

巴楚菇液态发酵培养基配方优化

木依色尔·努尔艾克木¹, 张 烨^{1,2*}, 张 潇¹, 温鸿涛^{1,2}, 莱则娜·阿布来提¹, 拉孜提·努尔焦¹

¹伊犁师范大学生物科学与技术学院, 新疆 伊宁

²伊犁师范大学微生物资源保护与开发利用重点实验室, 新疆 伊宁

收稿日期: 2026年6月5日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

巴楚菇是一种主要分布于新疆巴楚县和麦盖提县地区的特色真菌资源, 其多糖具有免疫调节、抗氧化、抗肿瘤及降血糖等多种生物活性。本研究采用液态发酵技术培养巴楚菇菌丝体, 并对其多糖进行提取。为提高发酵液中多糖含量, 以多糖含量为评价指标, 通过单因素试验结合响应面分析方法, 对培养基中碳源、氮源、无机盐及生长因子的添加量进行优化。结果表明, 在乳糖19.9 g/L、蛋白胨6.2 g/L、维生素B₆ (VB₆) 12 mg/L、KH₂PO₄ 1.4 g/L的条件下, 多糖含量为0.412 g/L, 较优化前提高34.2%。研究结果表明, 经优化后的培养基能够显著提高巴楚菇多糖的含量, 为其液态发酵生产及功能成分开发提供了理论依据。

关键词

巴楚菇, 多糖, 液态发酵, 菌丝

Optimization of the Liquid Fermentation Medium Formula for *Bachu mushrooms*

Muyiseer·Nuerkeaimu¹, Ye Zhang^{1,2*}, Xiao Zhang¹, Hongtao Wen^{1,2}, Laizena·Abulaiti¹, Laziti·Nuerjiao¹

¹College of Biological Sciences and Technology, Yili Normal University, Yining Xinjiang

²Key Laboratory of Protection, Development and Utilization of Microbial Resources, Yili Normal University, Yining Xinjiang

Received: June 5, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

Bachu mushrooms is a distinctive fungal resource mainly distributed in Bachu County and Makit County of Xinjiang, China. Its polysaccharides exhibit various biological activities, including im-

*通讯作者。

文章引用: 木依色尔·努尔艾克木, 张烨, 张潇, 温鸿涛, 莱则娜·阿布来提, 拉孜提·努尔焦. 巴楚菇液态发酵培养基配方优化[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(4): 507-519. DOI: 10.12677/hjfn.2026.154055

munomodulatory, antioxidant, antitumor, and hypoglycemic effects. In this study, submerged fermentation was employed to cultivate the mycelia of *Bachu mushrooms*, followed by extraction of its polysaccharides. To increase the polysaccharide content in the fermentation broth, polysaccharide yield was used as the evaluation index, and the concentrations of carbon source, nitrogen source, inorganic salt, and growth factor in the medium were optimized using single-factor experiments combined with response surface methodology. The results showed that, under the conditions of lactose 19.9 g/L, peptone 6.2 g/L, vitamin B₆ (VB₆) 12 mg/L, and KH₂PO₄ 1.4 g/L, the polysaccharide content reached 0.412 g/L, representing a 34.2% increase compared with that before optimization. These results indicate that the optimized medium significantly enhanced the polysaccharide content of *Bachu mushrooms*, providing a theoretical basis for its production by submerged fermentation and development as a functional ingredient.

Keywords

Bachu Mushrooms, Polysaccharides, Liquid Fermentation, Mycelium

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

巴楚菇(*Bachu Mushrooms*)生长于新疆叶尔羌河流域胡杨(*Populus euphratica*)林区的荒漠型真菌[1]。与胡杨根系共生,可提高宿主对矿质元素的吸收并改善根际土壤环境,从而增强植物抗逆性,在干旱环境中具有重要生态功能[2][3]。由于其生长对环境及宿主依赖性强,目前尚未实现人工栽培,资源主要依赖野生采集,限制了其进一步开发利用[4]。

巴楚菇含有丰富的蛋白质及多糖[5],研究表明,该多糖以葡萄糖、甘露糖和半乳糖为主要组成单元,形成以 β -(1→3)-D-葡聚糖为骨架并带有 β -(1→6)支链的结构,该结构是发挥生物活性的基础[6]-[8]。研究表明,巴楚菇多糖具有抗氧化、抗肿瘤及免疫调节等作用[9]。其多糖能激活巨噬细胞并促进 NO 及 TNF- α 、IL-6 等细胞因子的分泌,从而增强免疫应答[10][11];此外,还表现出调节脂质代谢的能力,有助于降低血脂水平[6]。因此,真菌多糖在功能食品与药用开发中具有良好应用前景[12][13]。在制备方面,多糖性质受提取工艺显著影响。相比传统热水提取,超声辅助、酶法及化学修饰等方法可提高提取效率并优化其活性[14]-[16],适当修饰还可增强其功能特性[17]。结合现代发酵技术,液态深层发酵是获取真菌多糖的重要方式,具有周期短、可控性强等优势[18][19]。通过调控培养基成分及发酵条件,可有效提高菌丝体生长及多糖产量[20]-[23]。

总体来看,巴楚菇多糖具有较高应用价值,但受资源限制,其开发仍面临挑战。通过发酵技术实现高效生产,是推动其产业化利用的重要方向[24]-[27]。

2. 材料与方法

2.1. 材料与试剂

巴楚菇:采自新疆伊犁察县;红糖、蔗糖:山东可口恋食品有限公司;无水葡萄糖、苯酚、浓硫酸、无水乙醇、氯化钠、硫酸镁、丙三醇:天津市致远化学试剂有限公司;磷酸二氢钾、磷酸氢二钾:天津市福晨化学试剂厂;硫酸铵:天津市鑫铂特化工有限公司;尿素:天津恒兴化学试剂制造有限公司;硫酸锰:天津市盛奥化学试剂有限公司;无水氯化钙、乳糖、蛋白胨、维生素 B₁、维生素 B₂、维生素 B₆、

L(+)-抗坏血酸：天津市众联化学试剂有限公司；D-果糖：上海毕臣生化科技有限公司；琼脂粉：南京全隆生物技术有限公司；酵母粉：北京鸿润宝科技有限公司；黄豆饼粉、玉米浆干粉：南京全龙生物有限公司。以上化学试剂均为分析纯。

