

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250428002

引用格式: 毛雪, 赵明, 李婷, 等. 食用菌液体发酵工艺及活性成分应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 195–202.

MAO X, ZHAO M, LI T, *et al.* Research progress in liquid fermentation technology and application of bioactive components in edible fungi [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 195–202. (in Chinese with English abstract).

食用菌液体发酵工艺及活性成分应用研究进展

毛雪, 赵明, 李婷, 刘煜, 孔祥辉*, 叶阳*

(黑龙江省科学院微生物研究所, 哈尔滨 150010)

摘要: 液体发酵技术自20世纪中期起便受到了广泛关注, 并随着生物技术的发展不断进步。液体发酵法的优势体现在其能够缩短培养周期、提高菌种活性和纯度、降低生产成本等方面。食用菌液体发酵技术作为液体发酵技术的重要组成部分, 可通过优化培养基组分、发酵参数与代谢调控途径, 实现菌丝体与活性代谢产物的高效生产。本文综述了食用菌液体发酵技术的研究进展, 重点探讨了该技术在生产过程中的优势、挑战及应用前景。通过液体发酵, 不仅能够提高食用菌菌丝体的生产效率, 还能有效提取具有生物活性的成分, 如多糖、萜类化合物、多肽等, 这些成分具有抗肿瘤、抗氧化、免疫调节等多种生物学活性, 对食品和医药产业具有重要意义。此外, 食用菌液体发酵技术在生产菌类代谢产物和风味物质方面的应用也展现出显著潜力, 为食品行业提供了丰富的天然成分。本文结合当前的研究成果, 分析了液体发酵技术在食用菌产业中的关键因素、发展趋势和面临的主要挑战, 并展望了该技术在食品、药品等领域的应用方向和前景。为高效生产菌丝体及活性代谢产物方面提供理论参考, 助力食用菌液体发酵在各领域的转化应用。

关键词: 食用菌; 液体发酵; 代谢产物; 多糖; 萜类化合物

Research progress in liquid fermentation technology and application of bioactive components in edible fungi

MAO Xue, ZHAO Ming, LI Ting, LIU Yu, KONG Xiang-Hui*, YE Yang*

(Institute of Microbiology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150010, China)

ABSTRACT: Liquid fermentation technology has garnered significant attention since the mid-20th century and continued to advance with the evolution of biotechnology. Its advantages lie in shortening culture cycles, enhancing strain activity and purity, and reducing production costs, among other benefits. As a critical component of liquid fermentation technology, edible fungus liquid fermentation enables efficient production of mycelium and bioactive metabolites through optimization of medium components, fermentation parameters and metabolic regulation pathways. This paper reviewed the research progress of edible fungus liquid fermentation technology, with a focus on its advantages, challenges and application prospects in production processes. Through liquid fermentation, not only

收稿日期: 2025-04-28

基金项目: 2025 省财政厅-省属科研院所业务费项目(CZKYF2025-1-C030)

第一作者: 毛雪(1990—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为食药菌精深加工。E-mail: mx45792027@163.com

*通信作者: 孔祥辉(1971—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为食药菌精深加工。E-mail: kxh29@126.com

叶阳(1987—), 女, 副研究员, 主要研究方向为科技管理。E-mail: 89705261@qq.com

can the production efficiency of edible fungus mycelium be improved, but also bioactive components such as polysaccharides, terpenoids and peptides can be effectively extracted. These components possess diverse biological activities, including anti-tumor, antioxidant and immunomodulatory effects, holding significant importance for the food and pharmaceutical industries. In addition, the application of liquid fermentation technology for edible fungi in producing fungal metabolites and flavor substances has also demonstrated remarkable potential, providing the food industry with abundant natural ingredients. Based on current research achievements, this paper analyzed the key factors, development trends and major challenges faced by liquid fermentation technology in the edible fungi industry, and prospected the application directions and prospects of this technology in food, pharmaceuticals, and other fields. This review provides a theoretical reference for the efficient production of mycelia and active metabolites, and facilitates the translational application of edible fungus liquid fermentation in various fields.

KEY WORDS: edible fungi; liquid fermentation; metabolites; polysaccharides; terpenoids

0 引言

食用菌指子实体硕大、可供食用的蕈菌(大型真菌),能够形成大型肉质或胶质子实体或菌核类组织,可供食用或药用。从分类学角度看,多数属于菌物界真菌门,主要是担子菌亚门(如平菇、香菇),少数属于子囊菌亚门(如羊肚菌)^[1]。目前人工培养的食药菌有 60 多种,其中 25 种已实现商业化生产。食用菌富含蛋白质、氨基酸、矿物质、维生素和膳食纤维,蛋白质含量高,氨基酸组成合理,包含了人体不能自身合成的必需氨基酸,提供优质营养,长期以来被视为功能性和营养性饮食^[2]。

液体发酵技术随着抗生素工业的兴起而发展,食用菌液体发酵技术起源于美国。1947 年, HUMDELD 利用深层发酵法获得蘑菇菌丝体,并成功筛选出适合液体培养的蘑菇菌株,这一成果推动了食用菌发酵生产的全球普及。1958 年, SZUECS 在发酵罐内培养出羊肚菌。1975 年,日本的杉森恒武等用有机酸和酵母膏作为培养基,获取大量香菇菌丝体,标志着食用菌培植从农业生产迈向工业生产领域^[3-4]。我国至 60 年代末期,已能大规模采用液体发酵法生产食用菌。食用菌液体发酵技术仍在不断发展和完善,在食品、医药等领域发挥着重要作用。

近年来,食用菌液体培养技术在国内外得到广泛关注和研究。随着生物技术的不断进步,液体发酵技术在食用菌生产中的应用逐渐成熟,并展现出显著的优势^[5]。食用菌液体培养技术的研究主要集中在风味物质和代谢产物的提取上,液体菌种的生产不仅能够提高菌种的纯度和活力,还能缩短培养时间,降低生产成本。例如,通过液体发酵技术,研究人员从香菇、平菇等食用菌中提取出具有独特风味的化合物,这些化合物在食品工业中具有广泛的应用前景^[6]。液体发酵产物主要由菌丝体和胞外液构成,其中富含多种功能性成分,如多肽、多糖、萜类化合物、甾醇、核酸、氨基酸、维生素以及抗生素等,这些成分大多源自药用真菌^[7]。目前,多糖、萜类化合物、多肽、黄酮

