

黑木耳多糖的制备及其在功能性果冻中的应用

惠瑶瑶¹, 徐义娟^{1,2}, 张婷^{1,2}, 王珊珊¹, 杨聪¹, 彭程程¹, 崔世修^{1*}

(1. 嘉兴未来食品研究院, 浙江嘉兴 314000)(2. 江南大学生物工程学院, 江苏无锡 214000)

摘要: 为了延长黑木耳产业链, 提高黑木耳的附加值, 该文以黑木耳为原料, 优化黑木耳多糖提取工艺, 进一步对抗氧化和降糖降脂活性进行评价, 并通过正交试验、质构特性、理化指标和微生物指标为评价指标研制出黑木耳多糖果冻。结果表明: 黑木耳多糖最佳水提工艺为: 提取温度 80 ℃、提取时间 3 h、料液比 1:70 (*m/V*), 多糖得率为 17.93%。质量浓度为 2 mg·mL⁻¹ 多糖对 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除率为 60.34% 和 54.19%。质量浓度为 10 mg·mL⁻¹ 多糖对 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶抑制作用分别为 68.71%、63.99% 和 75.49%。5 mg·mL⁻¹ 质量浓度的多糖在体外胃液和肠道环境中对油脂的吸附率分别为 30.09% 和 32.66%。黑木耳多糖具有胆酸盐结合能力。正交试验优化的黑木耳多糖果冻配方为: 木糖醇添加量 15% (*m/V*), 黑木耳多糖添加量 0.5% (*m/V*), 复合胶添加量 0.5% (*m/V*), 氯化钾 0.2% (*m/V*), 柠檬酸钾 0.8% (*m/V*)。黑木耳多糖果冻质构特性与市售果冻接近, 可溶性固形物含量为 18.7%, 微生物指标符合国家标准。该研究可为活性成分在果冻中的应用提供理论依据。

关键词: 黑木耳多糖; 果冻; 抗氧化; 降糖降脂

文章编号: 1673-9078(2026)6-265-276 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.6.0311

Preparation of Polysaccharides from *Auricularia auricula* and its Application in Functional Jelly

HUI Yaoyao¹, XU Yijuan^{1,2}, ZHANG Ting^{1,2}, WANG Shanshan¹, YANG Cong¹, PENG Chengcheng¹, CUI Shixiu^{1*}

(1.Jiaxing Institute of Future Food, Jiaxing 314000, China)

(2.School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China)

Abstract: To extend the industrial chain of *Auricularia auricula* and increase its added value, this study used *A. auricula* as the raw material to optimize the *A. auricula* polysaccharide extraction process; evaluate the antioxidant, hypoglycemic, and lipid-lowering activities; and develop *A. auricula* polysaccharides jelly using orthogonal test, texture characteristics, physicochemical indexes and microbiological indexes as evaluation indicators. The result showed that when the extraction was performed with 1:70 (*m/V*) solid/liquid ratio at 80 ℃ for 3 h, the polysaccharide yield was 17.93%. The DPPH and ABTS free radical scavenging rates of 2 mg·mL⁻¹ polysaccharide were 60.34% and 54.19%, respectively. Moreover, the inhibition rates of 10 mg·mL⁻¹ polysaccharide against α -amylase, α -glucosidase, and pancreatic lipase reached 68.71%, 63.99%, and 75.49%, respectively. Additionally, 5 mg·mL⁻¹ polysaccharide demonstrated 30.09% and 32.66% fat adsorption rates in simulated gastric and intestinal environments, respectively. *A. auricula* polysaccharides also exhibited bile acid binding capacity. The optimized formulation for the jelly developed through orthogonal testing included: 15% (*m/V*) xylan, 0.5% (*m/V*) *A. auricula* polysaccharides,

引文格式:

惠瑶瑶,徐义娟,张婷,等.黑木耳多糖的制备及其在功能性果冻中的应用[J].现代食品科技,2026,42(6):265-276.

HUI Yaoyao, XU Yijuan, ZHANG Ting, et al. Preparation of polysaccharides from *Auricularia auricula* and its application in functional jelly [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(6): 265-276.

收稿日期: 2025-03-05 ; 修回日期: 2025-06-26 ; 接受日期: 2025-06-30
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFF1106404)
作者简介: 惠瑶瑶 (1995-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 19895321767@126.com
通讯作者: 崔世修 (1988-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 发酵工程, E-mail: cuishixiu@jiangnan.edu.cn

0.5% (*m/V*) composite gel, 0.2% (*m/V*) potassium chloride, and 0.8% (*m/V*) potassium citrate. The texture characteristics of *A. auricula* polysaccharide jelly were close to those of commercial jelly, the content of soluble solids was 18.7%, and the microbiological indexes conformed to national standards. This research provides theoretical support for applying active ingredients in jelly formulations.

Key words: *Auricularia auricula* polysaccharides; jelly; antioxidant activity; hypoglycemic and lipid-lowering activity

黑木耳是一种生长在朽木上的腐生真菌^[1], 在韩国、中国、俄罗斯和日本等许多国家大量种植, 并被列入世界四大食用蘑菇之列^[2]。同时也是我国年产量高的主要食用菌之一^[3], 其中浙江龙泉是人工栽培黑木耳的重要发源地^[4]。黑木耳含有丰富的碳水化合物、蛋白质、脂肪、维生素、色素和微量元素^[5]。多糖是黑木耳的主要活性成分^[6]。近年来, 多糖在医疗保健领域的研究越来越多, 展现出对多种慢性疾病的积极治疗效果。许多研究证实黑木耳多糖具有调节肠道菌群、增强免疫力、抗衰老、抗辐射、降低血脂、抗炎抑菌^[7]等作用, 目前黑木耳产业规模大, 市场相对稳定, 但是深加工产品种类少, 市售的黑木耳产品主要是鲜黑木耳和干黑木耳, 预包装类食品相对较少, 主要集中在粉末冲调产品和饮品方面。

多糖具有胶凝性, 该特性源于其通过氢键、疏水相互作用及离子交联等分子间作用力形成的三维网状结构, 该过程受单糖组成、聚合度及分子构象等多重因素调控。黑木耳多糖作为一种天然食用菌来源的生物聚合物, 虽具备基础凝胶特性, 但受其线性分子链和低支化度限制, 单独成胶时存在机械强度不足、持水性差等问题。现有研究表明, 通过与魔芋胶、卡拉胶等具有强水合能力的胶体复配, 可通过分子间协同效应显著改善凝胶性能^[8]。目前市场上一些凝胶产品如果冻因丰富和爽滑的口感深受大家喜欢, 果冻的热量低, 口感好, 方便携带和保存, 适合作为即食零食和外出补给, 但现在市场因过度追求口感多样性而加入大量糖分和人工香精、色素等, 长期食用可能会引发肥胖、蛀牙或代谢等问题^[9]。现在人们对健康饮食的追求越来越多, 对健康有营养的果冻有很大的需求空间。故本文将黑木耳多糖与魔芋胶、卡拉胶作为基础原料, 引入代糖实现糖度等效替代, 开发成一种具有独特风味并且低糖低脂的营养型果冻, 为企业开发富含食用菌多糖的新产品提供理论基础。

本研究以浙江龙泉地区的黑木耳为原材料, 对黑木耳多糖提取工艺优化, 同时对提取的黑木耳多糖进行了抗氧化降糖降脂评价, 并通过在传统的果冻工艺上添加黑木耳多糖, 并进行配方优化、营养指标、理化指标和微生物指标测定, 研制出了滑爽可口、酸甜

适中、弹性十足、口感细腻的黑木耳多糖果冻。本文的研究结果为提高黑木耳的附加值及衍生产品的开发与应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