2.2. 仪器与设备

BOXUN 高压蒸汽灭菌锅：上海博讯实业有限公司医疗设备厂；超净工作台：苏净集团苏州安泰空气技术有限公司；UPE-II20L 纯水/超纯水制造系统：四川优普超纯科技有限公司；TDZ5-WS 多管架自动平衡离心机：常州金坛良友仪器有限公司；BSA124S 分析天平：赛多利斯科学仪器(北京)有限公司；UV2550 紫外可见分光光度计：上海通谱检测技术有限公司；C20 玻璃仪器气流烘干器：邦西仪器科技(上海)有限公司；HH-S1 数显恒温水浴锅：金坛市医疗仪器厂；ZHWY-103B 恒温培养振荡器：上海智城分析仪器制造有限公司；LRH-70 型生化培养箱：上海齐欣科技仪器有限公司。

2.3. 方法

2.3.1. 巴楚菇液态发酵及多糖提取工艺流程及操作要点

巴楚菇液态发酵及多糖提取工艺操作流程如图 1 所示。

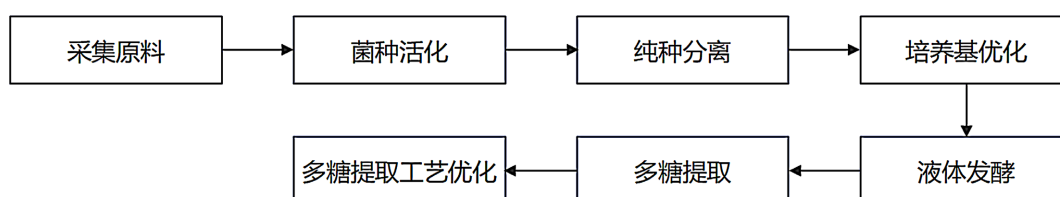


Figure 1. Operating procedure for liquid fermentation and polysaccharide extraction of *Bachu mushrooms*

图 1. 巴楚菇液态发酵及多糖提取工艺操作流程

1) 培养基配制

PDA 培养基配方：马铃薯 200 g，葡萄糖 20 g，琼脂 20 g，水 1000 mL，pH 自然。

基础培养基配方：马铃薯 200 g，葡萄糖 20 g，KH₂PO₄ 0.5 g，MgSO₄ 0.25g，水 1000 mL，pH 自然。

液态发酵培养配方基：葡萄糖 20 g，酵母粉 5 g，KH₂PO₄ 1 g，VB₁ 10 mg，水 1000 mL，pH 自然。

2) 菌种筛选

新鲜巴楚菇清洗、消毒、切小段后，接种在 PDA 培养基上，在 20℃~25℃ 恒温培养箱中培养 7 天左右，挑选光滑的圆形菌落划线培养，得到纯菌落。

3) 菌种扩大培养

用基础培养基将得到的纯菌落接种在三角瓶 24℃，130 r/min 条件下摇瓶培养 7 天。

4) 菌种保藏

将扩大培养的菌种挑出放入 20%甘油中在 -80℃ 冰箱冷冻保藏，以备后期使用。

2.3.2. 巴楚菇菌种鉴定

将液氮研磨后的样本与含 CTAB、 β -巯基乙醇的高盐裂解缓冲液混合，65℃ 温育裂解细胞并抑制核酸酶；通过氯仿-异戊醇抽提去除蛋白质和多糖，离心后取水相；加入异丙醇沉淀 DNA，乙醇洗涤去除盐分，最终溶解于 TE 缓冲液或超纯水，适用于多糖/多酚含量高的样本。将提取到的 DNA 进行 PCR，PCR 反应体系为 50 uL：20 × PCR-mix 15 uL，DNA (50 ng/uL) 模板 2 uL，10 uL/L 的正、反引物各 2 uL，使用 ddH₂O 补足 50 uL。扩增程序：94℃ 预变性 5 min；94℃ 变性 40 s，58℃ 退火 30 s，72℃ 延伸 40 s，35 个

循环；72℃延伸 5 min。将 PCR 原液送去生物公司检测，得到菌种 ITS 序列进行鉴定，确定采集的蘑菇是巴楚菇，属于马鞍菌属。

2.3.3. 单因素实验设计

设置单因素试验，初步探讨碳源(基础培养基葡萄糖用红糖、玉米粉、蔗糖、果糖、乳糖代替)、氮源(基础培养基酵母粉用黄豆粉、硫酸铵、蛋白胨、尿素代替)、无机盐(基础培养基 KH_2PO_4 用 K_2HPO_4 、 NaCl 、 CaCl_2 、 MnSO_4 代替)和生长因子(基础培养基维生素 B_1 用维生素 B_2 、维生素 B_6 、 $\text{L}(+)$ -抗坏血酸代替)种类，24℃，130 r/min 条件下摇瓶培养 7 天，通过用苯酚-硫酸法测定含糖量确定最适碳源、氮源、无机盐和生长因子种类后，进一步筛选出其最适碳源(16 g/L、18 g/L、20 g/L、22 g/L、24 g/L、26 g/L)、氮源(3 g/L、5 g/L、7 g/L、9 g/L、11 g/L)、无机盐(0.9 g/L、1.2 g/L、1.5 g/L、1.8 g/L、2.1 g/L)和生长因子(8 mg/L、10 mg/L、12 mg/L、14 mg/L、16 mg/L)添加量，每组实验设置三个平行实验。

2.3.4. 响应面验证试验设计

为进一步验证巴楚菇液态发酵产多糖最适碳源、氮源、无机盐和生长因子的添加量，以多糖含量作为评价指标，将碳源添加量(g/L)(A)、氮源添加量(g/L)(B)、无机盐添加量(g/L)(C)确定为影响试验的关键变量。采用 Box-Behnken 设计三因素三水平响应面优化巴楚菇液态发酵工艺。响应面试验设计因素及水平见表 1。

Table 1. Factors and levels of response surface design
表 1. 响应面试验因素与水平

水平	因素		
	A 碳源添加量/(g/L)	B 氮源添加量/(g/L)	C 无机盐添加量/(g/L)
1	18	5	0.9
2	20	7	1.2
3	22	9	1.5

2.3.5. 多糖提取及含量测定

发酵结束后，将巴楚菇液态发酵液 5000 r/min 离心 10 min，去除菌丝体及不溶性杂质，收集上清。将上清置于 80℃水浴中浓缩至原体积的 1/3，冷却后加入 4 倍体积 95%无水乙醇，充分混匀，于 4℃静置 12 h 进行醇沉。之后于 5000 r/min 离心 10 min，弃上清，收集沉淀。沉淀用适量蒸馏水复溶后，于 80℃水浴浸提 1 h，冷却后离心取上清，再次加入 4 倍体积 95%乙醇进行二次醇沉，以提高粗多糖纯度。所得沉淀用无水乙醇洗涤 2 次，50℃干燥至恒重，得到巴楚菇液态发酵粗多糖。多糖含量采用苯酚-硫酸法测定[27]。