等成分已受到广泛关注并开展了大量研究。它们具有多种生物学活性,包括免疫调节功能,抗肿瘤、抗病毒、抗氧化和抗衰老能力,此外,还具备降血糖、降脂等功效,对预防和改善代谢性疾病意义重大^[8]。可以预见,随着对液体发酵技术研究的持续深入,未来将会有更多基于此技术的食用菌产品产业化落地,为食品、医药等相关产业带来更为深刻的变革与发展。

本文全面梳理了食用菌液体发酵技术的现有研究进展及面临的主要难题,深入探讨了食用菌液体发酵产物的关键成分及其功效,旨在为食用菌液体发酵技术的实践应用与广泛推广提供有益参考。

1 食用菌液体发酵关键因素分析

食用菌液体培养,又称液体发酵或深层发酵。其主要原理是在发酵罐或三角瓶中加入液体培养基,通入无菌空气以增加培养基中溶氧含量,提供食用菌菌丝体呼吸代谢所需要的氧气,同时进行搅拌或振荡,并控制适宜的外界条件,使菌体在液体深层繁殖发育,获得大量菌丝体或代谢产物^[9]。实验室中的液体发酵可以使微生物迅速生长繁殖,获得大量培养物。液体发酵有静置培养和通气培养两种类型。静置培养适于厌氧菌发酵,如酒精、丙酮、丁醇、乳酸等发酵。通气发酵适于好氧菌发酵,如抗生素、氨基酸、核苷酸等发酵^[10-11]。

液体发酵受物质浓度、接种量、培养基成分、温度、pH、需氧量和发酵时间等条件的制约。培养基中的营养物质浓度直接影响菌体的生长和代谢产物的合成,过高的浓度可能导致底物抑制,而过低的浓度则可能限制菌体的生长^[12]。因此,需要优化培养基中碳源、氮源、无机盐等成分。培养基的成分是影响菌体生长和代谢产物合成的关键因素。不同食用菌对碳源、氮源、维生素、矿物质等营养物质的需求不同。葡萄糖和蔗糖是常用的碳源,而酵母提取物和蛋白胨是常用的氮源。优化培养基成分可以提高菌体生长速度和代谢产物的产量^[13]。韩冰等^[14]对香菇

液体发酵条件进行了研究, 发现以黄豆饼粉为氮源, 葡萄糖为碳源时, 香菇液体发酵菌丝体产量较高。冷悦等^[15]研究发现, 葡萄糖与红糖两种碳源会影响猴头菇的营养生长及代谢产物的分泌。曾桂萍等^[16]研究了茯苓菌液体培养的工艺, 发现向培养基中添加黄豆粉和木屑能增加菌丝体量和三萜含量。无机盐、微量元素和生长因子对维持菌丝体生长和繁殖也至关重要。灵芝在生长过程中体内无法合成维生素 B, 需外源补充^[17]。郑世仲等^[18]在蛹虫草液体培养基中加入腺苷、腺嘌呤、丙氨酸、甘氨酸、L-天冬氨酸 5 种营养因子, 显著提高了虫草素的产量, 特别是腺嘌呤, 提高了 7.0 倍。

接种量是指接种到培养基中的菌体量, 适宜的接种量可以缩短菌体的延滞期, 加快发酵进程。接种量过少可能导致发酵周期延长, 而接种量过多则可能引起营养物质的快速消耗, 进而影响菌体的后期生长, 食用菌液体发酵的接种量一般在 5%~20%之间^[19]。茯苓菌液体发酵中, 接种量为 6%时, pH 5.0, 均能促进菌丝生长和三萜合成^[20]。温度是影响菌体生长和代谢活动的重要环境因素, 不同食用菌对温度的需求不同, 通常在 25 °C 至 30 °C 之间。温度过高可能导致菌体蛋白质变性, 温度过低则可能抑制菌体的代谢活动^[21]。崔月花等^[22]采用分阶段温度管理发酵过程, 使桑黄菌丝的生长速率和胞外多糖的产量分别增长了 58.8%和 12.7%。

pH 影响菌体的酶活性和细胞膜的稳定性, 不同食用菌对 pH 的需求不同, 通常在 5.0~7.0 之间。在发酵过程中, 菌体的代谢活动可能会改变培养基的 pH, 因此需要通过添加缓冲剂或酸碱调节剂来维持适宜的 pH^[23]。魏雅冬等^[24]

研究了香菇液体发酵的培养条件, 发现香菇液体发酵的适宜温度为 25 °C, 250 mL 锥形瓶装液量为 100 mL, 培养基初始 pH 为 5.5。潘江安等^[25]探究不同 pH 控制对提高灵芝深层发酵及合成三萜能力的影响, 结果表明, 在 pH 4.5 条件下, 三萜含量最大为 237.9 mg/L, 提高了 25.7%。

对于好氧菌的液体发酵, 氧气的供应至关重要, 溶氧量的不足会限制菌体的呼吸代谢, 从而影响菌体生长和代谢产物的合成。通过调节通气量、搅拌速度或使用氧气富集技术, 可以提高培养基中的溶氧量^[26]。灰树花深层发酵进程中, 通气量为 0.5、0.75、1.0 vvm 时, 菌丝体量和胞外多糖得率呈现出不同的变化趋势。其中, 1.0 vvm 通气量下菌丝体生长更为充分, 不过胞外多糖得率并非在该通气量下达到最高。这说明不同食用菌在发酵的各个阶段以及针对不同代谢产物的合成, 对溶氧量有着差异化的需求^[27]。发酵时间的长短直接影响代谢产物的积累, 发酵时间过短可能导致代谢产物产量不足, 而发酵时间过长则可能引起菌体自溶或代谢产物的降解, 因此, 需要根据菌体生长曲线和代谢产物合成动力学确定最佳发酵时间。邹瑞龙等^[28]对大球盖菇液体培养基的筛选及发酵条件进行了优化, 最佳发酵条件是初始 pH 7.5、摇床转速为 120 r/min、CMC-Na 质量浓度为 6 g/L、温度 26 °C 条件下培养 6 d。