黑木耳, 由浙江龙泉三宝生物科技有限公司提供; 卡拉胶、魔芋胶、柠檬酸、赤藓糖醇, 购自浙江一诺生物科技有限公司; 苯酚、氢氧化钠、乙醇、硫酸、葡萄糖等均为分析纯, 购自国药集团有限公司; 阿卡波糖, 购自上海生工公司。DPPH 标准品、ABTS 分析级、胆固醇分析级、牛胆酸钠分析级、油酸分析级、胆酸钠分析级、吡啶分析级、盐酸羟胺分析级、三氟乙酸分析级, 均购自上海晶纯生化科技股份有限公司(阿拉丁); 淀粉酶、人工胃液、人工肠液, 购自上海源叶生物科技有限公司。

DF-101S 水浴锅, 无锡莱弗思生物实验器材有限公司; BG-160 恒温培养箱, BGZ-140 鼓风干燥箱, 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司; ME104E 分析天平、FE28-Standard 酸度计, 苏州赛恩斯仪器有限公司; Eppendorf 离心机, 苏州蝶晟仪器设备有限公司; UVmini-1280 紫外分光光度计, LABCONCO 冻干机, 广州市赛拓仪器科技有限公司; BC3-2 粉碎机, 河北本辰科技有限公司; ZQZY-AF8E 培养箱, 无锡奥温科技有限公司; TA.XT Plus100C 物性测试仪, 上海瑞玢智能科技有限公司; PAL-3 数显糖度计, 无锡览创科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 黑木耳超微粉末

干制黑木耳先用研磨机研磨成粉过 20 目网筛, 再经超高速超微粉碎机研磨获得黑木耳超微粉。

1.2.2 黑木耳多糖提取

取一定量的黑木耳超微粉, 按照一定的料液比将超微粉与蒸馏水混合, 在不同的温度(60、70、80、90 ℃)下水浴搅拌一定时间(2、3、4、5 h)。提取结束后通过离心(10 000 r·min⁻¹, 10 min)取上层提取液。

旋转蒸发（60℃）使体积缩小至原体积的1/4，再添加4倍体积的无水乙醇，冷藏（4℃）静置过夜形成沉淀。离心（10 000 r·min⁻¹，10 min）收集沉淀并进行冷冻干燥获得黑木耳多糖^[10]。

参考 GB/T 15672-2009 标准测定多糖含量^[11]。准备葡萄糖标准溶液（质量浓度为100 mg·L⁻¹），分别吸取0、0.2、0.4、0.6、0.8和1 mL，加入到10 mL的具塞试管中，用蒸馏水定容至1 mL。接着向试管中加入1 mL体积分数为5%苯酚溶液，再加入5 mL的浓硫酸，反应静置10 min。490 nm波长下测定吸光度。根据葡萄糖的质量浓度和吸光度值绘制标准曲线。称取一定量的黑木耳粗多糖溶于水并稀释至一定浓度，按照相同的步骤进行测定。黑木耳多糖得率计算公式如下：

$$P = \frac{C \times V \times D \times M_2}{M_1 \times 1000 \times M_3} \times 100\%$$
 (1)

式中：
P——黑木耳多糖得率，%；
C——回归方程计算得到粗多糖质量浓度，mg·mL⁻¹；
V——溶液的体积，mL；
D——稀释倍数；
M₁——称取粗多糖质量，g；
M₂——粗多糖质量，g；
M₃——黑木耳质量，g。

1.2.3 单因素实验

分别考察提取温度、提取时间、料液比对黑木耳多糖得率的影响。在提取时间为3 h，料液比为1:60（m/V）的条件下，考察提取温度为60、70、80、90℃对黑木耳多糖得率的影响；固定提取温度80℃，提取时间3 h，考察料液比在1:60、1:70、1:80、1:90（m/V）条件下黑木耳多糖得率的影响；固定料液比为1:70（m/V），提取温度为80℃，分别在提取时间为2、3、4、5 h的条件下提取黑木耳多糖，得出相应黑木耳多糖得率，考察提取时间对黑木耳多糖得率的影响。

1.2.4 响应面优化实验

基于单因素实验，表1设计了响应面实验因素水平表。三个因素为提取时间（A）、料液比（B）和提取温度（C），以黑木耳多糖得率为评价指标。

表 1 响应面因素水平表

Table 1 Response surface factor level table			
水平	提取时间 A/h	料液比 B (m/V)	提取温度 C/℃
-1	2	1:60	70
0	3	1:70	80
+1	4	1:80	90

1.2.5 黑木耳多糖体外抗氧化活性实验

1.2.5.1 DPPH 自由基清除实验

A 样品溶液的配制：配置质量浓度为0.125、0.25、0.5、1、2 mg·mL⁻¹的维生素C溶液（阳性对照）和黑木耳多糖样品溶液。取150 μL待测样液，再加入等体积DPPH标准液，混匀，室温避光反应30 min，于517 nm下测定吸光值^[12]。根据以下公式计算：

$$D_1 = \frac{A_i - A_j}{A_i} \times 100\%$$
 (2)

式中：
D₁——DPPH 清除率，%；
A_i——对照组溶液的吸光值；
A_j——样品组溶液的吸光值。

1.2.5.2 ABTS⁺ 自由基清除实验

配置质量浓度为0.125、0.25、0.5、1、2 mg·mL⁻¹的维生素C溶液（阳性对照）和黑木耳多糖样品溶液。取1 mL待测溶液，室温条件下加入等体积的ABTS工作液充分搅拌，避光反应6 min，记录反应物在波长734 nm下的吸光值^[13]。根据以下公式计算：

$$A_i = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100\%$$
 (3)

式中：
A_i——ABTS⁺ 清除率，%；
A₁——样品组溶液的吸光值；
A₀——对照组溶液的吸光值。

1.2.6 黑木耳多糖体外降糖活性

1.2.6.1 α-淀粉酶抑制实验

称取一定量的黑木耳多糖样品溶于20 mmol·L⁻¹的磷酸钠缓冲液（pH值为6.9）中。将200 μL的多糖溶液与200 μL的α-淀粉酶溶液（1.0 U·mL⁻¹，溶于pH值为6.9的磷酸钠缓冲液）混合，此为样品组；用缓冲液代替酶液消除背景干扰，阴性对照组只加酶液，阳性对照为阿卡波糖，37℃反应10 min，加入400 μL质量分数为0.25%的淀粉溶液，水浴（37℃）10 min，再加入1 mL DNS 显色剂终止反应，用蒸馏水补足10 mL，540 nm处测吸光度^[10]。计算公式如下：

$$B_i = (1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}) \times 100\%$$
 (4)

式中：
B_i——α-淀粉酶抑制率，%；
A₁——样品的吸光度值；
A₂——背景组溶液的吸光度值；
A₀——阴性组溶液的吸光度值。

1.2.6.2 α-葡萄糖苷酶抑制率的测定

将40 mL的5 mmol·L⁻¹ 4-硝基苯-β-D-吡喃半乳

糖苷溶液（中性磷酸钠缓冲溶液溶解）和 20 μL 多糖样品溶液混合，37 $^{\circ}\text{C}$ 反应 5 min 后，加入 10 μL α -葡萄糖苷酶溶液（1.0 $\text{U}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，中性磷酸钠缓冲溶液配制），37 $^{\circ}\text{C}$ 反应 10 min，加入 140 μL Na_2CO_3 （0.2 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ）终止反应。以 40% 乙醇代替样品溶液作为空白组，用缓冲液代替酶液消除背景干扰，阳性对照为阿卡波糖，测定 400 nm 吸光度值^[14]，计算公式如下：

$$C_i = (1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}) \times 100\% \quad (5)$$

式中：

C_i —— α -葡萄糖苷酶抑制率，%；

A_1 ——样品组溶液的吸光度值；

A_2 ——背景组溶液的吸光度值；

A_0 ——空白组溶液的吸光度值。

1.2.7 黑木耳多糖体外降脂活性

1.2.7.1 油脂吸附能力测定

参考李喜阁^[15]报道的方法稍作修改。用 10 mL 蒸馏水溶解不同浓度多糖样品并用 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 调节 pH 值使其成酸性，加入 10 g 大豆油后在 37 $^{\circ}\text{C}$ 条件下培养 2 h，再用 NaOH（0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ）将溶液 pH 值调中性，继续 37 $^{\circ}\text{C}$ 培养 2 h。离心（4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，20 min）用滴管吸取未结合的油并记录质量。水替代多糖样品溶液作为空白组，羧甲基纤维素作为阳性对照。油脂结合率计算公式如下：

$$W_i = \frac{W_a - W_b - W_c}{W_a} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