2.4. 数据处理

利用 GraphPad Prism 10.1 工具进行数据整理和图像生成，运用 SPSS 27.0 工具实施方差分析，借助 Design-Expert 13.0 程序完成响应面的分析工作。

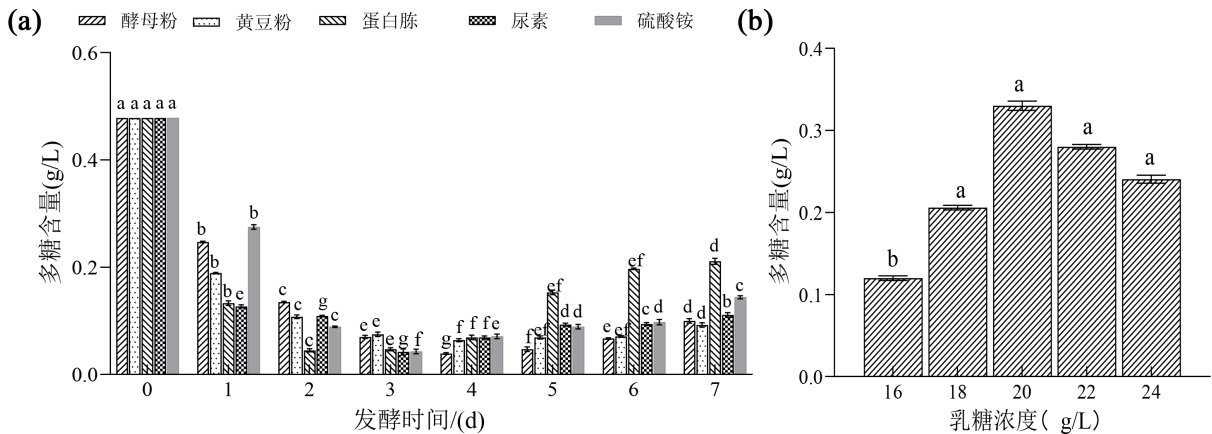
3. 结果与分析

3.1. 不同碳源、氮源、无机盐和生长因子对巴楚菇液态发酵产多糖的影响

为明确巴楚菇液态发酵产多糖的关键营养因子，本研究以发酵液多糖含量为评价指标，系统考察了碳源、氮源、无机盐和生长因子种类及其添加量对多糖积累的影响。

3.1.1. 不同碳源和碳添加量对巴楚菇液态发酵产多糖的影响

碳源既是菌体生长的能量来源,也是多糖合成的主要碳骨架来源,可影响糖酵解、三羧酸循环、糖核苷酸前体生成及胞外多糖分泌。



同一指标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Figure 2. The influence of different carbon sources screening and lactose addition amount on the polysaccharide production of *Bachu Mushrooms* in liquid fermentation

图 2. 不同碳源筛选及乳糖添加量对巴楚菇液态发酵产多糖的影响

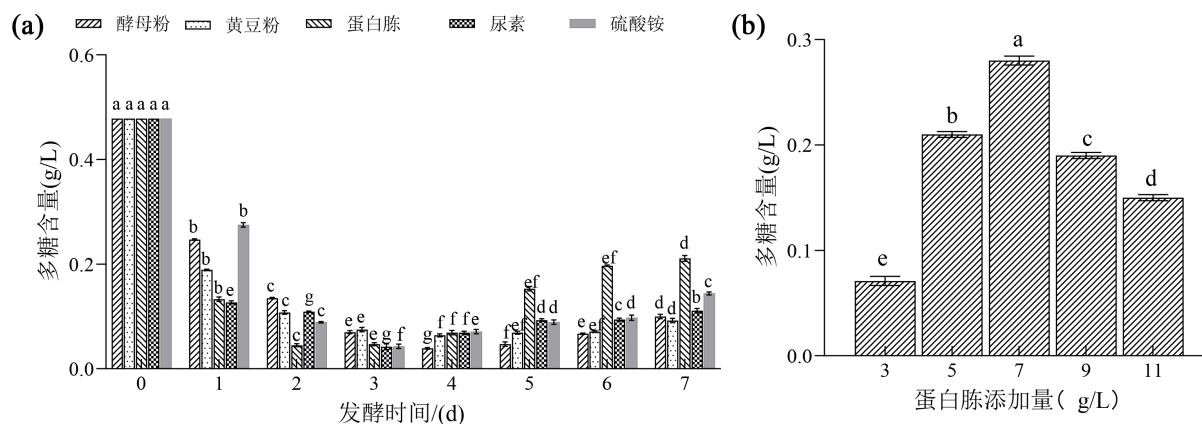
由图 2(a)可知,不同碳源发酵巴楚菇产多糖,均呈现先降低后升高的趋势,其中乳糖组第 7 天多糖含量最高,为 0.322 g/L,高于葡萄糖、果糖、红糖、蔗糖和玉米淀粉。该结果说明乳糖更适合作为巴楚菇液态发酵产多糖的碳源。从发酵动力学角度分析,乳糖属于相对缓释型碳源,其水解和同化速率低于葡萄糖等单糖,避免发酵前期底物快速耗竭,并在中后期持续提供碳源,有利于维持巴楚菇菌体糖核苷酸前体供应和胞外多糖积累,葡萄糖虽易被菌体快速利用,但容易优先进入能量代谢和巴楚菇菌体增殖途径;玉米淀粉因溶解性及可利用性较低,需经胞外酶水解后才能被吸收,底物释放速率与产物形成阶段匹配性较差。对 *Oudemansiella radicata* 的研究发现液态发酵产胞外多糖,碳源显著影响胞外多糖产量,并且乳糖有利于获得较高菌体量和胞外多糖产量[28] [29]。

由图 2(b)可知,多糖产量随乳糖浓度增加呈先升高后下降趋势。当乳糖添加量为 20 g/L 时,多糖含量最高,为 0.330 ± 0.006 g/L。乳糖浓度过低时,体系处于碳源限制状态,底物供给不足限制巴楚菇菌体生长和多糖前体合成;乳糖浓度过高时,可能导致培养基渗透压升高、发酵液黏度增加和溶氧传递受限,从而产生底物抑制效应,影响巴楚菇多糖产量。Sinha 等研究指出,底物浓度变化会影响真菌发酵液流变性质和菌丝形态,进而影响胞外生物聚合物生成,这与本研究中高乳糖水平下产糖量下降的趋势一致[30]。

