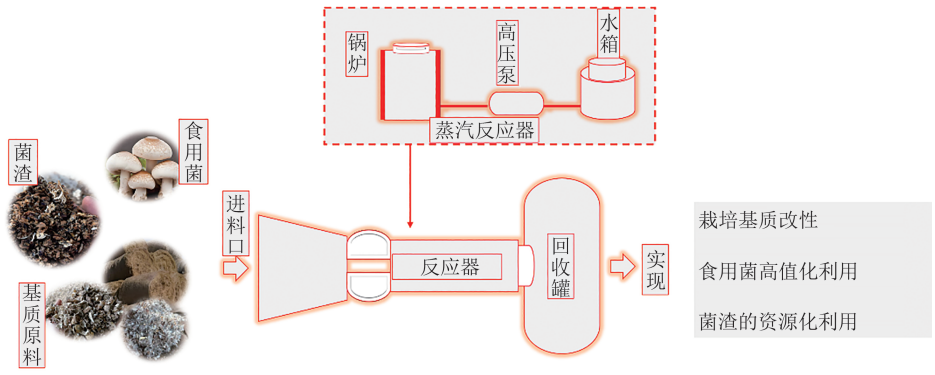


图1 蒸汽爆破技术在食用菌产业的应用

Fig. 1 Application of steam explosion technology in the edible mushroom industry

2 蒸汽爆破参数的设置

蒸汽爆破参数的设置与其应用效果密切相关，且因应用领域的不同而存在差异。在食用菌产业，蒸汽爆破研究主要集中于栽培基质改性与食用菌深加工领域，两者的爆破需求与参数设置存在显著差异。

2.1 食用菌深加工领域

在食用菌深加工领域，蒸汽爆破技术聚焦于活性物质提取，已形成涵盖食用菌多糖提取、麦角甾醇提取及可溶性膳食纤维改性的技术方向，同时也延伸至食用菌风味与滋味的开发应用。研究人员可通过调控复水率、腔料比等参数优化提取工艺。但目前研究仍聚焦于多糖提取，而其他活性物质的研究逻辑与多糖提取具有相似性，故对该领域参数进行总结，以期为其他活性物质的提取提供参考。

2.1.1　复水预处理

原料预处理通常指用水浸润待处理部位，是否进行该步骤取决于食用菌种类、含水率、硬度等特性。研究表明，干制食用菌复水后会发生膨胀，既能改善蒸汽渗透效果，促进活性物质的释放，又可避免爆破过程中的机械损伤。针对不同食用菌，研究者已确定最佳复水率，如瓦尼桑黄隔夜复水的含水率为30%[12]，灵芝为20%[18]。

2.1.2　腔料比

腔料比是指放入蒸汽反应器中的食用菌体积与反应器容积的比例。当腔料比处于适宜范围时，高温蒸汽能够与食用菌充分接触，从而提高活性物质的提取效率。若腔料比过低，反应器腔体空间未得到充分利用，不仅造成资源浪费，还会导致处理过程中纤维相互撞击的作用力减小，进而影响爆破效果。相反，当腔料比过高时，蒸汽难以有效渗透到物料内部，高温蒸煮效果和瞬间破碎作用均会减弱，最终降低蒸汽爆破的整体效果。相关研究表明，金针菇菇脚多糖提取率随着腔料比的增大呈现先升高后略有下降的趋势，当腔料比为2∶4时，多糖提取率最高[19]。

2.1.3　压强

当蒸汽持续通入反应装置时，反应器内部形成高温高压环境，既可以提高蒸汽渗透性，加速材料内部的化学变化，又能增大反应器内外压强差。该压力差在爆破阶段会转化为水蒸气膨胀产生的剪切力，进而提高细胞壁中木质素和半纤维素的溶解度，促使其降解，降低传质阻力并提升溶质扩散效率[20]。但压强过高可能导致多糖分子链断裂，部分可溶性糖降解，增加沉淀难度，从而降低多糖提取率[21]。因此，实际操作需综合考虑处理目的，选择适宜的爆破压强。范祺等[12]研究发现，当蒸汽爆破压强为0.2~1.2 MPa时，瓦尼桑黄多糖溶出率随蒸汽爆破压强的增加呈先升高后降低的趋势；当蒸汽爆破压强为0.8 MPa时，多糖溶出率最高。

2.1.4　保压时间

保压时间直接影响蒸汽爆破的处理效果。若保压时间过短，蒸汽无法充分渗透到物料内部；而保压时间过长，则可能导致原料内部的蒸汽过饱和，使处理效果进入平台期，难以进一步提升[22]。因此，需综合考量处理目的、环保要求和能耗要求，选择最佳的保压时间。研究显示，在灵芝粗多糖提取过程中，随着保压时间的延长，粗多糖得率呈上升趋势；但当保压时间超过90 s后，得率反而开始下降[18]。