W_i ——油脂吸附率，%；

W_a ——未结合油脂的质量，g；

W_b ——实际加入油脂的质量，g；

W_c ——空白对照组油脂的质量，g。

1.2.7.2 胆酸盐结合能力测定

用 1 mL 人工胃液溶解多糖样品，37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 60 min。继续加入 5 mL 的人工肠液和 4 mL 的胆酸盐溶液（0.04 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ），37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 60 min。用 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PBS 代替胆酸盐作为底物空白组；用 4 mL 的胆酸盐溶液（0.04 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ）作为胆酸盐空白组，其余部分加 PBS 溶液（0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ）。结束反应后

离心（5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，10 min），取上清液加入 7.5 mL 体积分数为 60% 的硫酸溶液，70 $^{\circ}\text{C}$ 水浴反应 50 min，冷却后于 378 nm 测定吸光度^[16]。

$$A_0 = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

A_0 ——胆酸盐结合率，%；

A_1 ——反应前胆酸盐浓度， $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ；

A_2 ——反应后胆酸盐浓度， $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.2.7.3 胰脂肪酶抑制活性

将 50 μL 不同浓度的多糖样品溶液和 50 μL 胰脂肪酶（质量浓度为 5 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ）在 37 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 10 min。之后加入 100 μL 对硝基苯基乙酸酯（2 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ），37 $^{\circ}\text{C}$ 反应 15 min，405 nm 下测定吸光度。阳性对照采用奥利司他^[17]。按以下公式计算胰脂肪酶抑制活性：

$$A_i = (1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}) \times 100\% \quad (8)$$

式中：

A_i ——胰脂肪酶抑制率，%；

A_1 ——样品组溶液的吸光度（含胰脂肪酶）；

A_2 ——样品组溶液的吸光度（不含胰脂肪酶）；

A_3 ——胰脂肪酶组溶液的吸光度（不含样品）。

1.2.8 黑木耳多糖果冻配方优化

1.2.8.1 黑木耳多糖果冻工艺流程

凝胶剂的预处理：用蒸馏水将木糖醇、柠檬酸钾、卡拉胶、魔芋胶、氯化钾和黑木耳多糖在 85 $^{\circ}\text{C}$ 条件下搅拌加热溶解。混合熬煮：将步骤 A 中预处理好的凝胶剂加热溶解后，冷却到 60 $^{\circ}\text{C}$ 左右加入柠檬酸进行调配，并搅拌均匀。灌装灭菌：趁热灌装至果冻杯中，封口后置于 85 $^{\circ}\text{C}$ 热水保持 15 min 进行杀菌。

1.2.8.2 黑木耳多糖果冻感官品质测定

采用评分检验法进行感官评估，以果冻品质的感官评定标准（见表 2）为依据。基于代表果冻产品感官特征的四个指标：色泽、稳定性、口感和组织形态制定综合评分标准，其中色泽和稳定性各占 20 分，口感占 30 分，组织形态占 30 分，总分为 100 分。邀请 10 位感官品评员根据这一标准进行评分，取平均值作为最终评分结果。

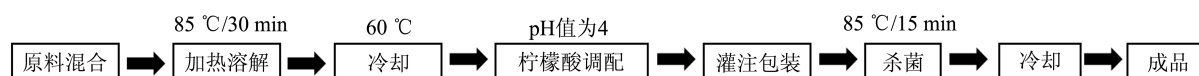


图 1 黑木耳多糖果冻制作工艺路线图

Fig.1 Process roadmap for making *Auricularia auricula* polysaccharides jelly

表 2 黑木耳多糖果冻感官品评表
Table 2 Sensory evaluation table of *Auricularia auricula*
polysaccharides jelly

项目	评定标准	分值
色泽 20	色泽均匀，无沉淀，半透明状	14~20
	色泽较均匀，无沉淀，较透明	7~13
	色泽不均匀，有沉淀	0~6
滋味与口感 30	酸甜可口，无异味	25~30
	较酸或较甜，无异味	16~24
	过酸或过甜，无异味	8~15
	有异味	1~7
组织状态 30	组织均匀细腻，表面光泽，无气泡	25~30
	组织较均匀细腻，表面较有光泽，起泡较少	16~24
	组织较细腻，表面不光泽，有气泡组	8~15
	组织不均匀细腻，表面不光泽，气泡较多	1~7
稳定效果 20	稳定效果好，析水少	14~20
	稳定效果较好，析水较少	7~13
	稳定效果不好，析水量较多	0~6
总分 100 分		

1.2.8.3 单因素实验

木糖醇添加量对黑木耳多糖果冻的影响：在配方为 1% 复配胶（*m/V*），0.1% 柠檬酸钾（*m/V*）、卡拉胶与魔芋胶的配比为 3:2 的情况下，考察木糖醇添加量为 11%、15%、19%、23%、27%（*m/V*）对果冻品质的影响。

黑木耳多糖添加量对黑木耳多糖果冻的影响：在配方为 0.5% 复配胶（*m/V*），11% 木糖醇（*m/V*）、0.1% 柠檬酸钾（*m/V*）、卡拉胶与魔芋胶的配比为 3:2、考察多糖在 0.1%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%（*m/V*）条件下对果冻品质的影响。

复配胶添加量对黑木耳多糖果冻的影响：在配方为 11% 木糖醇（*m/V*）、0.1% 柠檬酸钾（*m/V*）、卡拉胶与魔芋胶的配比为 3:2、浓度为 0.5%（*m/V*）的情况下，分别添加 0.1%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%（*m/V*）的复配胶进行单因素实验，确定复配胶的添加量^[8]。

1.2.8.4 正交实验

以单因素实验的结果为基准，选择木糖醇、复合胶添加量、黑木耳多糖添加量作为黑木耳多糖果冻的影响因素，进行 L9(3³) 正交实验，通过感官评分进行筛选；正交实验因素与水平设计见表 3。

1.2.9 黑木耳多糖果冻品质的测定

1.2.9.1 感官品质测定

通过正交试验优化的果冻与市售的两种果冻进行感官评定。以表 2 为依据采用评分检验法进行感官评

估，邀请 10 位受过专业培训的感官品评员进行评分，取平均值作为最终评分结果

表 3 正交实验因素与水平设计表
Table 3 Orthogonal experimental factors and horizontal
design table

水平	A 木糖醇/%	B 黑木耳多糖添加量/%	C 复合胶添加量/%
1	7	0.1	0.1
2	11	0.5	0.5
3	15	1	1

1.2.9.2 营养素参考值计算

NRV%（Nutrient Reference Value，营养参考值百分比）是用于评估食品中营养成分含量的一个指标，通常用于食品标签中，以帮助消费者了解产品中所含营养成分对其日常营养摄入的贡献。

$$NRV = \frac{A_0}{A_1} \times 100\%$$
 (9)

式中：

NRV——营养参考值，%；

A₁——营养成分参考的摄入量，g；

A₀——营养素的含量，g。

1.2.9.3 微生物指标测定

对果冻制品进行微生物方向检测。菌落总数鉴定参考 GB 4789.2；大肠菌群测定参照 GB 4789.3 平板计数法；霉菌和酵母测定参考标准 GB 4789.15。

1.2.9.4 可溶性固形物测定

取制备好的黑木耳多糖果冻产品的胶冻部分，用勺子捣碎制备成测试液，用数显糖度计直接测试^[18]。

1.2.9.5 质构特性测定

TPA 模式参数为测试探头为 P/50；测试速度均为 1.00 mm·s⁻¹；下压高度为 10.00 mm；触发力 5.00 g^[18]。

1.2.10 数据处理

试验重复 3 次；采用 Origin 2018 和 GrahPad Prism 7 制图；采用 Design-Expert V8.0.6 软件响应面设计；数据以平均值 ± 标准差表示。通过 SPSS 评估显著性，P 值 0.05 为显著性阈值。