液体发酵受物质浓度、接种量、培养基成分等多条件约束, 不同食用菌对营养需求各异, 温度、pH、溶氧量、发酵时间也影响发酵进程与结果。表 1 对常见食用菌的液体发酵条件及研究结果进行总结, 剖析液体发酵关键因素对食用菌生长及活性成分积累的影响, 为优化发酵工艺提供依据。

表 1 常见食用菌液体发酵条件
Table 1 Liquid fermentation conditions for common edible fungi

菌种	食用菌液体发酵条件	研究结果	参考文献
灵芝	葡萄糖 5%、玉米浆 0.3%、豆饼粉 1.0%、KH ₂ PO ₄ · 3H ₂ O 0.15%、MgSO ₄ · 7 H ₂ O 0.075%, 温度 28 °C, pH 6.5, 搅拌转速 150~200 r/min, 通风量 3~5 L/min	灵芝多糖最高产量 2.91 g/L	[29]
香菇	玉米粉 25 g/L、黄豆粉 10 g/L、MgSO ₄ 4 g/L, 温度 25 °C, pH 5.5	菌丝体生物量 35.613 mg/mL	[30]
姬松茸	麸皮 5%、蔗糖 1%、葡萄糖 1%、蛋白胨 0.2%、豆粕 1.5%、KH ₂ PO ₄ 0.2%、MgSO ₄ · 7H ₂ O 0.1%, 温度 25 °C, pH 6.0	提高生物量至 8.576 g/L	[31]
蛹虫草	葡萄糖 20 g/L、蛋白胨 10 g/L、KH ₂ PO ₄ 1.0 g/L、MgSO ₄ 1.0 g/L, pH 7.0, 温度 25 °C, 转速 180 r/min, 发酵周期 6 d	菌丝体干重可达 40~45 g/L, 虫草素产量随培养基调整可达 0.28 g/(L · h)	[32]
桑黄	黄豆粉 40 g/L、玉米粉 30 g/L、小麦麸粉 5 g/L、酵母浸出汁 4 g/L、CaSO ₄ 10 g/L、K ₂ SO ₄ 1 g/L、Na ₂ HPO ₄ 1.5 g/L、ZnSO ₄ · 7H ₂ O 0.1 g/L、FeSO ₄ · 7H ₂ O 0.5 g/L、维生素 B ₁ 0.1 g/L, pH 6.5、温度 28 °C、转速 180 r/min、发酵周期 7 d	菌丝体干重可达 30~35 g/L, 多糖含量随培养基优化可提升至 12%~15%	[33]
猴头菇	马铃薯 200 g 煎汁(1 L)、葡萄糖 20 g/L、磷酸二氢钾 1 g/L、硫酸镁 0.5 g/L, pH 4.0, 温度 25 °C, 转速为 150~170 r/min	提升多糖产量达 9.24%	[34]
桦褐孔菌	酵母粉 18.70 g/L、小麦淀粉水解糖 100 g/L、玉米浆 11.0 g/L、MgSO ₄ 1.5 g/L、KH ₂ PO ₄ 4.59 g/L, pH 6.0, 转速 160 r/min, 温度 30 °C	菌丝体量为 19.80 g/L	[35]

2 食用菌液体发酵技术的优势

2.1 高效性

与传统的人工培养和固体发酵技术相比,液体发酵发菌速度快,生长周期短,菌龄一致,菌体活力好,在较短的时间内获得大量的菌丝体,从而提高了生产效率^[36]。

2.2 可控性

液体发酵技术提供了对菌丝体生长环境进行精确控制的能力。通过调节培养基的成分、温度、pH、溶氧量等参数,实现对菌丝体生长环境的精确控制,这种可控性不仅能够提高菌丝体的产量,还能优化菌丝体的代谢产物组成,可以促进特定代谢产物的生成,从而提高产品的功能性和附加值^[37]。

2.3 产物多样性

液体发酵技术能够产生多种活性物质,包括蛋白质、多肽、多糖、维生素、氨基酸、萜类化合物、甾醇、核酸等。这些活性物质在医药、保健品和食品添加剂等领域具有广泛的应用前景^[38]。液体发酵产品中的重金属含量极低,在健康产品开发方面具有极大的优势,且培养基原料来源广泛,价格低廉,不受季节限制,易于实现规模化生产。

2.4 规模化生产

液体培养技术易于实现规模化生产,通过使用大型发酵罐进行液体发酵,可以在大规模工业化生产中保持高效、稳定的生产流程^[39]。规模化生产还能够提高产品的一致性和质量稳定性,增强市场竞争力。同时,通过规模化生产,可以实现产品的大批量供应,满足市场需求,进一步提升企业的经济效益和市场占有率。

3 食用菌液体发酵中活性产物研究进展

基于液体深层发酵技术,通过精准调控培养基组成、发酵动力学参数及代谢流导向策略,可实现食用菌菌丝体及其胞外代谢产物的定向富集。包括多糖、三萜类、多酚、蛋白质、核酸及酶类等活性物质。其中,灵芝多糖可通过激活 TLR4/NF- κ B 信号通路增强巨噬细胞吞噬活性,并协同 CD4⁺/CD8⁺T 淋巴细胞增殖以改善机体免疫应答^[40]。云芝多糖则通过下调 Bcl-2 蛋白表达、激活 Caspase-3 级联反应诱导肿瘤细胞程序性凋亡^[41]。发酵液中的多酚类物质(如邻苯二酚衍生物)与萜烯类次生代谢产物(如灵芝酸 A)通过电子转移机制清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基及羟自由基,其半抑制浓度显著低于常规合成抗氧化剂,在延缓动脉粥样硬化及神经退行性疾病方面具潜在应用价值^[42]。发酵体系内源性功能酶(纤维素酶、漆酶等)可协同作用于食品基质:漆酶通过酚类物质交联改善蛋白凝胶特性,而