3.1.2. 不同氮源和氮添加量对巴楚菇液态发酵产多糖的影响

氮源通过影响菌体蛋白质、核酸及关键酶系合成,调控菌体生长和产物形成之间的代谢分配。

由图 3(a)可知,不同氮源发酵巴楚菇产多糖,均在发酵前中期下降,后期逐渐回升,其中蛋白胨组第 7 天多糖含量最高,约为 0.211 g/L,说明蛋白胨更有利于巴楚菇胞外多糖积累。蛋白胨富含小分子肽、游离氨基酸和生长促进因子,生物可利用度较高,可提高氮源同化率,并促进巴楚菇菌体胞外多糖合成相关酶系[29]。而尿素需经脲酶分解后利用,可能引起发酵液 pH 波动;硫酸铵等无机氮源成分单一,虽可提供铵态氮,但持续供氮能力和促酶系合成能力有限;黄豆粉成分复杂、溶解性较低,可能导致有效氮源释放不足。



同一指标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

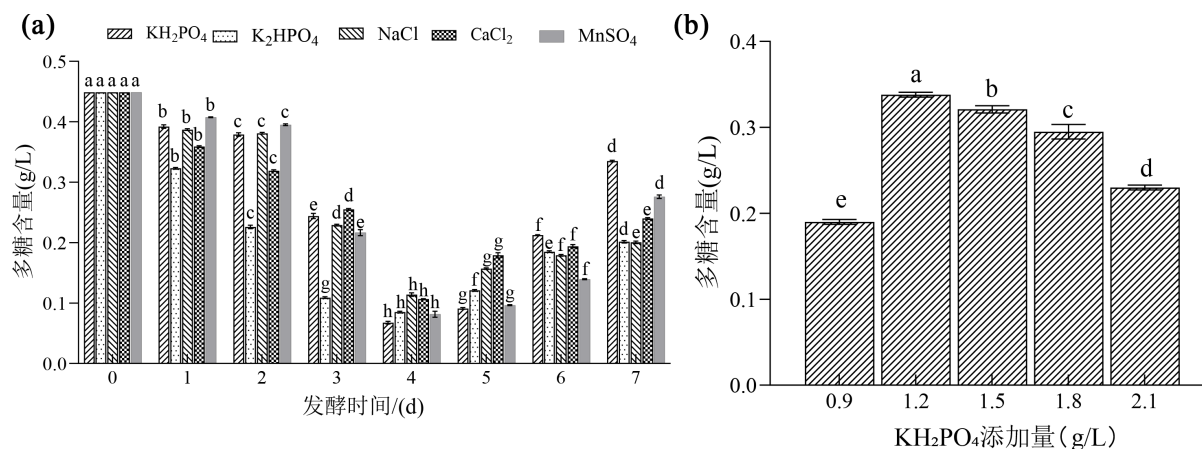
Figure 3. The influence of different nitrogen sources selection and peptone addition amount on the polysaccharide production of *Bachu Mushrooms* in liquid fermentation

图 3. 不同氮源筛选及蛋白胨添加量对巴楚菇液态发酵产多糖的影响

由图 3(b)可知, 蛋白胨添加量为 7 g/L 时多糖含量最高, 为 0.280 ± 0.004 g/L。蛋白胨不足时, 氮源限制降低巴楚菇菌体比生长速率和酶促反应水平; 蛋白胨过量导致 C/N 比下降, 巴楚菇菌体细胞将更多碳骨架和氮元素整合入菌体蛋白和核酸, 从而削弱碳流向胞外多糖的分配, 表现出“高氮促生长、抑产物”的代谢偏移。已有研究表明, 真菌胞外多糖生产中 C/N 是影响生物量和胞外多糖产量的重要因子, 适宜 C/N 比有利于提高产物形成效率。

3.1.3. 不同无机盐和无盐添加量对巴楚菇液态发酵产多糖的影响

无机盐主要通过调节离子稳态、缓冲能力、膜通透性、能量代谢和酶活性影响真菌液态发酵过程。



同一指标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Figure 4. The influence of different inorganic salt screening and KH_2PO_4 addition amount on the polysaccharide production of *Bachu Mushrooms* in liquid fermentation

图 4. 不同无机盐筛选及 KH_2PO_4 添加量对巴楚菇液态发酵产多糖的影响

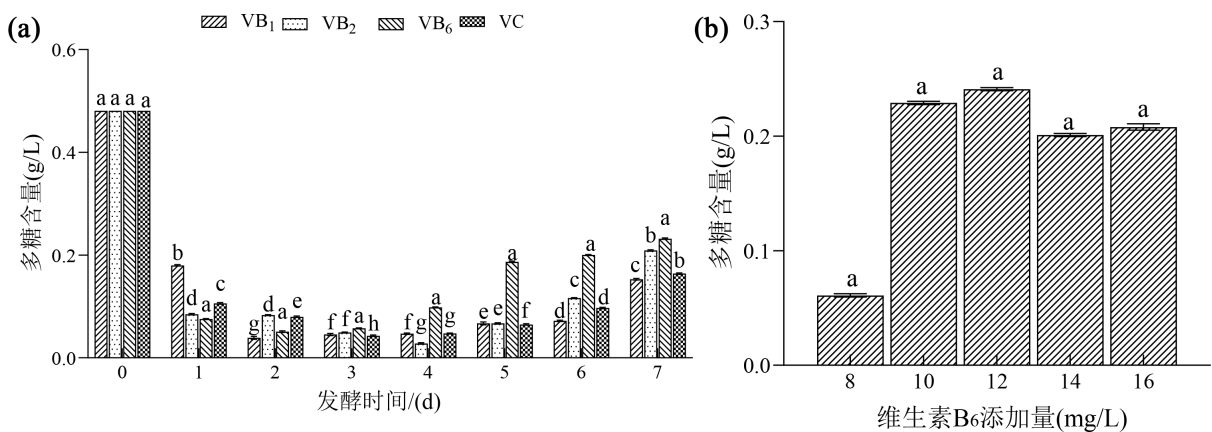
由图 4(a)可知, 不同无机盐处理中, KH_2PO_4 组第 7 天多糖含量最高, 约为 0.335 g/L, 显著优于 K_2HPO_4 、NaCl、 CaCl_2 和 MnSO_4 , 说明 KH_2PO_4 更适合作为巴楚菇液态发酵产多糖的无机盐组分, 可能与 KH_2PO_4 同时调控巴楚菇菌体“钾离子稳态 - 磷酸化代谢 - 能量供应 - 活化糖前体合成”有关。K⁺参与细胞渗透压调节、膜电位维持和多种酶促反应; H_2PO_4^- 参与 ATP 生成、磷酸化反应、核酸合成以及糖核苷酸前体