2 结果与讨论

2.1 不同提取条件对黑木耳多糖得率的影响

图 2a 显示了不同的提取温度下黑木耳多糖的得率。当在 60~90 ℃ 范围之间提取多糖时，黑木耳多糖得率迅速增加，提取温度为 80 ℃ 时，黑木耳多糖得率最大达到 13.54%。随着温度的持续升高，黑木耳多糖的得率没有显著增加。高温可以增加多糖的溶出，但温

度过高可能会导致多糖的降解,故选择 80 ℃ 的提取温度用于下一步研究。料液比在 1:60~1:90 (m/V) 范围内得率呈现先增加后减少的趋势。当料液比为 1:70 (m/V) 时达到最大,得率为 15.38%。提高料液比可以扩大内部与外部溶剂之间的扩散速率,增强多糖的溶解。然而,溶剂过多会延长扩散距离,这会导致多糖的损失^[19]。Wang 等^[20]通过单因素实验发现在料液比 1:70 (m/V) 时得率最高,当料液比继续增加时得率显著下降,当料液比从 1:90 (m/V) 增加到 1:100 (m/V) 没有显著变化。提取时间对黑木耳多糖得率的影响见图 2c,得率随着提取时间的延长先增加后减少,当提取时间在 3 h 时,得率达到 16.50%。3 h 以后,随着时间的逐渐增加对多糖的得率没有显著性的提升作用。

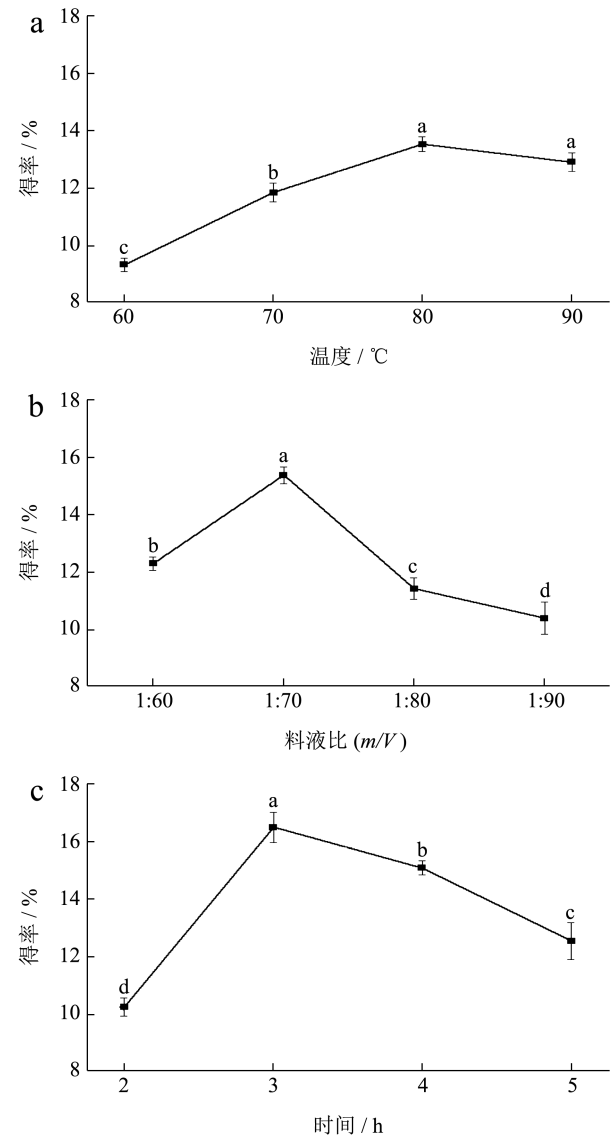


图 2 不同提取条件对黑木耳多糖得率的影响

Fig.2 The effects of different extraction conditions on the yield of polysaccharides in *Auricularia auricula*

注: 不同小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。下图同。

2.2 响应面优化黑木耳多糖提取工艺

响应面法优化多糖提取工艺。通过提取时间,提取温度和料液比为自变量进行提取条件优化,17 组试验的响应值见表 4。通过软件预测模型拟合优度。采用 Design Expert V 8.0.6 软件进行表 4 中的实验数据进行多元回归拟合,获得响应值黑木耳多糖得率 (Y) 对提取时间 (A)、料液比 (B)、温度 (C) 真实值的回归模型方程: $Y=18.23-0.18A-1.04B+0.85C-2.36AB-0.07AC-2.11BC-2.45A^2-2.5B^2-2.58C^2$ 。对响应面实验结果进行方差分析,结果如表 5 所示,因变量与全部自变量之间的线性关系显著 ($R^2=0.8310$),模型显著 ($P=0.0454$),失拟项不显著 ($P>0.05$),说明该模型可以解释 83.10% 的变化。图 3 直观地反映了各因素交互作用对响应值的影响。各因素的响应面图陡峭程度明显,其等高线图均呈现椭圆形,说明提取时间 (A)、料液比 (B)、温度 (C) 有一定的交互作用,对黑木耳多糖的得率具有一定的影响。根据优化结果,由该回归模型得到黑木耳多糖最佳提取工艺为:提取温度 83.40 ℃,提取时间 3.17 h,料液比 1:65.70 (m/V)。据此预测黑木耳多糖的理论最高得率为 18.58%。在此基础上考虑到实际情况,在提取温度 80 ℃、提取时间 3 h、料液比 1:70 (m/V) 的改进条件下进行验证实验,重复 3 次,黑木耳多糖的平均得率为 17.93%。

表 4 响应面实验设计结果

Table 4 Response surface experimental design results

序号	A: 提取时间/h	B: 料液比 (m/V)	C: 提取温度/℃	Y: 得率/%
1	0	-1	-1	9.82
2	1	-1	0	17.91
3	0	0	0	14.61
4	-1	0	1	14.31
5	1	0	1	13.38
6	0	1	-1	14.36
7	0	0	0	19.72
8	1	1	0	8.71
9	-1	-1	0	13.12
10	0	1	1	12.26
11	0	0	0	19.32
12	0	0	0	18.90
13	-1	1	0	13.37
14	0	-1	1	16.17
15	1	0	-1	12.23
16	0	0	0	18.6
17	-1	0	-1	12.88

表 5 响应面法回归模型的方差分析

Table 5 ANOVA analysis of response surface methodology regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	143.93	9	15.99	3.82	0.045 4	*
A 提取时间	0.26	1	0.26	0.063	0.809 1	
B 料液比	8.66	1	8.66	2.07	0.193 3	
C 温度	5.84	1	5.84	1.40	0.276 0	
AB	22.31	1	22.31	5.34	0.054 2	
AC	0.02	1	0.02	4.752E-003	0.947 0	
BC	17.87	1	17.87	4.27	0.077 5	
A ²	25.29	1	25.29	6.05	0.043 5	
B ²	26.31	1	226.31	6.29	0.040 5	
C ²	28	1	28	6.69	0.036 1	
残差	29.27	7	4.18			
失拟项	12.19	3	4.06	0.95	0.496 2	not significant
纯误差	17.08	4	4.27			
总和	173.20	16				

$R^2=0.831\ 0$ $R^2_{Adj}=0.613\ 7$ Adeq Precisor=5.442C.V.%=13.92

注: * 表示为显著 $P<0.05$ 。

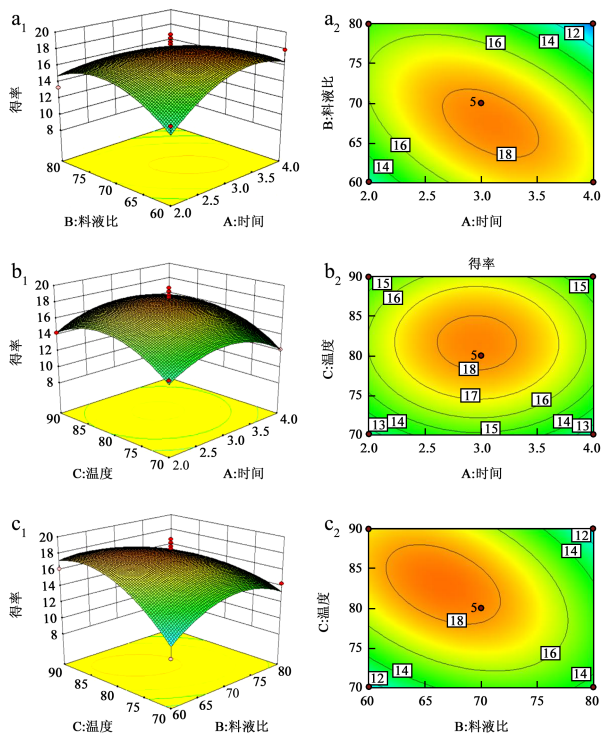


图 3 各因素对黑木耳多糖得率的作用图及等高线图

Fig.3 Effect diagram and contour diagram of each factor on the yield of polysaccharides in *Auricularia auricula*