纤维素酶则降解植物细胞壁 β -1,4 糖苷键,提升可溶性膳食纤维得率(提升率达 23.6%)^[43]。此外,发酵衍生的小分子活性物质(如大豆苷元代谢产物 S-equal)可通过竞争性抑制 3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 还原酶,阻断甲羟戊酸通路以降低血清总胆固醇水平,同时激活 eNOS/NO 通路改善血管内皮功能,为功能性食品开发提供分子机制依据^[44]。

3.1 食用菌液体发酵多糖研究进展

多糖是食用菌液体发酵产物中最具代表性的活性成分,包括胞内多糖和胞外多糖。由于多糖的存在形式不同,其提取和分离的策略也有所差异。对于菌丝体中的多糖,需要先进行细胞破碎处理,以打破细胞壁的束缚,使多糖释放到溶液中。对于胞外液中的多糖,相对提取过程较为简单,通常可先通过离心或过滤等方式去除发酵液中的菌体和其他固体杂质。目前常用的方法包括水提醇沉法、酶辅助提取法、超声辅助提取法和微波辅助提取法等。通过优化碳源(如葡萄糖、蔗糖)和氮源(如酵母粉、蛋白胨)的配比,可显著提高食用菌液体发酵多糖的产量^[45]。灵芝液体发酵中,葡萄糖质量浓度为 20 g/L 时胞内多糖产量达 1.12 g/L,而添加金属离子(如 Fe²⁺)或外源物质(如 Tween-80)可进一步提升多糖浓度^[46]。贾娇等^[47]优化大球盖菇液体发酵培养基,菌丝体生物量和胞外多糖含量分别提高 37.7%和 15.9%。

食用菌发酵液中的多糖结构复杂多样,其单糖组成、糖苷键类型和聚合度等各不相同。这些结构特征决定了多糖具有不同的特性。一般来说,多糖具有良好的水溶性,使其在生物体内能够更容易地被吸收和利用。此外,多糖的分子量大小也会影响其生物活性,通常分子量较大的多糖可能具有更强的免疫调节活性。食用菌多糖主要由葡萄糖、甘露糖和半乳糖等单糖通过糖苷键连接而成,其中, β -葡聚糖是食用菌中最广泛存在的功能多糖,其主链通常由 β -(1 \rightarrow 3)糖苷键连接,支链则通过 β -(1 \rightarrow 6)糖苷键连接,这一构型赋予了其独特的生物活性和功能特性。碳源可能对食用菌多糖的产量和单糖组成有重要影响^[48]。以乳糖为碳源进行食用菌液体发酵时,有利于胞外多糖的产生,且胞内多糖的总产量也有较大幅度提升,以葡萄糖为碳源进行液体发酵时,胞外多糖的主要单糖为葡萄糖、半乳糖和甘露糖。

大量研究表明,食用菌多糖具有免疫调节、抗肿瘤、抗氧化等多种生物活性。例如,灵芝多糖能增强机体免疫力,通过激活免疫细胞,促进细胞因子的分泌,从而发挥免疫调节作用^[49];香菇多糖则在抗肿瘤方面表现突出,可抑制肿瘤细胞的生长和转移。通过对多种食用菌液体发酵多糖的提取和分析,发现不同菌种产生的多糖结构和活性存在差异,这与发酵条件、菌种特性等因素密切相关^[50]。LUO 等^[51]通过优化绣球菇液体发酵条件,不仅提高菌丝

体多糖的含量, 对 3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸阳离子自由基、羟基自由基清除能力具有显著提高。陈嘉鹤^[52]研究了桑黄胞内多糖 (polysaccharide intracellular of *Phellinus igniarius*, PIE) 对肿瘤的抗肿瘤和免疫调节作用, 将肉瘤和肝癌细胞移植到小鼠体内, 结果显示, PIE 能够使被肿瘤细胞抑制的小鼠免疫力得以恢复。由此推断, PIE 的抗肿瘤活性很可能是因为其激发了免疫刺激反应。CHEN 等^[53]把灰树花液体发酵产生的多糖添加至培养基中, 用于体外培养小鼠脾脏细胞, 结果发现, 培养基上清液里免疫球蛋白 G1 (immunoglobulin G1, IgG1) 的含量显著增加。李秋阳^[54]针对香菇液体发酵产生多糖的抗氧化能力研究, 结果发现, 香菇多糖能够显著提升老鼠体内谷胱甘肽的含量, 同时降低老鼠体内像活性氧这类自由基的水平。

3.2 食用菌液体发酵三萜研究进展

在食用菌液体发酵过程中, 三萜类化合物是一类重要的次级代谢产物, 具有丰富的结构多样性和显著的生物活性, 广泛应用于医药和食品等领域。在发酵过程中, 多种因素会影响三萜类物质的产量和种类。碳源和氮源的种类及比例对三萜化合物的合成具有重要影响。适量的葡萄糖作为碳源, 酵母粉、蛋白胨等有机氮源有利于三萜类物质的积累。此外, 发酵温度、pH 以及溶解氧等环境因素同样关键。适宜的温度和 pH 能够维持菌体的正常代谢, 而充足的溶解氧为三萜类物质的合成提供必要条件^[55]。此外, 添加一些前体物质或诱导子, 如甲羟戊酸、茉莉酸甲酯等, 可以在一定程度上提高三萜类物质的产量。不同食用菌所产生的三萜类化合物在结构和活性上存在差异, 这与菌种的遗传特性以及发酵条件密切相关。对食用菌液体发酵中三萜类化合物的深入研究, 有助于进一步开发利用食用菌的生物活性, 推动相关产业的发展^[56]。孟令会^[57]通过液体发酵牛樟芝菌的研究结果表明, 极端低温以及光照周期对其菌丝体的生物量和总三萜含量有显著影响。

三萜类化合物及其糖苷衍生物作为天然活性物质, 在生物医药领域展现出显著的生物活性和多样化的药理效应。尤其在抗肿瘤治疗、病毒抑制、炎症调控及免疫调节等方面, 这类化合物呈现出独特的治疗优势^[58]。液体发酵桑黄产生的总三萜能够破坏结肠癌细胞 Caco-2 的形态, 抑制癌细胞增殖。研究表明, 液体发酵灵芝产生的三萜具有保肝护肝、调节脂质代谢、抑制炎症反应及抗肿瘤等多重生物活性^[59]。现代药理学研究揭示, 该活性成分的抗癌机制主要体现在: 通过阻滞肿瘤细胞周期进程、激活凋亡信号通路以及调控免疫细胞功能等多种途径协同发挥抗肿瘤效应, 其中涉及对 NF- κ B、PI3K/AKT 等关键信号通路的分子级联调控作用。

