余金毅,颜恩召,李锦鹏,等. 发酵对白扁豆花粗多糖在热、酸及灭菌处理后结构和生物活性稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 228−239. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070041

YU Jinyi, YAN Enzhao, LI Jinpeng, et al. Effect of Fermentation on the Structure and Biological Activity Stability of Crude Polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. after Heat, Acid, and Sterilization Treatments[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 228−239. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070041

·生物工程·

发酵对白扁豆花粗多糖在热、酸及灭菌处理后结构和生物活性稳定性的影响

余金毅[1,2],颜恩召[1,2],李锦鹏[1],王　蕊[1],李诗彤[1],李　慧[1],牛慧芳[1],张红星[1],王红波[1,2,3,*]

(1.江汉大学生命科学学院,药食同源特色资源综合利用创新中心,湖北武汉 430056;
2.湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心,湖北武汉 430056;
3.湖北省健康代糖产品企校联合创新中心,湖北武汉 430056)

摘　要: 白扁豆花粗多糖具有抗氧化、降糖、降脂等生物活性，而在实际应用中，各种极端条件如高温冲泡、胃酸环境和灭菌处理会影响其生物活性稳定性。为了研究发酵对白扁豆花粗多糖在极端条件下生物活性稳定性的影响，通过热、酸及灭菌处理，测定了发酵前后白扁豆花粗多糖的结构和活性变化，以评价发酵对其生物活性稳定性的影响。结果表明，结构特征方面，经过 100 ℃，3.5 h 处理、pH=1 处理、121 ℃，30 min 处理后，发酵前后白扁豆花粗多糖的分子量均降低，且发酵后的分子量在各处理条件下显著低于发酵前。生物活性方面，热、酸及灭菌处理后，发酵提高了白扁豆花粗多糖对 2,2'-联氮基双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) 二铵盐阳离子（$ABTS^{+}$）自由基的清除率，表现出良好的抗氧化稳定性；热和酸处理后，发酵提高了对 α-淀粉酶的抑制率，而在 121 ℃，20 min 的灭菌处理条件下，发酵未提高其抑制率，但在其他条件下均有所提高；热、酸及灭菌处理后，大部分条件下发酵后白扁豆花粗多糖对甘氨脱氧胆酸钠和牛磺脱氧胆酸钠的结合能力较发酵前有所降低。综上所述，发酵过程能够提升白扁豆花粗多糖的抗氧化能力与降血糖效果，并增强其稳定性。尽管在降血脂活性方面未观察到明显提升，但发酵处理依然保障了该多糖在此方面的稳定表现。本研究为发酵对白扁豆花粗多糖主要生物活性稳定性提供了理论依据，为其在功能食品领域的应用提供了实践指导。

关键词: 白扁豆花粗多糖,发酵,稳定性,结构特征,生物活性
中图分类号: TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0228−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070041
本文网刊:

Effect of Fermentation on the Structure and Biological Activity Stability of Crude Polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. after Heat, Acid, and Sterilization Treatments

YU Jinyi[1,2], YAN Enzhao[1,2], LI Jinpeng[1], WANG Rui[1], LI Shitong[1], LI Hui[1], NIU Huifang[1], ZHANG Hongxing[1], WANG Hongbo[1,2,3,*]

(1.Innovation Center for Comprehensive Utilization of Food and Medicine Homologous Specialty Resources, School of Life Sciences, Jianghan University, Wuhan 430056, China;
2.Hubei Province Engineering Research Center for Legume Plants, Wuhan 430056, China;
3.Hubei Enterprise-College Joint Innovation Center of Healthy Sugar Substitute Product, Wuhan 430056, China)

Abstract: Crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. exhibit various biological activities, including antioxidant, hypoglycemic, and hypolipidemic effects. However, in practical applications, extreme conditions such as high-temperature

收稿日期: 2025−07−04
基金项目: 武汉市属高校产学研项目（CXY202202）;湖北省重点研发计划项目（2022BBA0064）。
作者简介: 余金毅（2000−）,男,硕士研究生,研究方向:食品微生物,E-mail:yu17664424128@126.com。
*** 通信作者:** 王红波（1982−）,男,博士,教授,研究方向:食品加工与安全,E-mail:bobo110110165@sina.com。