蒸汽爆破效果受物料特性与设备参数共同影响，参数优化时需结合物料特性进行调节，但当前因缺乏明确参考依据导致实际操作难度较大。未来研究需重点总结物料特性与爆破参数（如压强、时间、温度等）的适配规律，构建参数预测模型，从而降低试错成本，推动该技术在食用菌领域的规范化应用。

2.2　栽培基质改性领域

经蒸汽爆破技术处理的栽培基质可明确划分为3类，分别是致密原料、疏松原料和特殊原料，见表1。油茶壳、桑枝等致密原料需采用“高压+中长时间保压”参数。例如，油茶壳的爆破参数为1.8~3.0 MPa、10~30 min[10]，桑枝的爆破参数为1.8 MPa、4 min[25]。高压与充足的保压时间可使蒸汽充分渗透至致密纤维间隙，实现基质的有效解构。若仅依赖高压而缩短保压时间，易导致基质表层

表1　蒸汽爆破技术处理栽培基质的分类、参数及其对食用菌的影响

Table 1　Types of cultivation substrates and the parameters of steam explosion and effects of steam explosion on edible mushroom

栽培基质	蒸汽爆破参数	原料	对食用菌的影响	参考文献
致密原料	高压+中长时间保压	油茶壳	保水保肥性强，兼具药肥与抗菌杀虫功能；纤维结构解构后孔隙率提升，实现6茬连收，生物基质转化率提高1.51倍，增产且减少资源浪费	[10]
		槟榔粉	维持培养基机械性，提供微酸性环境，有效提升食用菌出菇量	[23]
		梅片渣	纤维部分解构，透气性与保水性得到显著改善，出菇时间较传统配方缩短25%	[24]
		桑枝	提升营养成分均匀度及1-脱氧野尻霉素含量，提高纤维素利用率和营养吸收效率	[25]
		猴樟树枝	显著提升樟芝菌丝体中总三萜和总多糖含量，提升产品品质	[26]
疏松原料	中低压+短时间保压	南瓜子、枯枝、麦麸混合	富含有机氮、碳等基础养分，能为食用菌生长提供充足营养，加快菌丝发菌速度（日均生长0.43~0.48 cm），使出菇时间提前2~3 d；协同提升基质疏松性，促进菌丝快速扩展	[27]
特殊原料	压力递增+保压恒定	秸秆	木质素与纤维素分子断裂，细胞壁破裂，孔隙度提升且碳氮比降低，释放更多易被微生物利用的碳源，为短周期食用菌提供高效碳源，加速营养分解吸收，显著提升基质的营养	[27-28]

过度爆破而内部未得到有效处理，进而影响改性效果。南瓜子、枯枝、麦麸等疏松原料则适用“中低压+短时间保压”参数（0.5~0.8 MPa、1~3 min）[27]。中低压条件下蒸汽快速渗透，短时间保压即可满足疏松原料的改性需求，保压时间过长反而会导致原料过度软化及营养成分流失。秸秆等特殊原料需采用“压力递增+保压恒定”策略（一道 0.5~1.0 MPa、二道 1.0~1.5 MPa，保压时间均为 2~3 min）[29]。通过压力逐步递增可实现基质的渐进式改性，恒定保压时间则能保障原料物理形态的稳定性。

蒸汽爆破参数的选择取决于基质纤维素的致密程度：原料越致密，所需压力越高、保压时间越长；反之则参数越温和。未来研究应聚焦不同基质的参数变化规律，筛选最佳爆破条件，开发适配食用菌种植的专用基质，从而推动产业高效可持续发展。

3 蒸汽爆破技术在食用菌产业中的应用

3.1 蒸汽爆破技术在食用菌栽培基质改性中的应用

当前食用菌育种技术已能满足市场对高价值菌种的需求，但优质菌种仅是生产优质食用菌的基础条件，营养丰富且利用率高的栽培基质，才是保障食用菌生长质量的关键。目前，食用菌栽培基质主要源于农业与工业废弃物，包括农作物收获残留物（如叶、根、茎、秸秆、种子、外壳等）及加工副产物（如果皮、果肉、麸皮、果渣、甘蔗渣和贝壳等）[30]。这些废弃物富含木质纤维素，是食用菌获取营养的主要来源。蒸汽爆破技术作为一种高效的膳食纤维改性手段，在改善食用菌栽培基质的结构与功能特性方面具有巨大潜力，目前已有大量研究将其应用于食用菌栽培基质改性，见图2。

蒸汽爆破技术通过破坏植物细胞壁，松解纤维素、半纤维素和木质素复杂结构，改善食用菌栽培基质的性能。该技术可降低木质素和半纤维素含量，增加纤维素可及性，使食用菌更高效地获取营养物质，减少菌丝的能量消耗并缩短纤维素酶的分解时间，进而加速营养吸收、促进食用菌生长[24,27]。蒸汽爆破处理后，栽培基质会形成蜂窝状多孔结构，改善了透气性与保水性，有利于菌丝扩展和氧气交换，避免栽培中后期因基质板结导致的透气性下降，使栽培基质的生物转化率提升1.51倍[10]。蒸汽爆破还能促进栽培基质中有效成分的释放，细胞壁被破坏后，纤维素中难以被利用的营养成分通过破裂的细胞壁渗出[25-26]。此外，该技术还能显著提高食用菌的产量与品质[10]。未来研究需关注蒸汽爆破对栽培基质与食用菌的协同影响，论证纤维素改性后营养成分释放、利用效率提升、产量与品质改善及微环境调控等作用机制；同时完善对栽培基质营养组成变化及微生态负面影响的评估，避免热敏感营养成分降解与微生态系统破坏，保障食用菌处于最佳生长状态。