3.3 食用菌液体发酵蛋白质研究进展

近年来, 食用菌液体发酵蛋白质的研究在产量提升、

结构优化及功能拓展等方面取得了显著进展。通过优化培养基组成和调控发酵参数, 菌丝体蛋白质含量显著提高, 其中, 黑木耳、杏鲍菇等菌种在豆渣或菜籽粕基质中粗蛋白含量可达 0.6~0.7 mg/mL^[60]。WANG^[61]对蛹虫草液体发酵的蛋白质进行评价, 蛋白质含量为 21%, 氨基酸评分为 62.41、必需氨基酸指数为 88.37, 必需氨基酸的模式比联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)/世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 模式值高出 45.6%。梁云霞^[62]以黑木耳为发酵菌株开展液体发酵试验, 系统研究了发酵过程中酶、营养物质及代谢物的转化规律, 经分析发酵所得黑木耳菌丝蛋白含 17 种丰富氨基酸, 且其支撑性、稳定性和热稳定性表现良好。GANG 等^[63]对北虫草液体发酵研究, 菌丝体蛋白含量为 21.10%, 子实体蛋白含量为 18.47%, 菌丝体和子实体的第一限制氨基酸为含硫氨基酸, 第二限制氨基酸为异亮氨酸, 分别对氨基酸评分、半胱氨酸、必需氨基酸指数、蛋白质生物学价值、氮摄入量、支链氨基酸与芳香族氨基酸比值测定, 结果表明液体发酵菌丝体蛋白营养价值相对更高。

发酵过程中的蛋白质功能特性会发生多方面的变化, 通过酶解作用将大分子蛋白降解为小分子肽和氨基酸, 同时促使蛋白质二级结构重组, α -螺旋结构减少、 β -折叠和无规则卷曲含量增加, 从而显著提升蛋白质的消化率。发酵后, 蛋白质的溶解度、起泡性、乳化性和黏度等功能特性发生了变化, 显著提高了蛋白质的体外消化率, 并增加了其生物利用度^[64]。菌丝蛋白在功能性食品 (如高蛋白饮品、植物基替代肉)、医药 (如免疫调节剂) 和饲料添加剂等领域展现出广泛的应用潜力。当前的研究聚焦于解析蛋白质合成代谢机制、突破工业化生产瓶颈, 并探索人工智能驱动的工艺优化策略, 以推动其产业化进程。

4 结束语

食用菌作为一种独特的生物资源, 因其丰富的营养价值和药用功效长期受到广泛关注。液体发酵技术在食用菌中的应用主要体现在以下几个方面。首先, 菌丝体的生产, 液体发酵技术能够大规模生产高质量的菌丝体, 这些菌丝体不仅可以用于食用菌的栽培, 还可以作为功能食品和药物的原料^[65]。其次, 在发酵产品的生产中, 液体发酵技术能够生产多种食用菌发酵产品, 如多糖、蛋白质、三萜类等, 这些产品在食品、医药和环保等领域具有广泛的应用价值^[66]。

液体发酵技术在食用菌领域的发展前景广阔, 随着发酵工程、代谢工程以及环保技术的不断进步, 液体发酵技术有望在提高产量、优化功能成分和实现可持续发展等方面发挥更大作用。未来, 液体发酵技术不仅限于生产过程的优化, 更将在食用菌的深加工和精细化生产中展现出

更大的潜力。总之,食用菌液体发酵技术在食用菌生产中具有重要的应用价值。未来,随着研究深入和技术进步,该技术将得到更广泛的应用和发展,为食用菌产业的发展提供新的动力。