2.3 黑木耳多糖对DPPH自由基和ABTS⁺自由基的清除能力

DPPH 自由基清除率和 ABTS⁺ 自由基清除率被广泛用于测定生物样品、分类物质和食品的抗氧化能

力^[21]。黑木耳多糖清除 DPPH 自由基的能力如图 4a 所示。随着质量浓度的增加，清除率均呈上升趋势。当质量浓度达到 2 mg·mL⁻¹ 时，黑木耳多糖对 DPPH 自由基清除率为 60.34%。由图 4b 可知黑木耳多糖对 ABTS⁺ 自由基表现出一定的清除能力，随着质量浓度的增加，清除率均呈上升趋势。当质量浓度达到 2 mg·mL⁻¹ 时，黑木耳多糖对 ABTS⁺ 自由基的清除率为 54.19%。综合上述结果，黑木耳多糖具有显著的抗氧化活性多糖，证明黑木耳在开发抗氧化活性产品方面具有广阔前景。Gul 等^[22]提取的木耳多糖也具有较好的体外抗氧化作用，当多糖质量浓度为 2 mg·mL⁻¹ 时对 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基的清除率分别为 67.93% 和 51.01%。Lei 等^[23]通过热水浸提提取的木耳粗多糖对 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基都具有显著的清除率，清除率分别为 34.38% 和 73.87%（多糖质量浓度为 3.2 mg·mL⁻¹）。综上所述，黑木耳多糖具有一定的抗氧化特性，可以通过清除体内的自由基，减轻氧化应激对细胞的损害。

2.4 黑木耳多糖α-淀粉酶和α-葡萄糖苷酶的抑制效果

过量摄入碳水化合物会引起餐后血糖升高，α-淀粉酶可将糖分解成低聚糖，促进食物的消化吸收^[10]。α-葡萄糖苷酶作为生物体葡萄糖代谢途径中的必需酶，可以水解葡萄糖苷键并释放葡萄糖作为产物^[24]。因此可以通过抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性阻碍碳水化合物的消化吸收，从而达到降低血糖的作用^[25]。

由图 5a 可以看出, 当质量浓度在 $0.625\sim 10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 黑木耳多糖对 α -淀粉酶抑制率呈现剂量依赖性, 随浓度的增加逐渐增加。当质量浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 多糖对 α -淀粉酶抑制作用达到最高, 抑制率达到 68.71%。在质量浓度 $0.625\sim 10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 范围内, 黑木耳多糖对 α -糖苷酶具有较好的抑制作用。当质量浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 多糖对 α -葡萄糖苷酶抑制作用达到 63.99% 的抑制率。Lu 等^[26]提取的木耳多糖在质量浓度 $1\sim 5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的时候对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制活性都高于本研究结果, 这可能是因为提取方法有所不同。故黑木耳多糖可以抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的活性并降低葡萄糖的释放速率, 从而抑制糖类的消化和吸收, 有效减少热量摄入。

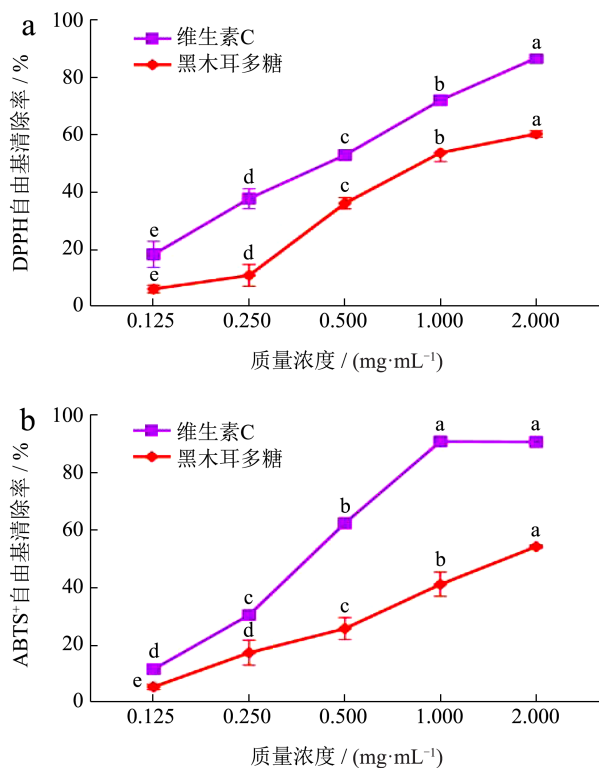


图 4 黑木耳多糖对 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基的清除率

Fig.4 The scavenging rate of *Auricularia auricula* polysaccharides on DPPH and ABTS⁺ free radicals

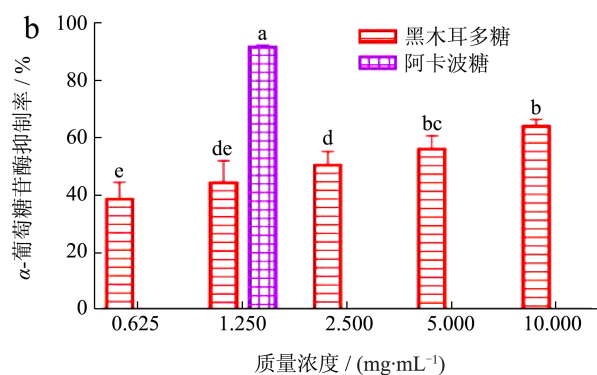
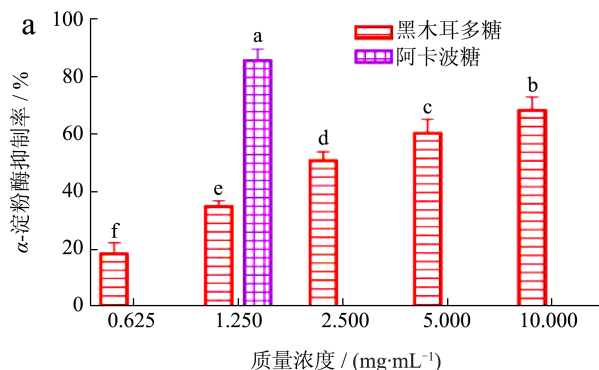


图 5 黑木耳多糖对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制率

Fig.5 Inhibition rates of polysaccharides from *Auricularia auricula* on alpha amylase and alpha glucosidase