形成[30] [31]。KH₂PO₄可能通过维持己糖激酶、磷酸果糖激酶、丙酮酸激酶等糖酵解关键酶活性,促进底物向能量代谢和巴楚菇多糖前体合成方向转化,胞外多糖合成依赖充足能量供应和活化糖前体,因此适量 KH₂PO₄可提高底物转化效率和多糖合成代谢通量。MnSO₄和 CaCl₂虽可通过金属离子激活酶系或稳定细胞结构促进一定程度的产糖,但其对能量代谢和磷酸化反应的调控弱于 KH₂PO₄。

由图 4(b)可知,当 KH₂PO₄添加量为 1.2 g/L 时,多糖含量最高,为 0.338 ± 0.003 g/L。KH₂PO₄不足时,磷源限制影响 ATP 生成和糖核苷酸前体合成;添加过量时,体系离子强度和缓冲能力升高,可能干扰 pH 动态变化和细胞渗透压平衡,导致产糖效率下降。因此,1.2 g/L KH₂PO₄为巴楚菇液态发酵产多糖的较优无机盐添加量。

3.1.4. 不同生长因子和生长因子添加量对巴楚菇液态发酵产多糖的影响

生长因子虽添加量较低,但可作为辅酶或辅基参与碳氮代谢、氧化还原反应和酶促调控。



同一指标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Figure 5. The influence of different growth factors screening and vitamin B6 addition amount on the polysaccharide production of *Bachu Mushrooms* in liquid fermentation

图 5. 不同生长因子筛选及维生素 B₆ 添加量对巴楚菇液态发酵产多糖的影响

由图 5(a)可知,不同生长因子处理中,VB₆组第 7 天多糖含量最高,为 0.232 g/L,其次为 VB₂、VC 和 VB₁,说明 VB₆对巴楚菇多糖合成具有更强促进作用。VB₆的活性形式主要为磷酸吡哆醛,是多种氨基酸转氨、脱羧等反应的重要辅酶,可参与氨基酸、糖和脂质等多种代谢过程[32]。结合代谢调节分析,适量 VB₆可能通过增强氮源同化效率,提高谷氨酸、天冬氨酸等氨基酸代谢水平,促进菌体酶蛋白、结构蛋白合成和多糖合成相关代谢途径运行,从而有利于后期巴楚菇菌体胞外多糖积累。VB₂参与黄素辅酶 FAD 和 FMN 形成,与氧化还原反应和能量代谢相关,因此也具有一定促产作用;VC 主要发挥抗氧化保护作用;VB₁更多参与糖代谢早期脱羧反应,对后期多糖积累的促进作用相对较弱。

由图 5(b)可知,当 VB₆添加量为 12 mg/L 发酵组多糖含量最高,为 0.241 ± 0.001 g/L。VB₆不足时,PLP 辅酶供给受限,转氨酶、脱羧酶等关键酶促反应受到影响,导致氨基酸代谢和氮源同化效率下降,进一步限制多糖合成相关酶蛋白的形成及活化糖前体的利用效率;过量时,促产效应趋于饱和,并可能引起胞内代谢平衡偏移。因此,12 mg/L VB₆为较优生长因子添加量。

3.2. 响应面试验结果

在碳源、氮源、无机盐和生长因子最适浓度单因素试验基础上,选取影响较大的三因素,确定碳源为乳糖、氮源为蛋白胨和无机盐为 KH₂PO₄,研究其添加量对产多糖含量的影响,通过 Design-Expert 13.0

设计进行响应面优化试验，并以感官评分为响应值，结果见表 2。

Table 2. Design and results of response surface experiment for optimization of fermentation conditions

表 2. 发酵条件优化响应面试验设计及结果

试验号	A 乳糖添加量(g/L)	B 蛋白胨添加量(g/L)	C KH ₂ PO ₄ 添加量(g/L)	多糖含量(g/L)
1	0	0	0	0.38
2	-1	1	0	0.33
3	0	0	0	0.38
4	0	-1	1	0.39
5	-1	-1	0	0.33
6	1	1	0	0.26
7	0	0	0	0.40
8	0	0	0	0.39
9	0	-1	-1	0.25
10	1	-1	0	0.34
11	1	0	1	0.33
12	0	1	-1	0.25
13	-1	0	1	0.35
14	-1	0	-1	0.26
15	1	0	-1	0.25
16	0	1	1	0.32
17	0	0	0	0.40

3.2.1. 多糖含量模型建立与分析

利用 Design-Expert 13.0 软件，将乳糖添加量、蛋白胨添加量、KH₂PO₄ 添加量作为 3 个自变量，并以多糖含量为响应值，对各因素回归拟合后，得出下列回归方程：

$$Y = 0.39 - 0.011A - 0.019B + 0.048C - 0.024B - 0.0025AC - 0.018BC - 0.04A^2 - 0.035B^2 - 0.053C^2$$

回归模型方差分析见表 3，试验的模型相关性分析结果见表 4。

Table 3. Analysis of variance for response surface experiments

表 3. 响应面试验方差分析

来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.051	9	5.653E-003	54.58	<0.0001	**
A 乳糖添加量	1.012E-003	1	1.012E-003	9.78	0.0167	*
B 蛋白胨添加量	2.812E-003	1	2.812E-003	27.16	0.0012	**
C KH ₂ PO ₄ 添加量	0.018	1	0.018	174.28	<0.0001	**
AB	1.600E-003	1	1.600E-003	15.45	0.0057	**
AC	2.500E-005	1	2.500E-005	0.24	0.6382	
BC	1.225E-003	1	1.225E-003	11.83	0.0109	*

续表

A^2	6.737E-003	1	6.737E-003	65.05	<0.0001	**
B^2	5.158E-003	1	5.158E-003	49.80	0.0002	**
C^2	0.012	1	0.012	112.05	<0.0001	**
残差	7.250E-004	7	1.036E-004			
失拟项	3.250E-004	3	1.083E-004	1.08	0.4515	
纯误差	4.000E-004	4	1.000E-004			
总和	0.052	16				

Table 4. Results of correlation analysis for experimental model**表 4.** 实验模型相关分析结果