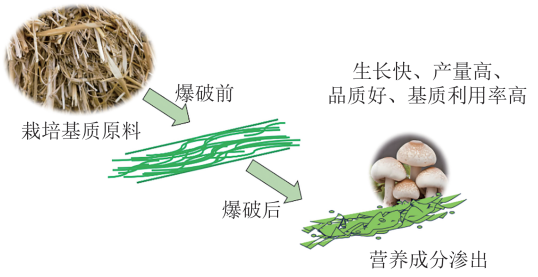


图2 蒸汽爆破技术在食用菌栽培基质改性中的应用

Fig. 2 Application of steam explosion technology in the modification of edible mushroom cultivation substrates

此外，蒸汽爆破具备成为栽培基质灭菌新方式的潜力。高温裂解环节产生的压力与水蒸气，可在栽培基质改性的同时实现灭菌[31]，且改性油茶壳等基质还表现出抗菌杀虫作用[10]。但目前其灭菌应用尚未普及，作为成熟技术进行推广为时尚早。未来需开展严谨的灭菌效能验证，对比传统灭菌方法并分析优劣势，规避潜在负面影响，探究最佳灭菌参数并建立科学的应用标准，为其规范化应用奠定基础。

3.2 蒸汽爆破技术在食用菌活性物质提取中的应用

3.2.1 蒸汽爆破技术对食用菌多糖的影响

自然界中食用菌种类繁多，营养丰富，富含多糖、膳食纤维、甾醇类物质、三萜类物质和多种氨基酸，具有抗氧化、抗炎、提高免疫力等多种生物活性[32-33]。食用菌活性物质的提取是未来深加工的主要研究方向。大量研究表明，采用蒸汽爆破技术预处理食用菌子实体及其菇脚，能显著提高多糖产量。蒸汽爆破技术在食用菌活性物质提取中的应用见表2。

现有研究表明，蒸汽爆破技术在提升多糖提取效率的同时，会对多糖产生多维度影响，既能促进被纤维类包裹的多糖释放，又可改变多糖的空间结构。该技术能增加云芝多糖的含量与种类，并提高葡萄糖、鼠李糖和阿拉伯糖等单糖的含量[40]。同

表2　蒸汽爆破技术在食用菌活性物质提取中的应用

Table 2　Application of steam explosion technology in the extraction of active substances from edible mushroom

食用菌	蒸汽爆破参数	结论	参考文献
金针菇菇脚	腔料比8∶5、保压时间100 s、压强1.0 MPa	金针菇菇脚粗多糖提取率达8.73%，较对照组提高了88.15%	[19]
茯苓	压强2.0 MPa、保压时间60 s	多糖得率最高	[34]
尼瓦桑黄	压强0.8 MPa、保压时间240 s	多糖溶出率最大为1.68%，单糖组分为岩藻糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖和葡糖醛酸，其中葡萄糖占比最高	[12]
灵芝	压强1.3 MPa、保压时间100 s、超声20 min	灵芝子实体粗多糖得率为14.21%，较对照组提高了1.86倍	[18]
香菇	压强1.5 MPa、保压时间150 s	香菇多糖含量约为未处理组的4倍，总糖含量为未处理组的2倍，蛋白质含量略有增加，纤维素与脂肪含量没有明显变化	[35]
荷叶离褶伞（鹿茸菇）	压强2.0 MPa、保压时间60 s	蒸汽爆破处理后粗多糖得率为15.42%，多糖质量分数8.66%，分别为常规粉碎组的2.44倍和1.58倍	[36]
杏鲍菇	压强1.4 MPa、保压时间60 s、料液比1 g∶40 mL、温度80 ℃	食用菌多糖提取率较未处理组提高了2.38±0.06倍，抗氧化活性显著增强	[37]
双孢蘑菇	压强1.2 MPa、保压时间90 s、料液比1 g∶50 mL、温度90 ℃	食用菌多糖提取率较未处理组提高了1.91±0.07倍，抗氧化活性显著增强	[37]
茶树菇	压强1.4 MPa、保压时间90 s、料液比1 g∶40 mL、温度80 ℃	食用菌多糖提取率较未处理组提高了2.47±0.01倍，抗氧化活性显著增强	[37]
银耳	压强分别为0.5、1.0、1.5 MPa，保压时间60 s	随着蒸汽爆破压强的升高，银耳多糖的热稳定性增强，弹性、黏度、相对分子质量及粒径均减小；0.5 MPa处理组的总糖和糖醛酸含量显著提升，甘露糖与葡萄糖摩尔比及比表面积显著提升；1.0 MPa时，银耳多糖提取率提升至50.16%	[38]
海鲜菇	温度160 ℃、保压时间62 s、料液比1 g∶16 mL	多糖得率为（9.19±0.22）%，较传统热水浸提法提高了105.59%	[39]