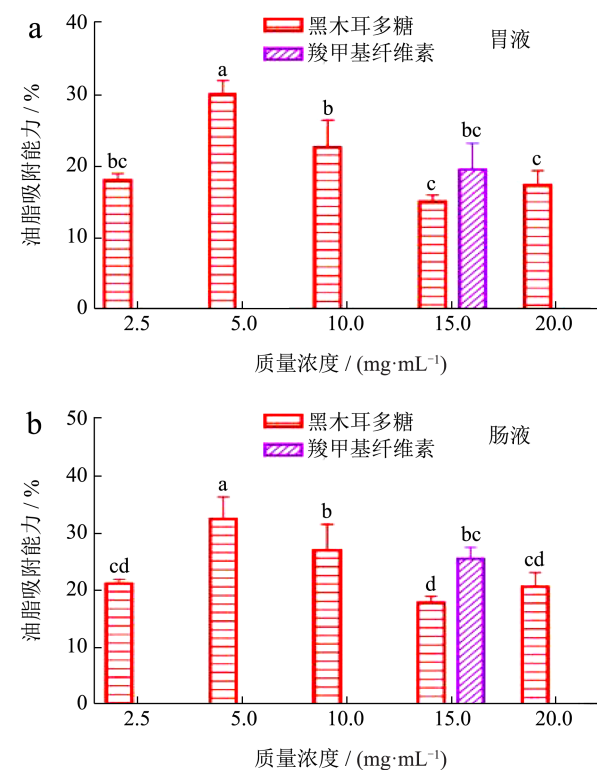


图 6 黑木耳多糖在胃液和肠道中对油脂的吸附能力

Fig.6 Adsorption capacity of polysaccharides from *Auricularia auricula* for oil in gastric juice and intestine

2.5 黑木耳多糖油脂吸附能力

黑木耳多糖对油脂吸附的能力如图 6 所示, 黑木耳多糖在 $2.5\sim 20\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 质量浓度范围内的油脂吸附能力与多糖浓度呈先增加后降低趋势。在胃液和肠道环境下, 黑木耳多糖对油脂的吸附率在质量浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时达到最大值, 分别为 30.09% 和 32.66%。随着浓度增加, 多糖可能不能充分溶解, 从而导致其与油脂的接触面积减少, 因此对油脂的吸附能力降低。综上所述黑木耳多糖具有良好的油脂吸附

能力,可以有效降低人体摄入的脂肪量,以帮助控制血脂水平,预防相关慢性疾病,如高血脂、糖尿病等。

2.6 黑木耳多糖胆酸盐结合能力和对胰脂肪酶的抑制能力

胆汁酸在脂肪的消化和吸收中起着关键作用。人体 90% 为结合型胆汁酸,并且以钠盐形式存在,胆酸盐的结合能力反应多糖的生物利用度和代谢^[27]。故本研究选取具有代表的牛黄胆酸钠、胆酸钠和脱氧胆酸钠作为考察多糖对胆酸盐的结合能力。图 7a~7c 显示了黑木耳多糖和降胆固醇剂羧甲基纤维素在体外对胆汁酸的结合能力。在质量浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,黑木耳多糖对胆酸钠结合率、牛黄胆酸钠结合率和脱氧胆酸钠结合率分别为 62.02%、56.86% 和 59.43%,而阳性对照羧甲基纤维素对胆酸钠结合率、牛黄胆酸钠结合率和脱氧胆酸钠结合率分别为 45.66%、50% 和 55.66%,黑木耳多糖对胆汁酸结合能力高于羧甲基纤维素阳性对照组。Gai 等^[28]发现黑木耳多糖可以通过改变肠道菌群组成,尤其是乳酸杆菌和双歧杆菌的增加,会导致胆汁酸发生变化,脱氧胆酸含量增加,从而提高多糖对胆酸盐的结合能力。故黑木耳多糖可以促进肝脏中胆固醇的代谢,从而降低血液中的胆固醇水平,并进一步减少血清中胆汁盐的浓度。

胰脂肪酶是催化甘油三酯的重要酶类,通过抑制该酶可以有效控制高脂血症和肥胖症^[17]。故本实验探究了黑木耳多糖对胰脂肪酶的抑制作用,结果如图 7d 所示,黑木耳多糖在质量浓度 $0.625\sim 10.0\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时对胰脂肪酶有抑制趋势,并随着浓度增加抑制作用增强。其中,在质量浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,黑木耳多糖对胰脂肪酶抑制率最高,为 75.49%。且黑木耳多糖表现出的胰脂肪酶抑制活性,其活性与奥利司他相似。综上所述,黑木耳多糖有潜力成为高血脂症人群的功能性食品补充剂候选者。

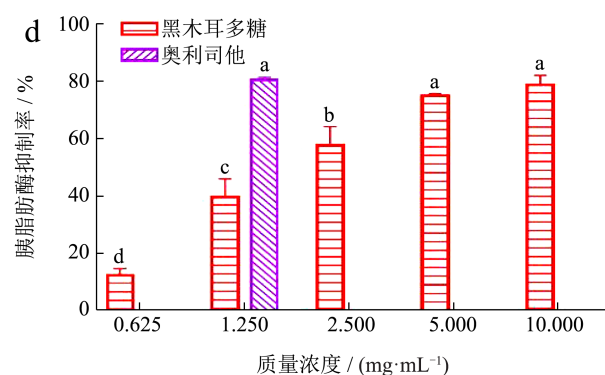
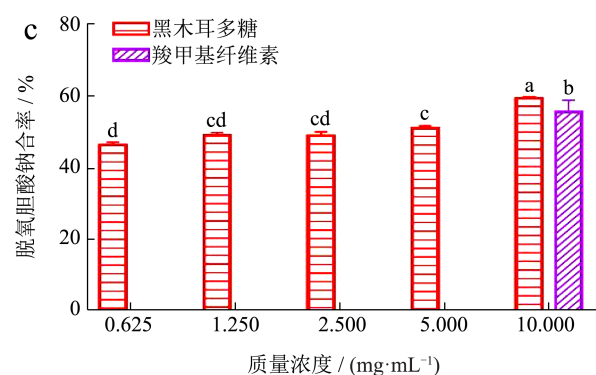
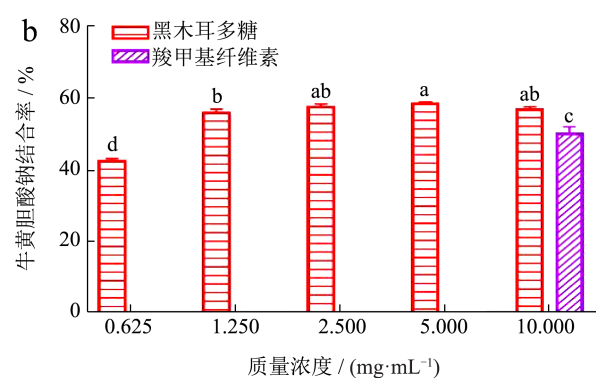
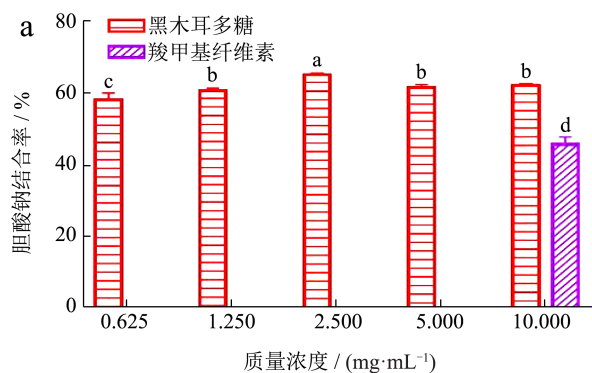


图 7 黑木耳多糖对牛黄胆酸钠结合率、胆酸钠结合率、脱氧胆酸钠结合率和对胰脂肪酶的抑制率

Fig.7 The binding rate of *Auricularia auricula* polysaccharides to sodium taurocholate, sodium cholate, sodium deoxycholate, and its inhibitory rate on pancreatic lipase

2.7 黑木耳多糖果冻配方优化结果

由图 8a 可知,随着木糖醇添加量的增加,黑木耳多糖果冻的感官评价随木糖醇糖量的增加而显著降低,当添加量为 11% 时评分最高,在添加量 15%~23% 时,评分逐渐降低。黑木耳多糖果冻中添加木糖醇可以减缓酸度,增加甜度,平衡口感,但随着添加量过多口感偏甜,触感黏腻。由图 8b 可知,当黑木耳多糖添加量为 0.1% 和 0.5% 时,感官评分逐渐升高较高,呈现淡黑色光泽,韧性良好,无杂质,结构紧密,随着黑