项目	数值	项目	数值
标准差	0.010	模型相关系数(R^2)	0.9859
均值	0.33	校正决定系数(R^2_{Adj})	0.9679
变异系数/%	3.08	预测决定系数(R^2_{Pre})	0.8871
预测的误差平方和	5.825E-003	相对准确度	19.057

注: *表示影响显著($P < 0.05$); **表示影响极显著($P < 0.01$)。

由表 3 和表 4 可知, 该模型 F 值为 54.58, 该回归模型 $P < 0.0001$ (极显著), 其失拟项 $P = 0.4515 > 0.05$ (不显著), 说明模型拟合程度良好, 可以对回归方程相应回归值进行预测, 同时模型回归系数 $R^2 = 0.9859$, 校正系数 $R^2_{Adj} = 0.9679$, 表明该模型与试验数据有着极强的吻合度, 可以用于巴楚菇液态发酵培养基配方及多糖提取工艺的优化预测与分析工具。

通过分析相关数据可以看出, 一次项 B 、 C 对多糖含量具有极显著影响($P < 0.01$), A 对多糖含量的影响显著($P < 0.05$), 二次项交互作用 AB 对多糖含量具有极显著的影响($P < 0.01$), BC 对多糖含量具有显著的影响($P < 0.05$), AC 对多糖含量影响不显著($P > 0.05$)。结合 F 值与 P 值的综合判定, 分析各因素的主效应关系为: $C > B > A$, 即 KH_2PO_4 添加量 $>$ 蛋白胨添加量 $>$ 乳糖添加量。

3.2.2. 各因素的交互作用

由图 6 可知, 响应面分析表明, 乳糖添加量(A)、蛋白胨添加量(B)和 KH_2PO_4 添加量(C)对巴楚菇多糖产量均存在显著的非线性调控作用。方差分析显示, AB 交互作用极显著($P < 0.01$), BC 交互作用显著($P < 0.05$), AC 交互作用不显著($P > 0.05$), 说明 C/N 比及蛋白胨与 KH_2PO_4 的代谢耦合是影响多糖合成的主要交互因素。

AB 交互作用极显著, 说明乳糖与蛋白胨主要通过调控 C/N 比影响巴楚菇多糖合成。适宜 C/N 比可协调乳糖分解、糖酵解、氨基酸代谢和酶蛋白合成, 促进碳流向 UDP-葡萄糖、UDP-半乳糖等活化糖前体转化; 蛋白胨不足会限制菌体生长和相关酶系形成, 而蛋白胨过量则可能使碳流偏向蛋白质和核酸合成, 进而降低多糖积累; BC 交互作用显著, 表明蛋白胨与 KH_2PO_4 可在氮源同化、能量供应和多糖前体活化层面形成协同作用。蛋白胨为多糖合成相关酶蛋白形成提供氨基酸和短肽底物, KH_2PO_4 则通过促进 ATP 生成、葡萄糖磷酸化和糖核苷酸前体合成, 为多糖链延伸提供能量和活化糖供体, 从而提高胞外多糖合成通量; AC 交互作用不显著, 说明乳糖与 KH_2PO_4 在本试验范围内主要表现为相对独立效应。乳糖主要为糖酵解和糖核苷酸前体合成提供碳骨架, KH_2PO_4 则主要参与 ATP 生成、糖磷酸化反应和离子稳

态维持；二者虽在糖磷酸代谢节点存在关联，但未形成显著协同作用。

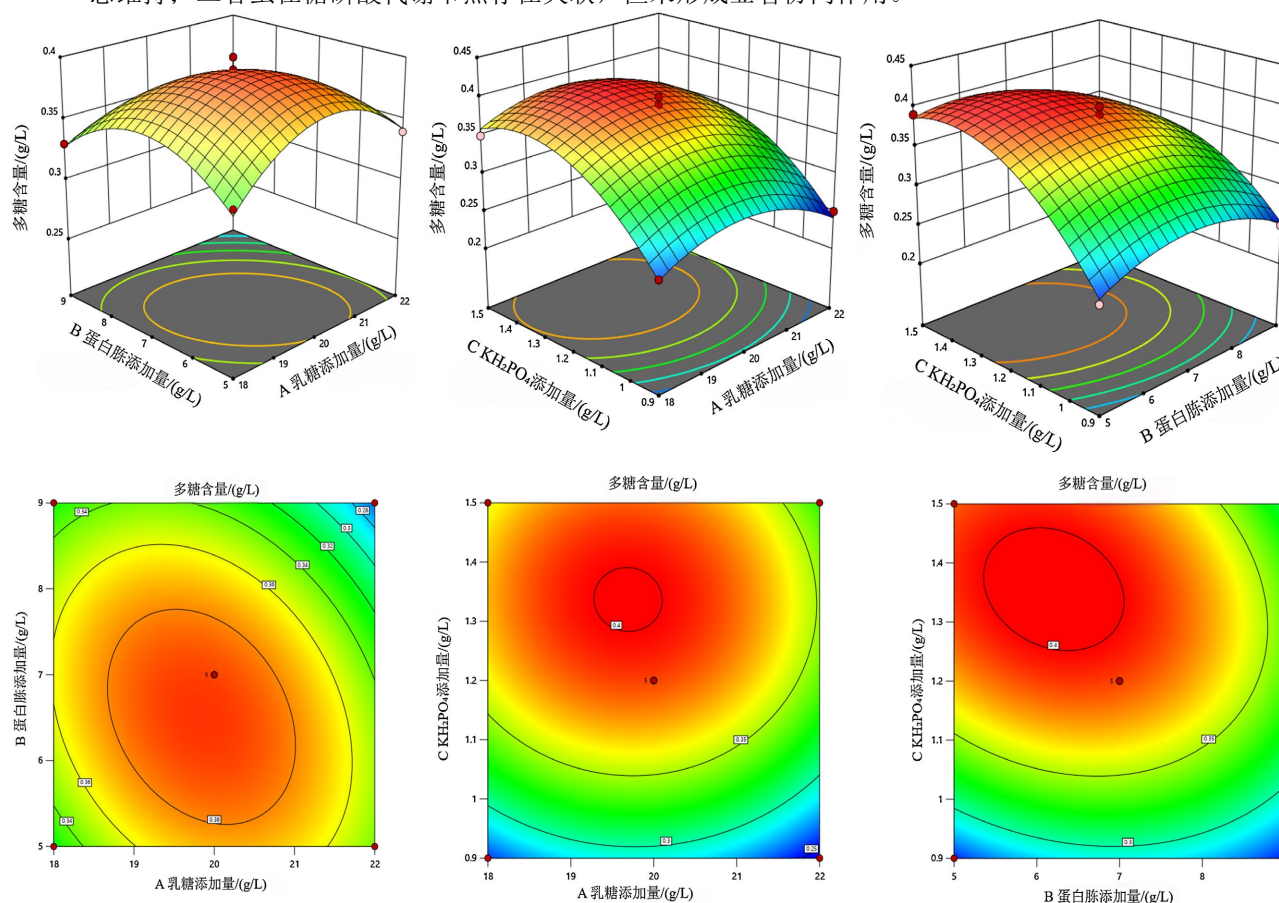


Figure 6. Contour maps and response surface diagrams showing the influence of the interaction effects of various factors on the content of polysaccharides