时，多糖的生物活性也得到增强，如提高灵芝子实体粗多糖的抗氧化活性[18]、增强茯苓多糖的免疫调节作用[34]、提升金针菇菇脚多糖的抗炎活性[19]。随着研究的深入，研究者将蒸汽爆破与其他提取技术联用，从单一多糖提取转向复合多糖提取，形成协同效应。例如，蒸汽爆破联合超声处理后，杏鲍菇、双孢蘑菇和茶树菇等多糖的DPPH自由基清除率分别提高了3.21倍、2.71倍和2.09倍[37]，抗氧化活性显著增强；当蒸汽爆破技术与超微粉碎技术联合处理灵芝粉体时，多糖溶出率、比表面积、堆积密度和水溶性指数等特性均得到显著优化[41]。

蒸汽爆破技术在提升食用菌多糖提取率与活性方面的作用，已在多种食用菌中得到验证。该技术已成为继传统热水提取、乙醇提取、超声辅助提取及微波提取之后的一种多糖提取新技术，可广泛应用于食用菌多糖的提取过程。但目前该技术对多糖结构和功能的潜在影响仍不明确，如对小分子糖类的变化规律尚未理清，对多糖活性与构象的关系缺乏深入认知。未来研究需从单一工艺优化向更深层次推进，掌握蒸汽爆破对多糖成分及功效的影响规律，建立爆破参数-活性物质构象-功效关系数据库，探索多种食用菌多糖的提取工艺，创新与超声辅助、酶解等技术联用的提取方式，并将相关活性物质应用于功能食品及医疗保健产品的研发中。

3.2.2　蒸汽爆破技术对食用菌麦角甾醇的影响

麦角甾醇是食用菌中常见的、具有重要营养价值和药理活性的甾醇类物质。麦角甾醇对人体健康十分有益，具有多种药理作用，包括抗炎、抗癌、降血糖以及增强机体免疫力等[42-43]。经蒸汽爆破处理后，菇脚中麦角甾醇的提取率提升了34.10%，且提取20~30 min时的提取率超过了未处理样品数小时的提取率[44]。未来需在更多食用菌中验证并优化蒸汽爆破提取麦角甾醇的工艺，持续拓宽该技术在食用菌活性物质提取中的应用范围；同时应分类构建蒸汽爆破辅助提取食用菌活性物质的参数数据库，为定向提取活性物质、获取具有明确功效的成分提供技术支撑。

3.3　蒸汽爆破技术对食用菌风味和滋味的影响

食用菌的风味与滋味由挥发性物质（如八碳化合物、含硫化合物等）和非挥发性物质（如游离

氨基酸、可溶性糖、呈味核苷酸等）共同决定[45]。蒸汽爆破技术通过高温高压促使氨基酸与还原糖发生美拉德反应及焦糖化反应，生成并释放大量风味物质，进而改变食用菌的风味特征[46]，见图 3。GC-IMS 结果显示，采用蒸汽爆破技术预处理金针菇菇脚后，其游离氨基酸总量和必需氨基酸占比均有所提升，酯类和醛类减少，酮类和吡嗪类增加，形成了独特的风味[46]；采用蒸汽爆破联合超声辅助酶解技术处理后，小分子氨基酸和多糖得到充分释放，产品干燥后鲜味浓郁、营养物质丰富且易于吸收[47]。类似地，将经蒸汽爆破处理的酱油渣应用于豆瓣酱中时，产品中吡嗪类物质增多，烧烤气味和坚果香气增强[48]。这些研究充分展现了该技术在食用菌风味食品及调味品开发中的应用潜力。

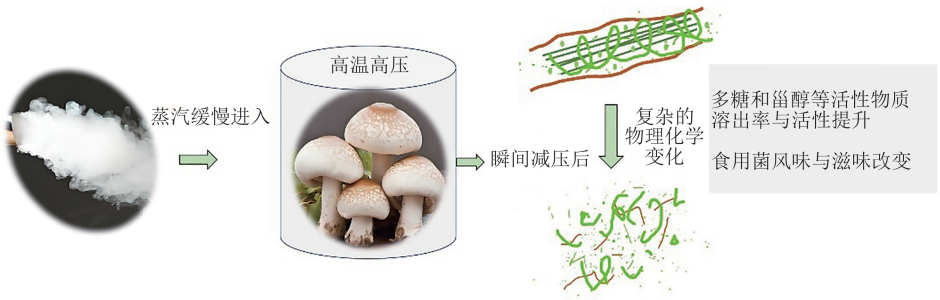


图 3　蒸汽爆破技术对食用菌风味和滋味的影响

Fig. 3　Effects of steam explosion technology on the flavor and taste characteristics of edible mushroom