参考文献

- [1] 王艳,刘欣,孙立瑞,等.常用食药菌资源开发利用及研究[J].食品科技,2024,49(9):98-106.
WANG Y, LIU X, SUN LR, et al. Development and utilization of common edible and medicinal fungi resources [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(9): 98-106.
- [2] 陈建胜,杨正友,王延圣,等.食用菌营养组成、功能活性及加工现状研究进展[J].食品工业科技,2024,45(12):358-366.
CHEN JS, YANG ZY, WANG YS, et al. Research progress on nutrient composition, functional activity and processing status of edible fungi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 358-366.
- [3] HAMZA A, MYLARAPU A, KRISHNA KV, et al. An insight into the nutritional and medicinal value of edible mushrooms: A natural treasury for human health [J]. Journal of Biotechnology, 2024, 381: 86-99.
- [4] WU F, ZHOU LW, YANG ZL, et al. Resource diversity of Chinese macrofungi: Edible, medicinal and oisonouss ecies [J]. Fungal Diversity, 2019, 98(1): 1-76.
- [5] 颜梦秋,刘艳芳,周帅,等.食药菌液体发酵及功能活性成分研究现状与展望[J].微生物学通报,2023,50(7):3211-3231.
YAN MQ, LIU YF, ZHOU S, et al. Research status and prospect of liquid fermentation and functional active ingredients of edible and medicinal fungi [J]. Chinese Journal of Microbiology, 2023, 50(7): 3211-3231.
- [6] 代秋琼,华蓉,孙达锋,等.食用菌功能性成分定向发酵研究进展[J].中国食用菌,2024,43(5):1-5.
DAI QQ, HUA R, SUN DF, et al. Research progress on directed fermentation of functional components of edible fungi [J]. Chinese Journal of Edible Fungi, 2024, 43(5): 1-5.
- [7] 王欣宇,林花,刁春妍,等.黑木耳液体发酵研究进展[J].中国林副特产,2024(2):79-82.
WANG XY, LIN H, DIAO CY, et al. Research progress of liquid fermentation of *Auricularia auricula* [J]. Chinese Forest By-products, 2024(2): 79-82.
- [8] 关颖贤,江洁,潘玲,等.食用菌发酵食品的研究进展[J].食品工业科技,2023,44(10):454-462.
GUAN YX, JIANG J, PAN L, et al. Research progress of fermented food with edible fungi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 454-462.
- [9] YAN MQ, FENG J, LIU YF, et al. Functional components from the liquid fermentation of edible and medicinal fungi and their food applications in China [J]. Foods, 2023, 12(10): 2086.
- [10] 许娟,徐彦军,江苏燕,等.基于响应面法对中国皱木耳菌种液体发酵培养基优化[J].菌物学报,2024,43(4):107-120.
XU J, XU YJ, JIANG SY, et al. Optimization of liquid fermentation medium for *Auricularia rugosa* strain from China based on response surface methodology [J]. Mycosystema, 2024, 43(4): 107-120.
- [11] 唐业刚,宋林茜,郭云贵,等.姬松茸液体发酵营养条件初探[J].食用菌,2022,44(5):16-19,28.
TANG YG, SONG LX, GUO YG, et al. Study on nutritional conditions of *Agaricus blazei* liquid fermentation [J]. Journal of Edible Fungi, 2022, 44(5): 16-19, 28.
- [12] 王维静,朱红薇,田建霞,等.桦褐孔菌液体发酵研究进展[J].智慧农业导刊,2022,2(14):28-30.
WANG WJ, ZHU HW, TIAN JX, et al. Research progress of liquid fermentation of *Fuscus obliquus* [J]. Guide Journal of Smart Agriculture, 2022, 2(14): 28-30.
- [13] 胡宝,徐子昕,周金看,等.响应面法优化香菇液体菌种发酵培养基配方[J].北方园艺,2022(22):97-103.
HU B, XU ZX, ZHOU JK, et al. Optimization of liquid culture medium for *Lentinus edodes* fermentation by response surface method [J]. Northern Horticulture, 2022(22): 97-103.
- [14] 韩冰,陈顺,于广峰,等.香菇液体深层发酵优化研究[J].食用菌,2019,41(4):19-21.
HAN B, CHEN S, YU GF, et al. Optimization of submerged liquid fermentation of *Lentinula edodes* [J]. Edible Fungi, 2019, 41(4): 19-21.
- [15] 冷悦,王淑敏,王恩鹏,等.两种碳源对猴头菇液体发酵中的多糖分泌及胞外酶活性的影响[J].食品安全质量检测学报,2022,13(13):4361-4367.
LENG Y, WANG SM, WANG ENP, et al. Effects of two carbon sources on polysaccharide secretion and extracellular enzyme activity during liquid fermentation of *Hericium erinaceus* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(13): 4361-4367.
- [16] 曾桂萍,余彩霞,王贵莲,等.液体发酵茯苓菌5.78培养条件及培养基优化[J].微生物学杂志,2024,44(5):55-61.
ZENG GP, YU CX, WANG GL, et al. Optimization of the culture conditions and medium for *Poria cocos* strain 5.78 in liquid fermentation [J]. Journal of Microbiology, 2024, 44(5): 55-61.
- [17] 石佳,冯杰,刘利平,等.液态发酵灵芝菌丝体多糖提取工艺的优化及其理化特征的分析[J].菌物学报,2024,43(7):114-126.
SHI J, FENG J, LIU LP, et al. Optimization of polysaccharide extraction process from *Ganoderma lucidum* mycelium by liquid fermentation and analysis of its physicochemical characteristics [J]. Chinese Journal of Microbiology, 2024, 43(7): 114-126.
- [18] 郑世仲,林钦,姜春玲,等.蛹虫草液体发酵培育子实体及其营养成分、色素稳定性分析[J].微生物学通报,2024,51(10):4075-4088.
ZHENG SZ, LIN Q, JIANG CL, et al. Cultivation of *Cordyceps militaris* fruiting bodies through liquid fermentation and analysis of their nutritional components and pigment stability [J]. Microbiology China, 2024, 51(10): 4075-4088.
- [19] 魏滔,张长生,陈琼华,等.灵芝真菌液体发酵及其产物应用的研究进展[J].微生物学通报,2022,49(1):336-351.
WEI T, ZHANG CS, CHEN QH, et al. Research progress in liquid fermentation of *Ganoderma lucidum* fungi and the application of its products [J]. Microbiology China, 2022, 49(1): 336-351.
- [20] 黄群,周应娟,陈光欣,等.基于响应面法的茯苓液体发酵工艺优化及其活性成分含量测定[J].成都中医药大学学报,2022,45(3):32-37.
HUANG Q, ZHOU YJ, CHEN GG, et al. Optimization of liquid fermentation process of *Poria cocos* based on response surface methodology and determination of active components [J]. Journal of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2022, 45(3): 32-37.
- [21] HE Y, TAN M, CAO Q, et al. The liquid fermentation process for mycelia