infusion, gastric acid environments, and sterilization processes may compromise the stability of their biological activities. To investigate the effect of fermentation on the stability of biological activity of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. under extreme conditions, the structural and activity changes of the polysaccharides before and after fermentation were measured using heat, acid, and sterilization treatments to evaluate the impact of fermentation on the stability of their biological activity. The results indicated that, in terms of structural characteristics, the molecular weight of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. decreased both before and after fermentation, as well as after treatments at 100 ℃ for 3.5 h, pH=1, and 121 ℃ for 30 min. Furthermore, the molecular weight after fermentation was significantly lower than that before fermentation under all treatment conditions. In terms of biological activity, after heat, acid, and sterilization treatments, fermentation enhanced the scavenging rate of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. against the 2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate) diammonium salt cation ($ABTS^+$) radical, demonstrating excellent antioxidant stability. After heat and acid treatments, fermentation increased the α-amylase inhibition rate. However, under sterilization conditions of 121 ℃ for 20 min, fermentation did not enhance inhibition rate, whereas it improved it under all other conditions. After heat, acid, and sterilization treatments, under most conditions, the binding capacity of fermented crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. to sodium glycodeoxycholate and sodium taurodeoxycholate decreased compared to the samples before fermentation. In summary, the fermentation process enhanced the antioxidant capacity and hypoglycemic effects of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L., while improving their stability. Although no significant improvement in hypolipidemic activity was observed, the fermentation process still ensured the consistent performance of the polysaccharide in this regard. This study provides a theoretical basis for the stability of the primary biological activities of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. during fermentation, offering practical guidance for their application in the functional food industry.

Key words: Flos. *Dolichos lablab* L. crude polysaccharide; fermentation; stability; structural characterization; biological activity

白扁豆是一种具有悠久药食两用历史的植物[1]，其花、种子和根等部位被广泛应用于制作多种特色食品。Gao 等[2] 研究发现扁豆的不同部位（花和种子）可能是治疗溃疡性结肠炎的潜在资源，它们通过多种活性成分发挥治疗作用。白扁豆花富含多糖，具有丰富的营养价值[3]，是一种药食同源的食品资源。现代药用植物学研究证实，白扁豆花具有抗菌、抗病毒及抗氧化活性，可用于治疗胃肠功能紊乱、肠易激综合征、腹泻、糖尿病及肥胖症[4−5]。此外，在溃疡性结肠炎小鼠模型中，白扁豆花显著降低了 TNF-α、IL-6 和 IL-1β 等炎症因子的表达，并保护了肠上皮细胞的紧密连接[2]。然而，关于白扁豆花粗多糖的生物活性研究仍较为有限，尤其是其抗氧化、降糖和降脂等方面的深入研究尚少。因此，探讨白扁豆花粗多糖的生物活性稳定性，尤其是在热、酸及灭菌处理后，发酵对其生物活性稳定性的影响，具有重要的科学意义和应用价值。

微生物发酵被广泛应用于生产各类食品，如乳制品、酒精性饮料、发酵果蔬等[6]。研究表明，发酵能显著提高多糖抗氧化[7]、降血糖[8] 和降血脂[9] 等生物活性。在发酵过程中，微生物的代谢作用可能对多糖的结构产生调节，进而影响其功能表现[10]。多糖的结构稳定性是其生物活性的基础，分子量和化学结构的变化可能直接影响多糖的生理功能[11]。已有研究表明，发酵能够通过改变多糖的分子量、糖链结构及官能团的存在形式，增强其抗氧化能力和生物利用度[12]。然而，在实际应用中，多糖常常暴露于热、酸或灭菌处理等极端条件下，这些条件可能导致多糖结构的破坏，从而降低其生物活性[13]。因此，研究白扁豆花粗多糖在不同条件下的结构及其生物活性稳定性变化具有重要的科学意义和应用价值，尤其是在发酵条件下对其结构和生物活性的影响。通过发酵微生物调控白扁豆花粗多糖的结构，可能在不显著破坏其本质特性的情况下，增强其生物活性，这为优化多糖的应用提供了新的研究方向和实践价值。有研究指出，功能性植物多糖在发酵过程中会经历微生物对其结构的微调作用，这种微调有助于提升其生物活性。王庆琳等[14] 研究功能性植物多糖的发酵对其结构和生物活性的影响，强调了发酵过程中微生物对多糖结构的微调作用，以及这种作用对多糖生物活性的提升。Liu 等[12] 研究发酵植物性食品中多糖的结构变化及其对生物活性的影响，指出发酵过程中微生物通过酶的作用和代谢产物的形成，对多糖进行降解、合成和修饰，从而改变其结构，进而影响其生物活性。然而，现有研究尚不足以直接支持通过发酵调节白扁豆花粗多糖结构与功能的可行性，因此，仍需更多关于发酵过程中结构调控与功能增强之间关系的研究，以验证通过发酵调整粗多糖结构的有效性和可操作性。

本研究通过比较不同热、酸和灭菌处理对发酵前后白扁豆花粗多糖的分子量和红外光谱的结构特征以及其抗氧化、降血糖和降血脂生物活性的影响，探讨发酵过程对白扁豆花粗多糖生物活性稳定性的影响，旨在解析白扁豆花粗多糖的结构与生物活性关系，为白扁豆花多糖食品的开发与应用提供重要的理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