图 6. 各因素交互作用对多糖含量的影响等高线图和响应面图

综上，三因素交互作用强弱表现为 $AB > BC > AC$ ，主效应影响顺序为 $C > B > A$ 。说明巴楚菇液态发酵产多糖主要受 KH_2PO_4 水平及碳氮比调控，适宜的乳糖、蛋白胨和 KH_2PO_4 配比有利于维持菌体生长、能量代谢和多糖合成之间的动态平衡，从而提高多糖产量。

3.2.3. 验证试验结果

根据回归方程模型，以多糖含量最大值为优化目标，得到预测的最优条件为：碳源为 19.877 g/L、氮源为 6.242 g/L、无机盐为 1.355 g/L，根据实验实际条件，将条件修正为碳源为 19.9 g/L、氮源为 6.2 g/L、无机盐为 1.4 g/L，在此最优条件下经 3 次平行试验，得到其多糖含量为 0.412 g/L，与预测值总多糖含量为 0.406 g/L 相差在 5% 范围内，证实了预测值和实验值之间的良好相关性。

3.2.4. 巴楚菇液态发酵培养基优化前后产多糖能力比较

为进一步验证培养基优化对巴楚菇液态发酵产多糖的影响，本研究以优化前液态发酵培养基为对照，在相同接种量、发酵温度、摇床转速和发酵时间条件下，与响应面优化培养基进行平行发酵比较，见表 5。

由表 5 可知，与优化前液态发酵培养基相比，优化后培养基使巴楚菇多糖含量由 0.307 ± 0.005 g/L 提高至 0.412 ± 0.013 g/L，提高幅度为 34.2%，进一步验证了单因素结合响应面优化策略在提升巴楚菇液态发酵产多糖能力方面的显著性。

Table 5. Comparison of polysaccharide production capacity before and after optimization of fermentation medium
表 5. 发酵培养基优化前后产多糖能力比较

组别	培养基条件	多糖含量/g·L ⁻¹
优化前培养基	葡萄糖 20 g/L、酵母粉 5 g/L、KH ₂ PO ₄ 1 g/L、VB ₁ 10 mg/L	0.307 ± 0.005
优化后培养基	乳糖 19.9 g/L、蛋白胨 6.2 g/L、VB ₆ 12 mg/L、KH ₂ PO ₄ 1.4 g/L	0.412 ± 0.013

4. 结论

本研究通过单因素实验与响应面分析法对巴楚菇液态发酵培养基配方进行系统优化,显著提升了多糖的产量与稳定性,为巴楚菇的规模化生产及多糖的高效提取提供了理论依据与技术支持。通过单因素实验确定关键营养组分得到:乳糖为最优碳源,最佳浓度为 19.877 g/L,此时多糖含量为 0.33 g/L;蛋白胨为最优氮源,最佳浓度为 6.242 g/L,多糖含量为 0.28g/L;KH₂PO₄ 为最优无机盐,最佳浓度为 1.355 g/L,多糖含量为 0.338 g/L;VB₆ 为最优生长因子,最佳浓度为 12 mg/L,多糖含量为 0.24 mg/L。经响应面优化后,在乳糖 19.9 g/L、蛋白胨 6.2 g/L、VB₆ 12 mg/L、KH₂PO₄ 1.4 g/L 的条件下,多糖含量为 0.412 g/L,较优化前提高 34.2%。经优化后的培养基能够显著提高巴楚菇多糖的含量,为其液态发酵生产及功能成分开发提供了理论依据。

基金项目

伊犁师范大学创新创业训练计划项目(S202410764003X);伊犁师范大学/河谷资源植物保护与利用重点实验室(2024HGZD04)。

参考文献

- [1] Zhao, Q., Sulayman, M., Zhu, X., Zhao, Y., Yang, Z. and Hyde, K.D. (2016) Species Clarification of the Culinary Bachu Mushroom in Western China. *Mycologia*, **108**, 828-836. <https://doi.org/10.3852/16-002>
- [2] Wei, C., Liu, M., Hu, J., Zhang, L. and Dong, C. (2024) Mycorrhizal Associations between *Helvella* Bachu and Its Host Plants. *Forests*, **15**, Article No. 721. <https://doi.org/10.3390/f15040721>
- [3] 卫彩红, 刘梦潜, 王淼, 等. 巴楚马鞍菌的荒漠共生密码与资源保育应用[C]//中国菌物学会. 中国菌物学会 2025 年学术年会论文摘要——食用真菌. 塔里木大学生命科学与技术学院; 中国科学院微生物研究所微生物多样性与资源创新利用全国重点实验室, 2025: 12.
- [4] Hou, X.J. and Chen, W. (2008) Optimization of Extraction Process of Crude Polysaccharides from Wild Edible Bachu Mushroom by Response Surface Methodology. *Carbohydrate Polymers*, **72**, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.07.034>
- [5] Badhe, P. and Ashwini, B. (2025) Mushroom: Fungus with Powerful Nutritional and Medicinal Value. *Biopress Journal of Computational Life Sciences*, **1**, 7-14.
- [6] Ge, Y., Qiu, H. and Zheng, J. (2022) Physicochemical Characteristics and Anti-Hyperlipidemic Effect of Polysaccharide from BaChu Mushroom (*Helvella leucopus*). *Food Chemistry: X*, **15**, Article ID: 100443. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100443>
- [7] Zhang, W.N., Gong, L.L., Zhou, Z.B., et al. (2022) Structural Characterization and Immunomodulatory Activity of a Mannan from *Helvella leucopus*. *International Journal of Biological Macromolecules*, **212**, 495-507. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.132>
- [8] Zeng, D. and Zhu, S. (2018) Purification, Characterization, Antioxidant and Anticancer Activities of Novel Polysaccharides Extracted from Bachu Mushroom. *International Journal of Biological Macromolecules*, **107**, 1086-1092. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.088>
- [9] Zhao, J., Luo, Y., Zhao, L., Jia, W., Jia, P., Wei, P., et al. (2022) Chemical Constituents of *Helvella* Bachu Ethanol Extract: Antioxidant and Anticancer Activities. *Chemistry of Natural Compounds*, **58**, 341-343. <https://doi.org/10.1007/s10600-022-03674-1>
- [10] Zhang, W.N., Gong, L.L., Liu, Y., Zhou, Z., Wan, C., Xu, J., et al. (2020) Immunoenhancement Effect of Crude Poly-