- of *Poria cocos* (Agaricomycetes) by single-factor experimentation and response surface methodology [J]. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2024, 26(4): 41–51.
- [22] 崔月花, 缪婧, 刘建凤, 等. 两阶段温度控制发酵对桑黄菌丝生长和胞外多糖产量的影响[J]. *食用菌学报*, 2018, 25(4): 57–64.
- CUI YH, MIAO J, LIU JF, *et al.* Effects of two-stage temperature-controlled fermentation on the mycelial growth and exopolysaccharide yield of *Phellinus igniarius* [J]. *Acta Edulis Fungi*, 2018, 25(4): 57–64.
- [23] 刘倩, 李正, 欧佳琪, 等. 羊肚菌液体发酵培养基的优化及发酵产物抗氧化活性研究[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(10): 41–50.
- LIU Q, LI Z, OU JQ, *et al.* Optimization of liquid fermentation medium and antioxidant activity of fermentation products of *Morchella esculenta* [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(10): 41–50.
- [24] 魏雅冬, 王广慧, 郭海滨, 等. 香菇液体发酵培养基的优化研究[J]. *北方园艺*, 2015(12): 136–138.
- WEI YD, WANG GH, GUO HB, *et al.* Optimization of the liquid fermentation medium for *Lentinula edodes* [J]. *Northern Horticulture*, 2015(12): 136–138.
- [25] 潘江安, 唐庆九, 冯娜, 等. 利用阶段 pH 控制提高灵芝深层发酵合成三萜能力的研究[J]. *食用菌学报*, 2020, 27(2): 84–91.
- PAN JAN, TANG QJ, FENG N, *et al.* Study on improving the triterpene synthesis ability of *Ganoderma lucidum* in submerged fermentation by stage pH control [J]. *Acta Edulis Fungi*, 2020, 27(2): 84–91.
- [26] WANG XY, DAI L, LU T. Optimization of liquid fermentation conditions and analysis of nutritional components of *Leucocalocybe mongolica* [J]. *Acta Edulis Fungi*, 2024, 31(3): 66–75.
- [27] CUI FJ, YANG YM, SUN L, *et al.* *Griofola frondosa* polysaccharides: A review on structure/activity, biosynthesis and engineering strategies [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 257(Pt 1): 128584.
- [28] 邹瑞龙, 李倩倩, 廖万杰, 等. 不同培养条件对大球盖菇液体菌种发酵质量的影响[J]. *中国食用菌*, 2025, 44(2): 41–49.
- ZOU RL, LI QQ, LIAO WJ, *et al.* Effects of different culture conditions on the fermentation quality of *Stropharia rugoso-annulata* liquid strains [J]. *Edible Fungi of China*, 2025, 44(2): 41–49.
- [29] LI ZM, JI X, YUAN CM, *et al.* Bioactivity of *Ganoderma lucidum* and optimization of mycelial fermentation conditions [J]. *Bio Web of Conferences*, 2023, 61: 01016.
- [30] 谢婷, 何娟, 张顺凯, 等. 香菇液体菌种培养基及摇瓶培养条件优化 [J]. *食药菌*, 2021, 29(3): 242–249.
- XIE T, HE J, ZHANG SK, *et al.* Optimization of the medium for liquid strain of *Lentinula edodes* and the culture conditions in shake flasks [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2021, 29(3): 242–249.
- [31] 侯宪文, 符瑞益, 徐林, 等. 姬松茸液体发酵培养基筛选和条件优化研究[J]. *广东农业科学*, 2020, 47(2): 24–29.
- HOU XW, FU RY, XU L, *et al.* Study on the screening of liquid fermentation medium and optimization of conditions for *Agaricus blazei* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(2): 24–29.
- [32] 朱雅红, 桂仲争. 蛹虫草液体菌种通气发酵培养及其营养成分分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2009, 28(5): 699–704.
- ZHU YH, GUI ZZ. Aerobic fermentation culture of *Cordyceps militaris* liquid strain and analysis of its nutritional components [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2009, 28(5): 699–704.
- [33] 傅海庆, 陈绍军, 骆文灿, 等. 桑黄菌液体发酵培养基研究[J]. *中国食品学报*, 2007(3): 58–63.
- FU HQ, CHEN SJ, LUO WC, *et al.* Study on the liquid fermentation medium of *Phellinus igniarius* [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2007(3): 58–63.
- [34] 黄蓓蓓. 猴头菇液体菌种发酵罐内培养条件的研究[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(1): 25–28.
- HUANG BB. Study on the cultivation conditions of *Hericium erinaceus* liquid strain in the fermenter [J]. *Edible Fungi of China*, 2020, 39(1): 25–28.
- [35] 周彬, 谢小花. 桦褐孔菌液态发酵的研究进展[J]. *食药菌*, 2024, 32(3): 157–161.
- ZHOU B, XIE XH. Research progress on liquid fermentation of *Inonotus obliquus* [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2024, 32(3): 157–161.
- [36] 周超, 马银鹏, 包旭翔, 等. 黑木耳液体发酵研究进展及应用现状综述[J]. *食药菌*, 2022, 30(6): 399–404, 419.
- ZHOU C, MA YP, BAO XX, *et al.* Review of research progress and application status of liquid fermentation of *Auricularia auricula* [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2022, 30(6): 399–404, 419.
- [37] GONZLEZ A, CRUZ M, LOSOYA C, *et al.* Edible mushrooms as a novel protein source for functional foods [J]. *Food & Function*, 2020, 11(9): 7400–7414.
- [38] IAO JH, XIAO DM, XIONG Q, *et al.* Nutritional requirements for the hyperproduction of bioactive exopolysaccharides by submerged fermentation of the edible medicinal fungus *Cordyceps taii* [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2010, 49: 241–249.
- [39] BAKRATSAS G, POLYDERA A, KATAPODIS P, *et al.* Recent trends in submerged cultivation of mushrooms and their application as a source of nutraceuticals and food additives [J]. *Future Foods*, 2021, 4: 100086.
- [40] 蔡梦婷, 唐庆九, 王益莉, 等. 灵芝孢子、子实体和菌丝体的抗氧化活性比较[J]. *食用菌学报*, 2018, 25(3): 72–76.
- CAI MT, TANG QJ, WANG YL, *et al.* Comparison on antioxidant activity of spore, fruiting body and mycelium of *Ganoderma lucidum* [J]. *Acta Edulis Fungi*, 2018, 25(3): 72–76.
- [41] 王嘉晖. 灵芝多糖及硒多糖的制备、结构表征和抗肿瘤活性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- WANG JH. Preparation, structural characterization and antitumor activity of polysaccharides and selenium-containing polysaccharides from *Trametes versicolor* [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [42] 高坤. 灵芝液态发酵胞外多糖调控及其免疫活性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- GAO K. Study on the regulation of exopolysaccharides from liquid fermentation of *Ganoderma lucidum* and their immunological activity [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [43] 戴永琪, 朱雨馨, 沈梦玲, 等. 外源添加剂对桑黄液体发酵菌丝体和多糖含量的影响[J]. *农业工程*, 2024, 14(3): 97–103.
- DAI YQ, ZHU YX, SHEN ML, *et al.* Effects of exogenous additives on mycelium and polysaccharide content in liquid fermentation of *Phellinus igniarius* [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2024, 14(3): 97–103.
- [44] HUANG X, YANG G, LI Y, *et al.* Optimization of medium and culture conditions for liquid-state fermentation of *Pleurotus eryngii* [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, 25(9): 1407–1414.