3.4　蒸汽爆破技术在食用菌副产物高值化利用中的应用

3.4.1　助力食用菌菇脚的高值化利用

食用菌根茎等副产物是膳食纤维改性的主要研究对象。研究人员已将蒸汽爆破技术应用于银耳茎、香菇茎、金针菇根、鬼笔鹅膏等副产物的改性研究中，为食用菌产业的绿色发展和膳食纤维的开发提供了新方法。该技术通过破坏植物细胞壁结构，可显著提高膳食纤维提取率，如经工艺优化后，银耳蒂头和鬼笔鹅膏中可溶性膳食纤维提取率分别提高了 1.42 倍[49]和 1.52 倍[50]；同时还能改善膳食纤维的功能特性，如改善银耳蒂头可溶性膳食纤维比表面积和热稳定性，其中保水性、吸油性、膨胀能力分别提高了 1.23 倍、1.59 倍和 1.24 倍，降糖能力增强了 1.84 倍[49]。此外，蒸汽爆破还可用于开发膳食纤维基质复合物，如香菇茎膳食纤维与茶多酚复合物可增强对脂肪酸、胆固醇和胆酸盐的吸附能力[51]。在医疗保健领域，经蒸汽爆破处理的金针菇根膳食纤维可降低高脂小鼠体质量、改善血脂与肝功能[44]；类似的生理活性在苦荞麸皮膳食纤维延缓血糖升高中也得到了验证[52]。但蒸汽爆破在菇脚高值化利用方面仍存在不足，针对不同种类食用菌菇脚膳食纤维的定向改性研究仍相对较少，且不同蒸汽爆破参数对菇脚膳食纤维理化性质与功能特性的影响尚不明确。未来需在不同菇脚上开展系统性改性研究，探究膳食纤维结构、功能与蒸汽爆破参数之间的关联，进一步优化改性工艺。

3.4.2　改进食用菌废弃基质处理方式

蒸汽爆破技术显著提升了废弃食用菌基质在生物能源和材料领域的应用价值。在香菇废弃基质的乙醇转化提取试验中，蒸汽爆破与发酵技术联用可使乙醇质量浓度达 23.8 g/L，转化率达 87.6%[53]；在金针菇菌糠发酵沼气试验中，蒸汽爆破预处理强度越高，基质的水解速率和产气率也越高[54]。该技术与热压技术联用可制备坚固防水的复合材料，该联用技术能增大纤维表面积、破坏木质纤维素结构，为后续加工创造有利条件[55]。这些研究结果证实了蒸汽爆破技术在提升能源转化效率和材料性能方面的有效性。蒸汽爆破技术为废弃基质处理提供了新方向，兼具提升经济价值与推动绿色发展的双重优势，尤其适合农业废弃物的大批量处理。但目前其应用潜力尚未被充分重视，处理模式也较为单一。未来需进一步拓展菌渣高值化利用途径，研发适配的专用设备与差异化工艺，并加强其在新能源、新材料及农业领域的应用，推动相关产业的绿色可持续发展。

4　展望

为推动食用菌全产业链减损增效，可借助蒸

汽爆破技术实现食用菌高值化种植、精深产品开发与副产物高值化利用，进而提升生态与经济效益。目前，该技术已单独或与其他技术联用，在活性物质提取、膳食纤维改性、栽培基质改性与回收等环节发挥关键作用，既能增加多糖等活性物质的溶出，促进风味物质等成分的释放，在功能食品与医疗产品开发方面潜力巨大；又能改性膳食纤维，推动行业绿色发展。

但该技术在食用菌产业中的应用仍处于初步探索阶段，当前热点多集中于多糖等活性物质提取，对栽培基质改性及副产物高值化利用的关注不足，未来需重点聚焦这两大领域。此外，推动该技术从实验室走向产业化应用并实现技术创新，需解决三大共性问题：一是蒸汽爆破参数缺乏普适性标准，由于受物料种类、成分及部位等多种因素影响，尚未建立全场景参数分析模型，从业人员难以获得可靠参考依据；二是对爆破产物的构效关系认知不足，关于爆破产物物理化学性质与功能活性之间关联的研究相对薄弱，难以定向调控特定功能产物的生成；三是经济性与规模化验证不足，现有研究多基于实验室或传统设备开展，未在实际生产环境或专业设备中进行充分验证，其能耗、成本与效益仍需进行综合评估。

参考文献

[1] LUO J H, CHEN L J. Status and development of spent mushroom substrate recycling: a review[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2024, 74(12): 843-860.

[2] 李平英，葛颜祥，张化楠. 食用菌产业发展：从农业时代到数智化时代[J]. 山东农业大学学报(社会科学版)，2025，27(1)：70-75，173.
LI P Y, GE Y X, ZHANG H N. Development of edible fungi industry: from the agricultural era to the digital age [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Social Science Edition), 2025, 27(1): 70-75, 173. (in Chinese)

[3] BALAN V, ZHU W H, KRISHNAMOORTHY H, et al. Challenges and opportunities in producing high-quality edible mushrooms from lignocellulosic biomass in a small scale[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2022, 106(4): 1355-1374.