木耳多糖添加量逐渐增加，感官评分逐渐下降，颜色越来越深，且结构逐渐松散，弹性也逐渐减弱。故选择 0.1%、0.5%、1% 的多糖浓度添加水平进行正交试验。由图 8c 可知，感官评分随复合胶添加量先增加后下降，在复合胶添加量为 0.5% 的时候感官评分最高，复合胶比例高于 1% 时，质地坚韧，具有较高的硬度和显著的咀嚼阻力，呈现出坚固的口感特征，感官评分逐渐下降。

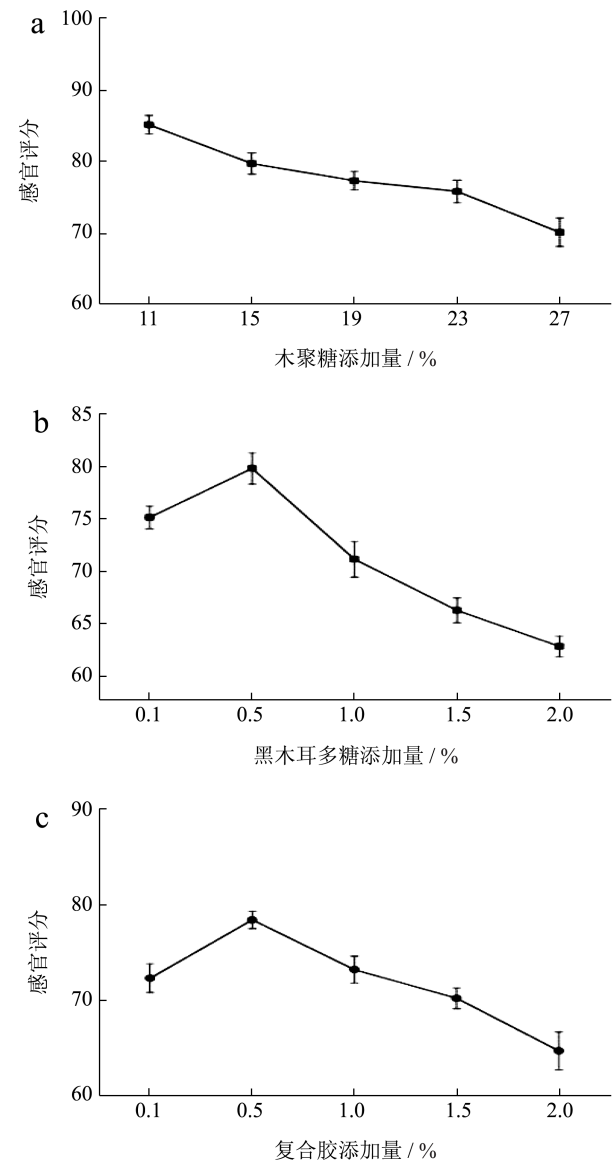


图 8 不同添加条件对黑木耳多糖果冻感官评分的影响
Fig.8 The different effects of adding additions on the sensory score of *Auricularia auricula* polysaccharides jelly

由表 6 可知，各因素的影响顺序为木糖醇添加量 (A) > 黑木耳多糖添加量 (B) > 复合胶添加量 (C)，通过 K 值可得最佳组合 A3，B2，C2 即木糖醇添加量 15%，黑木耳多糖添加量 0.5%，复合胶添加量 0.5%。在该配方下制备的黑木耳多糖果冻产品

酸甜可口，色泽均一，口感细腻，无异味，结构紧密富有弹性。

表 6 正交试验表				
Table 6 Orthogonal experimental table				
试验号	木糖醇添 加量 (A)	黑木耳多糖 添加量(B)	复合胶添 加量(C)	感官 评分
1	1	1	1	68.8
2	1	2	2	77.2
3	1	3	3	64.4
4	2	1	2	78.8
5	2	2	3	78.4
6	2	3	1	72.4
7	3	1	3	79.7
8	3	2	1	75.6
9	3	3	2	76.1
K1	210.4	227.3	216.8	
K2	229.6	231.2	232.1	
K3	231.4	212.9	222.5	
k1	70.13	75.76	72.26	
k2	76.53	77.06	77.36	
k3	77.13	70.96	74.16	
R	7	6.1	5.1	
最优水平	A3	B2	C2	
预测最佳组合	A3B2C2			

2.8 感官评价结果

通过与市售的两种果冻和最优配方的黑木耳多糖果冻进行感官评定，如表 7 所示，黑木耳多糖果冻感官评分低于市售果冻，主要原因可能为黑木耳独特的食用菌风味在一定程度上影响整体口感，市售果冻可能因其食品添加剂等使得产品色泽风味更佳。

表 7 黑木耳多糖果冻感官评价	
Table 7 Sensory evaluation of <i>Auricularia auricula</i> polysaccharides jelly	
样品名称	感官评分
JinGuan	86.3
WangWang	95
黑木耳多糖果冻	80

2.9 主要营养成分分析结果

黑木耳多糖果冻营养成分测定的结果如表 8 所示，脂肪含量为零，碳水化和物质量占比 6%。同时本研究开发的营养型果冻使用了代糖木糖醇，能量低，是一款低糖低脂的低热量食品，可作为一些特殊人群如肥胖、糖尿病患者的健康零食补给。

表 8 黑木耳多糖果冻营养成分分析结果
Table 8 Analysis results of nutritional components in
Auricularia auricula polysaccharides jelly

项目	每 100 g	营养素参考值 /%
能量	303 kJ	4
蛋白质	0 g	0
脂肪	0 g	0
碳水化合物	17.80 g	6
钠	2.23 mg	0

2.10 微生物指标测定结果

经检测，黑木耳多糖果冻菌落总数检测结果为：菌落总数 < 10 CFU/g，大肠菌群 < 0.3 MPN/g，霉菌 < 10 CFU/g，酵母 < 10 CFU/g。通过与国家标准对比，其结果显示，本研究开发的营养型果冻的各项微生物指标均符合 GB/T 19883-2018 果冻标准的相关指标^[29]。

2.11 可溶性固形物含量测定

可溶性固形物是果冻产品中溶解的固体成分，包括糖、酸、香料和其他风味物质，这些成分直接影响果冻的口感、甜度和风味，因此测定其可溶性固形物含量有助于确保产品的感官质量^[30]。黑木耳多糖果冻

经数显糖度计测量结果为 18.7%，符合 GB 19883-2018 标准^[29]。

2.12 质构特性测定结果

质地是分析任何食品质量属性的重要参数，质地特性主要包括硬度、黏聚性、弹性、粘性和咀嚼性，通过质地特性可多维度量化果冻的感官体验与结构特性^[31]。对黑木耳多糖果冻的质构特性做了分析，并与市面上常见的金冠、旺旺、亲亲、喜之郎、蜡笔小新的果冻产品作对比，具体结果见表 9，其中弹性最好是亲亲果冻，硬度最大是蜡笔小新，胶着性和咀嚼型最高的是亲亲果冻。从硬度比较，黑木耳多糖果冻高于喜之郎和金冠市售果冻，黑木耳多糖果冻在弹性方面和喜之郎果冻接近，在回复性方面和蜡笔小新果冻接近。市售果冻产品的胶着性在 80.77~216.8 之间，黑木耳多糖果冻的胶着性为 139.73，在市售产品范围之间，故本研究开发的黑木耳多糖果冻在口感和质地上已经基本接近市面上销售的果冻制品，符合市售标准。这说明黑木耳多糖在胶凝方面发挥着作用，在一定程度上减少食品胶的使用。此外本研究开发的黑木耳多糖果冻兼具健康营养的功能性附加值，如抗氧化、降糖降脂功能活性。故黑木耳多糖在感官品质和营养属性上具备一定优势，有广阔的市场前景。

表 9 市售果冻与与黑木耳多糖果冻质构对比

Table 9 Comparison of texture between commercially available jelly and *Auricularia auricula* polysaccharides jelly