- saccharides of *Helvella leucopus* on Cyclophosphamide-Induced Immunosuppressive Mice. *Journal of Functional Foods*, **69**, Article ID: 103942. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103942>
- [11] Schepetkin, I.A. and Quinn, M.T. (2006) Botanical Polysaccharides: Macrophage Immunomodulation and Therapeutic Potential. *International Immunopharmacology*, **6**, 317-333. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2005.10.005>
- [12] Song, F., Lin, Y., Li, Z., Xie, L., Chen, L., Jiang, H., *et al.* (2024) Nutritional Value Evaluation of Wild Edible Mushroom (*Helvella leucopus*) from Western China. *International Food Research Journal*, **31**, 503-513. <https://doi.org/10.47836/ijfrj.31.2.21>
- [13] Barbosa, J.R., Gonçalves, M.A. and da Silva Martins, L.H. (2025) Bioactive Glucans from Mushroom Spores. In: *Fungal Biotechnology*, Elsevier, 441-447. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13263-6.00016-x>
- [14] 于东梅, 赵一行, 何亚君, 等. 真菌多糖: 天然生物聚合物的应用与展望[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(11): 160-170.
- [15] 张建新, 李辉, 谢凡, 等. 大型真菌多糖的研究进展[J]. 工业微生物, 2024, 54(5): 73-83.
- [16] Huang, X., Ai, C., Yao, H., Zhao, C., Xiang, C., Hong, T., *et al.* (2022) Guideline for the Extraction, Isolation, Purification, and Structural Characterization of Polysaccharides from Natural Resources. *eFood*, **3**, e37. <https://doi.org/10.1002/efd2.37>
- [17] 桑雨梅, 高郁超, 武济萍, 等. 食用真菌多糖提取、纯化及结构表征研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(13): 210-218.
- [18] Yan, J.K., Wang, W.Q. and Wu, J.Y. (2014) Recent Advances in *Cordyceps sinensis* Polysaccharides: Mycelial Fermentation, Isolation, Structure, and Bioactivities: A Review. *Journal of Functional Foods*, **6**, 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.11.024>
- [19] López-Legarda, X., Arboleda-Echavarría, C., Parra-Saldívar, R., Rostro-Alanis, M., Alzate, J.F., Villa-Pulgarín, J.A., *et al.* (2020) Biotechnological Production, Characterization and *in Vitro* Antitumor Activity of Polysaccharides from a Native Strain of *Lentinus crinitus*. *International Journal of Biological Macromolecules*, **164**, 3133-3144. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.191>
- [20] 周威, 申红佳, 甘泉, 等. 平菇液态发酵多糖与其子实体多糖抗氧化活性对比[J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 428-434.
- [21] 蔡晶晶, 陈枕枕, 王雅洁, 等. 发酵方式对亮菌多糖质量的影响[J]. 长春师范大学学报, 2024, 43(12): 76-83.
- [22] Feng, Y.L., Li, W.Q., Wu, X.Q., Cheng, J. and Ma, S. (2010) Statistical Optimization of Media for Mycelial Growth and Exo-Polysaccharide Production by *Lentinus Edodes* and a Kinetic Model Study of Two Growth Morphologies. *Biochemical Engineering Journal*, **49**, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.12.002>
- [23] Zhang, B., Yan, P., Chen, H. and He, J. (2012) Optimization of Production Conditions for Mushroom Polysaccharides with High Yield and Antitumor Activity. *Carbohydrate Polymers*, **87**, 2569-2575. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.042>
- [24] Lysakowska, P., Sobota, A. and Wirkijowska, A. (2023) Medicinal Mushrooms: Their Bioactive Components, Nutritional Value and Application in Functional Food Production—A Review. *Molecules*, **28**, Article No. 5393. <https://doi.org/10.3390/molecules28145393>
- [25] Xie, Z., Yang, K., Zhang, Y., Yan, J. and Mao, Y. (2026) Mushroom Polysaccharides as Functional Food Ingredients for Alleviating Exercise-Induced Fatigue: A Review of Efficacy, Mechanisms, and Structure-Function Relationships. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **74**, 6612-6639. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c14044>
- [26] You, S.W., Hoskin, R.T., Komarnytsky, S. and Moncada, M. (2022) Mushrooms as Functional and Nutritious Food Ingredients for Multiple Applications. *ACS Food Science & Technology*, **2**, 1184-1195. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00107>
- [27] 吕亭亭, 杨志华, 韩永红, 等. 响应面法优化苯酚-硫酸法测定泡桐花多糖含量[J]. 化学与生物工程, 2020, 37(7): 62-68.
- [28] Zou, X. (2005) Optimization of Nutritional Factors for Exopolysaccharide Production by Submerged Cultivation of the Medicinal Mushroom *Oudemansiella radicata*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **21**, 1267-1271. <https://doi.org/10.1007/s11274-005-1941-5>
- [29] Wu, C.Y., Lin, Y.P., Wang, J.C. and Liang, Z. (2010) Effect of Cultivation Conditions on the Production of Mycelial Biomass and Exopolysaccharide by Submerged Culture of a Rooting Shank Medicinal Mushroom, *Oudemansiella radicata* (Relhan) Singer (Agaricomycetidae). *International Journal of Medicinal Mushrooms*, **12**, 99-110. <https://doi.org/10.1615/intjmedmushr.v12.i1.100>
- [30] Mahapatra, S. and Banerjee, D. (2013) Fungal Exopolysaccharide: Production, Composition and Applications. *Microbiology Insights*, **6**, 1-16. <https://doi.org/10.4137/mbi.s10957>

- [31] 冯杰, 冯娜, 刘艳芳, 等. 面向规模化应用的竹荪多糖液态深层发酵工艺优化[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 181-187.
- [32] Parra, M., Stahl, S. and Hellmann, H. (2018) Vitamin B6 and Its Role in Cell Metabolism and Physiology. *Cells*, 7, Article No. 84. <https://doi.org/10.3390/cells7070084>