[4] DONG Y T, MIAO R Y, FENG R C, et al. Edible and medicinal fungi breeding techniques, a review: current status and future prospects[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 2070-2080.

[5] SOUSA A S, ARAÚJO-RODRIGUES H, PINTADO M E. The health-promoting potential of edible mushroom proteins [J]. Current Pharmaceutical Design, 2023, 29(11): 804-823.

[6] 武文璇，于贤龙，李青，等. 食用菌精深加工现状及发展对策研究[J]. 农业装备与车辆工程，2024，62(9)：9-13.
WU W X, YU X L, LI Q, et al. The current status and development countermeasures of edible fungi intensive processing[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2024, 62(9): 9-13. (in Chinese)

[7] MA G X, YANG W J, MARIGA A M, et al. Purification, characterization and antitumor activity of polysaccharides from *Pleurotus eryngii* residue[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 114: 297-305.

[8] ANTUNES F, MARÇAL S, TAOFIQ O, et al. Valorization of mushroom by-products as a source of value-added compounds and potential applications [J]. Molecules, 2020, 25(11): 2672.

[9] 赵鹏成，易军鹏，李欣，等. 花生壳木犀草素蒸汽爆破预处理工艺优化及结构分析[J]. 食品与机械，2019，35(7)：181-186，192.
ZHAO P C, YI J P, LI X, et al. Optimization of steam explosion pretreatment of peanut shell and its effect on physicochemical properties of luteolin[J]. Food & Machinery, 2019, 35(7): 181-186, 192. (in Chinese)

[10] 李必琼，尹和山，魏显威. 油茶壳制备食用菌栽培基质方法：CN111972214A[P]. 2020-11-24.

[11] 张晓瑾. 食用菌绿色高产种植关键技术研究[J]. 种子科技，2024，42(14)：82-84.
ZHANG X J. Study on key techniques of green and high-yield cultivation of edible fungi[J]. Seed Science & Technology, 2024, 42(14): 82-84. (in Chinese)

[12] 范祺，张博华，王丽，等. 蒸汽爆破对瓦尼桑黄子实体多糖提取及降血糖功效影响[J]. 食品研究与开发，2024，45(7)：150-157.
FAN Q, ZHANG B H, WANG L, et al. Effect of steam explosion on the extraction of polysaccharide from *Sanghuangporus vaninii* fruiting body and its hypoglycemic efficacy[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 150-157. (in Chinese)

[13] WANG C R, LIN M F, YANG Q Y, et al. The principle of steam explosion technology and its application in food processing by-products[J]. Foods, 2023, 12(17): 3307.

[14] 王晶，匡楚玉，夏智慧，等. 蒸汽爆破燕麦体外消化特性及其对高脂诱导小鼠肥胖的影响[J]. 食品与机械，2025，41(5)：121-126.
WANG J, KUANG C Y, XIA Z H, et al. *In vitro* digestion characteristics of steam-exploded oats and their effects on obesity induced by high-fat diet in mice[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 121-126. (in Chinese)

[15] INSEEMEESAK B, AREEPRASERT C. Fiber extraction and energy recovery from *Cocos nucifera* Linn mesocarp residues employing steam explosion and anaerobic digestion

[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 147: 112180.

[16] ZIEGLER-DEVIN I, CHRUSCIEL L, BROSSE N. Steam explosion pretreatment of lignocellulosic biomass: a mini-review of theorical and experimental approaches [J]. Frontiers in Chemistry, 2021, 9: 705358.

[17] 孙金淏,焦文雅,吴超,等. 蒸汽爆破对膳食纤维的影响及应用研究进展[J]. 食品工业科技,2023,44(20):449-457.
SUN J H, JIAO W Y, WU C, et al. Research progress in the effect of steam explosion on dietary fiber and its application [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 449-457. (in Chinese)

[18] 张博华,张明,范祺,等. 蒸汽爆破超声波复合提取灵芝多糖及抗氧化活性[J]. 食品工业,2021,42(8):125-129.
ZHANG B H, ZHANG M, FAN Q, et al. Extraction of polysaccharide from *Ganoderma lucidum* and its antioxidant activity by steam explosion combined with ultrasonic [J]. The Food Industry, 2021, 42(8): 125-129. (in Chinese)

[19] 倪立颖,胡付侠,孙梦雪,等. 蒸汽爆破预处理金针菇菇脚多糖提取工艺优化及其抗炎活性[J]. 食品科技,2025,50(3):190-198.
NI L Y, HU F X, SUN M X, et al. Optimization of extraction process and anti-inflammatory activity of polysaccharide from *Flammulina velutipes* mycorrhizae with steam explosion pretreatment[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(3): 190-198. (in Chinese)

[20] ZHANG Y P, YANG R J, ZHAO W, et al. Application of high density steam flash-explosion in protein extraction of soybean meal[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2): 430-435.