样品名称	回复性/%	弹性/%	硬度/g	黏聚性/(g·s)	胶着性	咀嚼性
JinGuan	0.09 ± 0.01	0.99 ± 0.02	315.36 ± 10.02	0.27 ± 0.01	86.13 ± 12.45	85.26 ± 17.19
WangWang	0.14 ± 0.01	1 ± 0.02	500.3 ± 8.65	0.36 ± 0.02	181.73 ± 14.51	181.73 ± 18.3
QinQin	0.17 ± 0.02	1.03 ± 0.06	506.75 ± 12.45	0.43 ± 0.05	216.8 ± 24.89	223.79 ± 20.15
XiZhiLang	0.07 ± 0.01	0.89 ± 0.01	390.48 ± 20.10	0.2 ± 0.03	80.77 ± 5.87	75 ± 10.58
LaBiXiaoXin	0.11 ± 0.02	0.81 ± 0.04	540.89 ± 24.21	0.32 ± 0.04	171.73 ± 42	138.35 ± 26.73
黑木耳多糖果冻	0.10 ± 0.02	0.92 ± 0.02	450.77 ± 14.25	0.31 ± 0.04	139.73 ± 10.57	128.56 ± 5.47

3 结论

黑木耳中含有丰富的多糖，并具有丰富的生物活性。本论文在传统的果冻工艺上添加黑木耳多糖，研制出一款口感细腻并富有弹性的黑木耳多糖果冻，延长了食用菌多糖深加工产业链。试验通过响应面优化黑木耳多糖提取工艺，多糖得率为 17.93%。在最佳工艺下提取的黑木耳多糖对 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基具有良好的清除活性以及油脂吸附能力。黑木耳多糖对胆酸钠、牛黄胆酸钠和脱氧胆酸钠均具有结合能力，表明黑木耳多糖具有降低胆固醇的潜力。此外，黑木耳多糖还能够抑

制 α- 淀粉酶、α- 葡萄糖苷酶以及胰脂肪酶活性，显示出优异的体外降糖降脂活性。基于黑木耳多糖的诸多生物活性，将其应用于果冻产品开发，通过正交试验得到最佳配方，在此条件下的黑木耳多糖果冻口感细腻、凝胶香甜、弹滑适口，满足果冻质地特性。并进一步对黑木耳多糖果冻的营养成分、可溶性固形物含量、质构和卫生指标进行检测，结果均符合国家标准并符合市售标准，该产品低糖低脂，适用于肥胖及高血糖的特殊人群食用。本研究的结论将有助于进一步丰富对黑木耳多糖活性的理解，为多糖在功能性食品和生物医药领域的开发与利用提供理论基础和技术支持。

参考文献

- [1] YUAN Y, WU F, SI J, et al. Whole genome sequence of *Auricularia heimuer* (Basidiomycota, Fungi), the third most important cultivated mushroom worldwide [J]. Genomics, 2019, 111(1): 50-58.
- [2] FARAKI A, NOORI N, GANDOMI H, et al. Effect of *Auricularia auricula* aqueous extract on survival of *Lactobacillus acidophilus* La-5 and *Bifidobacterium bifidum* Bb-12 and on sensorial and functional properties of synbiotic yogurt [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(2): 1254-1263.
- [3] ZHANG J X, CHEN Q, HUANG C Y. (). History, current situation and trend of edible mushroom industry development [J]. Mycosystema, 2015, 34: 524-540.
- [4] 应国华, 何建芬, 吕明亮, 等. 龙海市黑木耳产业发展态势与相关建议[J]. 食药菌, 2019, 27(1): 3.
- [5] JMAC E, JMR B, JQAC E, et al. Isolation, structural characterization and bioactivities of polysaccharides and its derivatives from *auricularia* -a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 102-113.
- [6] ZHAO S, RONG C, LIU Y, et al. Extraction of a soluble polysaccharide from *Auricularia polytricha* and evaluation of its anti-hypercholesterolemic effect in rats [J]. Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2015, 122: 39-45.
- [7] NGUYEN T L, CHEN J, HU Y L, et al. *In vitro* antiviral activity of sulfated *Auricularia auricula* polysaccharides [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(3): 1254-1258.
- [8] 朱艳云. 基于银耳多糖的复配凝胶特性研究及其在果冻中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [9] DEVI L M, BADWAIK L S. Development of functional coconut water jelly by incorporating anthocyanin microcapsules and its characterization [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2025, 19(3): 1981-1991.
- [10] 刘楠楠. 黑木耳多糖的提取纯化、结构表征及降糖活性研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
- [11] GB/T 15672-2009 食用菌中总糖含量的测定[S].
- [12] AHN S, HALAKE K, LEE J. Antioxidant and ion-induced gelation functions of pectins enabled by polyphenol conjugation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 101: 776-782.
- [13] HU Q, WANG T, ZHOU M, et al. *In vitro* antioxidant-activity evaluation of gallic-acid-grafted chitosan conjugate synthesized by free-radical-induced grafting method [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(29): 5893-5900.
- [14] RENGASAMY K R, ADEROGB M A, AMOO S O, et al. Potential antiradical and alpha-glucosidase inhibitors from *Ecklonia maxima* (Osbeck) Papenfuss [J]. Food Chemistry, 2013, 141(2): 1412-1415.
- [15] 李喜阁. 银耳多糖的分离纯化及生物活性研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
- [16] 侯珮琳, 赵肖通, 张彦青, 等. 绿豆蛋白降血脂水解物的制备及纯化工艺[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 8.
- [17] 李卫. 桔梗多糖的提取纯化及糖脂调节活性研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2023.
- [18] 于静, 周琼. 富硒魔芋茶冻的研制[J]. 湖北农业科学, 2024, 63(6): 167-172.
- [19] HU H, ZHAO Q, PANG Z, et al. Optimization extraction, characterization and anticancer activities of polysaccharides from mango pomace [J]. Int. J. Biol. Macromol, 2018, 117: 1314-1325.
- [20] WANG Y, WANG C, GUO M. Effects of ultrasound treatment on extraction and rheological properties of polysaccharides from *Auricularia cornea* var. Li [J]. Molecules, 2019, 24(5): 939.
- [21] XU S, ZHANG Y, JIANG K. Antioxidant activity *in vitro* and *in vivo* of the polysaccharides from different varieties of *Auricularia auricula* [J]. Food Function, 2016, 7(9): 3868-3879.
- [22] KHASKHELI SG, ZHENG W, SHEIKH SA, et al. Characterization of *Auricularia auricula* polysaccharides and its antioxidant properties in fresh and pickled product [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 81: 387-395.
- [23] LEI M, WANG M, MA W, et al. *In vitro* antioxidant activity of the polysaccharide from *Auricularia auricula* and its structural characterisation [J]. Natural Product Research, 2025, 39(4): 734-741.
- [24] GUO D, LEI J, HE C, et al. *In vitro* digestion and fermentation by human fecal microbiota of polysaccharides from *clitocybe squamulose* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 208: 343-355.
- [25] TANG J, HE Z, ZHANG B, et al. Structural properties, bioactivities, structure-activity relationships and bio-applications of polysaccharides from *Auricularia auricula*: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280(Pt 3): 135941.
- [26] LU A, YU M, SHEN M, et al. Preparation of the *Auricularia auricular* polysaccharides simulated hydrolysates and their hypoglycaemic effect [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 1139-1145.
- [27] KONG B, WANG L, CHANG J Y, et al. Guo Mechanism of tissue-specific farnesoid X receptor in suppressing the expression of genes in bile-acid synthesis in mice [J]. Hepatology, 2012, 56 (3): 1034-1043.
- [28] GAI Z, VISENTIN M, GUI T, et al. Effects of farnesoid X receptor activation on arachidonic acid metabolism *NF-κB* signaling, and hepatic inflammation [J]. Molecular Pharmacology, 2018, 94 (2): 117.
- [29] GB/T 19883-2018 果冻[S].
- [30] KOWALSKA H, MARZEC A, KOWALSKA J, et al. Development of apple chips technology [J]. Heat Mass Transfer, 2018, 54: 3573-3586.
- [31] WANG J Y, CHEN P, XIAO H, et al. Optimization of production technology of mint and green bean jelly by Orthogonal experiment [J]. Grain and Oil, 2018, 31(3): 65-67.