- [45] 刘朋肖, 魏薇, 刘警鞠, 等. 蛹虫草液体发酵产多糖的条件优化[J]. 菌物研究, 2023, 21(4): 304–311.
LIU PX, WEI W, LIU JJ, *et al.* Optimization of liquid fermentation conditions for polysaccharide production of *Cordyceps militaris* [J]. Journal of Fungal Research, 2023, 21(4): 304–311.
- [46] YAG XB, YANG YY, ZHANG YF, *et al.* Enhanced exo polysaccharide production in submerged fermentation of *Ganoderma lucidum* by Tween 80 supplementation [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2021, 44(1): 47–56.
- [47] 贾娇, 解修超, 宋玉, 等. 大球盖菇液体发酵培养基优化及其胞外多糖抗氧化活性[J]. 北方园艺, 2021(24): 105–115.
JIA J, XIE XC, SONG Y, *et al.* Optimization of liquid fermentation medium of *Stropharia rugosoannulata* and antioxidant activity of its exopolysaccharides [J]. Northern Horticulture, 2021(24): 105–115.
- [48] 马传贵, 张志秀, 冯杰, 等. 食用菌多糖活性及应用研究[J]. 食用菌, 2024, 46(4): 1–5, 9.
MA CG, ZHANG ZX, FENG J, *et al.* Study on the activity and application of polysaccharides from edible fungi [J]. Edible Fungi, 2024, 46(4): 1–5, 9.
- [49] CARRIERI R, MANCO R, SAPIO D, *et al.* Structural data and immunomodulatory properties of a water-soluble heteroglycan extracted from the mycelium of an Italian isolate of *Ganoderma lucidum* [J]. Natural Product Research, 2017, 31(18): 2119–2125.
- [50] DONG YT, WANG T, ZHAO J. *et al.* Polysaccharides derived from mushrooms in immune and antitumor activity: A review [J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2023, 25(8): 1–17.
- [51] LUO S, LUO Y, YUAN Y, *et al.* Optimization of submerged fermentation conditions for polysaccharide production in species of the genus *Ganoderma* (Agaricomycetes) and comparative analysis of the antioxidant activities of different strains [J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2025, 27(1): 13–27.
- [52] 陈嘉鹤. 桑黄在中国的潜在分布、液体发酵培养与多糖抗氧化研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2023.
CHEN JH. Study on the potential distribution in China, liquid fermentation culture and antioxidant activity of polysaccharides of *Phellinus igniarius* [D]. Shenyang: Liaoning University, 2023.
- [53] CHEN JT, TOMINAGE K, SATO Y, *et al.* Maitake mushroom (*Grifola frondosa*) extract induces ovulation in patients with polycystic ovary syndrome: A possible monotherapy and a combination therapy after failure with first-line clomiphene citrate [J]. Journal of Alternative and Complementary Medicine, 2010, 16(12): 1295–1299.
- [54] 李秋阳. 香菇的液体发酵及其多糖的研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
LI QY. Study on the liquid fermentation of *Lentinula edodes* and its polysaccharides [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018.
- [55] 郭晓宇, 程池露, 滕李铭, 等. 松杉灵芝发酵菌丝体中的三萜化合物[J]. 菌物学报, 2024, 43(7): 127–137.
GUO XY, CHENG CL, TENG LM, *et al.* Triterpenoids in the mycelium of *Ganoderma tsugae* Murr. [J]. Acta Mycologica Sinica, 2024, 43(7): 127–137.
- [56] 朱永乐, 高梦祥, 李利, 等. 提高羊肚菌液态发酵三萜含量的诱导条件优化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 92–101.
ZHU YL, GAO MX, LI L, *et al.* Optimization of induction conditions for increasing triterpene content in liquid fermentation of *Morchella esculenta* [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 92–101.
- [57] 孟令会. 牛樟芝菌丝体液体发酵条件的优化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
MENG LH. Research on optimization of liquid fermentation conditions of mycelium of *Antrodia camphorata* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [58] TAJI S, YAMADA T, WADA SI, *et al.* Lanostane-type triterpenoids from the sclerotia of *Inonotus obliquus* possessing anti-tumor promoting activity [J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2008, 43(11): 2373–2379.
- [59] HETLAND G, TANGEN JM, MAHMOOD F, *et al.* Antitumor, anti-inflammatory and antiallergic effects of *Agaricus blazei* mushroom extract and the related medicinal basidiomycetes mushrooms, *Hericium erinaceus* and *Grifola frondosa*: A review of preclinical and clinical studies [J]. Nutrients, 2020, 12(5): 1339.
- [60] AHLBORN J, STEPHAN A, MECKEL T, *et al.* Upcycling of food industry side streams by basidiomycetes for production of a vegan protein source [J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2019, 8(1): 447–455.
- [61] WANG CC. Enhanced exopolysaccharide production by *Cordyceps militaris* using repeated batch cultivation [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2019, 127(4): 499–505.
- [62] 梁云霞. 木耳菌丝转化豆渣规律及其菌丝蛋白加工性能探究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2023.
LIANG YX. Study on the law of bean dregs transformation by *Auricularia* mycelium and the processing properties of mycelial protein [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2023.
- [63] GANG J, LIU H, LIU YH. Optimization of liquid fermentation conditions and protein nutrition evaluation of mycelium from the caterpillar medicinal mushroom, *Cordyceps militaris* (ascomycetes) [J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2016, 18(8): 745–752.
- [64] 张强, 吴彩娥. 羊肚菌菌丝体蛋白的理化特性及抗氧化活性[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(8): 1408–1415.
ZHANG Q, WU CE. Physicochemical properties and antioxidant activities of protein from *Morchella esculenta* mycelium [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(8): 1408–1415.
- [65] 康林芝, 何迪, 袁培焯, 等. 食用菌液体发酵饮料研制进展[J]. 韶关学院学报, 2024, 45(9): 8–13.
KANG LZ, HE D, YUAN PZ, *et al.* Research progress on development of edible fungi liquid fermentation beverages [J]. Journal of Shaoguan University, 2024, 45(9): 8–13.
- [66] YAN MQ, LIU YF, TANG CH. *et al.* Application progress of liquid fermentation products of edible and medicinal fungi in food industry [J]. Food and Machinery, 2023, 39(8): 6172.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)