[21] 石敏. 灵芝蒸汽爆破提取技术的研究及产物安全性评价[D]. 无锡:江南大学,2014.

[22] NODA Y, ASADA C, SASAKI C, et al. Extraction method for increasing antioxidant activity of raw garlic using steam explosion [J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, 73: 1-4.

[23] 匡凤姣,康宗华,蒋富强,等. 槟榔粉及其制备方法与应用、槟榔培养基及其应用:CN115500207A[P]. 2022-12-23.

[24] 侯晨,彭宇涛,张谦,等. 一种基于龙脑型阴香残渣栽培食用菌的方法:CN119422769A[P]. 2025-02-14.

[25] 王香君,殷浩,蒲军,等. DNJ高保留和高营养价值的桑枝食用菌栽培料及其制备方法:CN117770061B[P]. 2024-09-06.

[26] 沈宇健,张蕾,景思佳,等. 蒸汽爆破预处理对樟芝液体培养的影响[J]. 浙江林业科技,2019,39(4):9-16.
SHEN Y J, ZHANG L, JING S J, et al. Effect of steam explosion of *Cinnamomum bodinieri* branch on liquid culture of *Ganoderma camphoratum* [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2019, 39(4): 9-16. (in Chinese)

[27] 苏洪泉,薛红梅,孟浩然. 一种用高粱米制备食用菌培养料的方法:CN106747924A[P]. 2017-05-31.

[28] 李志和,张丽,李鑫,等. 培养基组成对里氏木霉合成纤维素酶的影响[J]. 林产化学与工业,2011,31(3):55-59.
LI Z H, ZHANG L, LI X, et al. Effect of medium components on cellulase production by *Trichoderma reesei* [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2011, 31(3): 55-59. (in Chinese)

[29] 高炯. 一种用于食用菌栽培的秸秆砖及其制备方法:CN107540276B[P]. 2020-09-11.

[30] SUWANNARACH N, KUMLA J, ZHAO Y, et al. Impact of cultivation substrate and microbial community on improving mushroom productivity: a review [J]. Biology, 2022, 11(4): 569.

[31] 赵光辉,方洪枫,陈剑,等. 平菇栽培技术发展与栽培原料消毒、灭菌技术的创新[J]. 食药用菌,2019,27(2):122-124.
ZHAO G H, FANG H F, CHEN J, et al. Development of cultivation technique of *Pleurotus ostreatus* and technical innovation of substrate disinfection and sterilization[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2019, 27(2): 122-124. (in Chinese)

[32] 吴晟峣,叶子坤,谢唯祎,等. 可食用真菌多糖对鼠李糖乳酪杆菌GG增殖及代谢的影响[J]. 食品与生物技术学报,2025,44(5):87-94.
WU S Y, YE Z K, XIE W Y, et al. Effects of edible fungal polysaccharides on the proliferation and metabolism of *Lactobacillus rhamnosus* GG[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2025, 44(5): 87-94. (in Chinese)

[33] 裴龙英,刘伟,王思丹,等. 低共熔溶剂在食用菌多糖提取中的应用研究进展[J]. 食品与机械,2025,41(5):198-206.
PEI L Y, LIU W, WANG S D, et al. Research progress on deep eutectic solvents in extraction of polysaccharides from edible mushrooms[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 198-206. (in Chinese)

[34] 梁结桦,杜冰. 蒸汽爆破茯苓多糖提取工艺优化[J]. 粮食与油脂,2021,34(12):73-77.
LIANG J H, DU B. Optimization of extraction process of *Poria cocos* polysaccharide by steam explosion [J]. Cereals & Oils, 2021, 34(12): 73-77. (in Chinese)

[35] 乔洁,牛小庆,张旭,等. 蒸汽爆破处理对香菇成分及香菇蛋糕品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报,2018,9(17):4681-4685.
QIAO J, NIU X Q, ZHANG X, et al. Effect of steam explosion treatment on *Letinous edodes* components and *Letinous edodes* cake [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(17): 4681-4685. (in Chinese)

[36] 罗羽,刘利平,冯杰,等. 不同预处理对荷叶离褶伞水提

残渣多糖理化性质及免疫活性的影响[J]. 食用菌学报，2024，31(4)：75-84.
LUO Y，LIU L P，FENG J，et al. Effects of different pretreatment methods on physicochemical properties and immunomodulatory activity of polysaccharides from water extraction residue of *Lyophyllum decastes* [J]. Acta Edulis Fungi，2024，31(4)：75-84.(in Chinese)
[37] 郑培英. 食用菌多糖高效提取及复合多糖缓解体力疲劳活性研究[D]. 福州：福建农林大学，2024.
[38] QIANG Y Y，HE M Y，ZHANG S Y，et al. Pressure-controlled steam explosion as pretreatment for efficient extraction of *Tremella fuciformis* polysaccharide：structure and bioactivity[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，280(2)：135766.
[39] HUANG Z R，QIANG Y Y，ZHANG S Y，et al. Steam explosion pretreatment of polysaccharide from *Hypsizygus marmoreus*：structure and antioxidant activity[J]. Foods，2024，13(13)：2086.
[40] QIU J Q，ZHENG P Y，DAI W Z，et al. Steam explosion-assisted extraction of polysaccharides from *Pleurotus eryngii* and its influence on structural characteristics and antioxidant activity[J]. Foods，2024，13(8)：1229.
[41] 张明，熊永星，孟晓峰，等. 蒸汽爆破耦合超微粉碎技术对灵芝子实体粉体品质及理化特性的影响[J]. 食品科技，2021，46(12)：69-76.
ZHANG M，XIONG Y X，MENG X F，et al. Effect of steam explosion coupled ultrafine grinding technology on the powder quality and physical and chemical properties of *Ganoderma lucidum* fruit body[J]. Food Science and Technology，2021，46(12)：69-76.(in Chinese)
[42] RANGSINTH P，SHARIKA R，PATTARACHOTANANT N，et al. Potential beneficial effects and pharmacological properties of ergosterol，a common bioactive compound in edible mushrooms[J]. Foods，2023，12(13)：2529.
[43] 张新月，陈杭君，牛犇，等. UPLC-MS/MS柱前衍生对食用菌中麦角甾醇含量的影响[J]. 食品与机械，2025，41(6)：36-43.
ZHANG X Y，CHEN H J，NIU B，et al. Effect of UPLC-MS/MS pre-column derivatization on ergosterol content in edible fungi[J]. Food & Machinery，2025，41(6)：36-43.(in Chinese)
[44] LIU W X，NIU J H，HAN F M，et al. Steam explosion-assisted extraction of ergosterol and polysaccharides from *Flammulina velutipes*（golden needle mushroom）root waste[J]. Foods，2024，13(12)：1860.
[45] 班鑫荣，杨焱，李文，等. 纳米粉碎对3种食用菌风味特征及减盐增鲜效果的影响[J]. 食品与机械，2024，40(1)：23-32，39.
BAN X R，YANG Y，LI W，et al. Effect of flavor characteristics and salt reduction and flavor enhancement of three edible fungi by nano-pulverization[J]. Food & Machinery，2024，40(1)：23-32，39.(in Chinese)
[46] 孙梦雪，倪立颖，黄裕鸿，等. 蒸汽爆破处理对金针菇菇脚游离氨基酸及挥发性风味成分的影响[J]. 中国果菜，2023，43(8)：34-41.
SUN M X，NI L Y，HUANG Y H，et al. Effects of steam explosion on free amino acids and flavor components of *Flammulina velutipes* stembase[J]. China Fruit & Vegetable，2023，43(8)：34-41.(in Chinese)
[47] 李迎秋，孙桂金，邢树静，等. 一种固体食用菌增鲜调味品及其制备方法：CN117796516B[P]. 2025-03-21.
[48] LIU T T，DING K L，ZHOU X Y，et al. Steam explosion pretreatment of soy sauce residue for improving the soybean paste flavor[J]. LWT-Journal of Food Science and Technology，2021，149：111914.
[49] WANG C R，LIN M F，LI Y B，et al. Improvement of soluble dietary fiber quality in *Tremella fuciformis* stem by steam explosion technology：an evaluation of structure and function[J]. Food Chemistry，2024，437(1)：137867.
[50] LIN M F，WANG C R，WU W F，et al. Quality，improvement of soluble dietary fiber from *Dictyophora indusiata* by-products by steam explosion and cellulase modification：structural and functional analysis[J]. Food Chemistry，2024，25：102084.
[51] CHEN H，LIU X L，LIU J Y，et al. Study on the structure and adsorption characteristics of the complex of modified *Lentinus edodes* stalks dietary fiber and tea polyphenol [J]. Food Chemistry，2025，468：142321.
[52] 何晓琴，李苇舟，夏晓霞，等. 蒸汽爆破预处理的苦荞麸皮不溶性膳食纤维理化特性及结构研究[J]. 食品与发酵工业，2020，46(18)：47-53.
HE X Q，LI W Z，XIA X X，et al. Study on physicochemical properties and structure of insoluble dietary fiber from *Tartary buckwheat* bran pretreated by steam explosion[J]. Food and Fermentation Industries，2020，46(18)：47-53.(in Chinese)
[53] ASADA C，ASAKAWA A，SASAKI C，et al. Characterization of the steam-exploded spent Lentinus edodes mushroom medium and its efficient conversion to ethanol[J]. Bioresource Technology，2011，102(21)：10052-10056.
[54] 王星. 预处理对水稻秸秆/金针菇菌糠产沼气的影响研究[D]. 北京：中国农业科学院，2017.
[55] WANG Z X，LI J M，WANG P P，et al. Steam explosion-treated mushroom substrate for robust and water-resistant wood composites [J]. Sustainable Materials and Technologies，2024，40：e00992.

（责任编辑：刘冬梅）