白扁豆花　购于云南省西双版纳傣族自治州；纳豆芽孢杆菌(*Bacillus subtilis* natto)CICC 10263　湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心；2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)，ABTS)　纯度≥98%，上海麦克林生化科技有限公司；3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylicacid，DNS)　纯度≥98%，北京索来宝科技有限公司；甘氨脱氧胆酸钠、牛磺脱氧胆酸钠　纯度≥97%，上海易恩化学技术有限公司；Dextran 右旋糖酐　分析纯，西格玛-奥德里奇公司(Sigma-Aldrich)；α-淀粉酶(≥4000 U/g)、胃蛋白酶(≥3000 U/g)、胰蛋白酶(≥250 U/mg)　北京兰杰柯科技有限公司；溴化钾、95% 乙醇、磷酸、四硼酸钠等　分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

Waters 1515 高效液相色谱仪、Waters 2410 示差检测器、Waters 2707 自动进样器　美国 Waters 公司；聚合物基质水溶性 SEC(GFC)色谱柱　日本 Shodex；NICOLET iS50R 傅里叶变换显微红外光谱仪　美国 Thermo Fisher Scientific；Xinyi-20FA 真空冷冻干燥机　宁波新艺超声设备有限公司；CR-GIII 日立高速离心机　妙生科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　提取发酵前后白扁豆花粗多糖　参考屈雅宁等[15]方法，提取发酵前后白扁豆花粗多糖。通过三区划线将纳豆芽孢杆菌接种至 LB 培养基，37 ℃ 培养 2 d，挑取单菌落至 LB 液体培养基，37 ℃ 摇床培养 1 d，得菌液。取适量干燥白扁豆花，磨粉机粉碎，过筛，备用。称取 10 g 白扁豆花粗粉于锥形瓶中，120 ℃ 灭菌 15 min，将菌液以 5% 接种量(质量分数)接种于白扁豆花粗粉中，37 ℃ 培养 1 d 后补充一定水分，利于微生物作用，再培养 1 d。发酵结束后，冷冻干燥 12 h，−20 ℃ 保存，备用。

将发酵前后白扁豆花粗粉过 60 目筛后，加入 95% 乙醇振荡 6 h，8000 r/min 离心，去除上清并烘干。脱脂粉末以液料比 1∶20 加入去离子水，95 ℃ 浸提 6 h，冷却后离心，收集上清。加入 3% 三氯乙酸去蛋白，静置过夜后离心，收集上清，再加 95% 乙醇沉淀，冷冻干燥得粗多糖。所得白扁豆花粗多糖提取得率为(7.18±0.74)%，发酵后白扁豆花粗多糖提取得率为(7.77±0.07)%。

1.2.2　热处理对发酵前后白扁豆粗多糖生物活性稳定性的影响　为研究热处理后，发酵对白扁豆花粗多糖生物活性稳定性的影响，参考韦珍等[16]方法，对粗多糖进行热处理。取质量浓度 4 mg/mL 粗多糖溶液 20 mL 置于试管中，分别于 40、60、80、100 ℃ 的水浴锅保温 3.5 h，每隔 0.5 h 取样，测定粗多糖溶液对 $ABTS^+$自由基清除率、α-淀粉酶抑制率和胆酸盐结合能力。

1.2.3　酸处理对发酵前后白扁豆粗多糖生物活性稳定性的影响　为研究酸处理后，发酵对白扁豆花粗多糖生物活性稳定性的影响，参考赵玲玲等[17]的方法，对粗多糖进行酸处理。采用不同 pH 的盐酸缓冲溶液配制多糖溶液(pH=1、2、3、4、5、6)，常温下静置 0.5 h 后，测定粗多糖溶液对 $ABTS^+$自由基清除率、α-淀粉酶抑制率和胆酸盐结合能力。

1.2.4　灭菌处理对发酵前后白扁豆粗多糖生物活性稳定性的影响　为研究灭菌处理后，发酵对白扁豆花粗多糖生物活性稳定性的影响，参考赵广河等[18]方法，对粗多糖进行灭菌处理。采用不同灭菌条件(115 ℃，10 min；115 ℃，20 min；121 ℃，10 min；121 ℃，20 min；121 ℃，30 min)处理粗多糖溶液，这些条件模拟实际生产中常见的温度和时间组合，既能保证杀菌效果，又能减少对食品成分的破坏。灭菌冷却后，测定粗多糖溶液对 $ABTS^+$自由基清除率、α-淀粉酶抑制率和胆酸盐结合能力。

1.2.5　热、酸及灭菌处理后发酵前后白扁豆花粗多糖分子量测定　为研究极端环境对两种白扁豆花粗多糖分子量的影响，参考 Tan 等[19]方法，采用高效凝胶渗透色谱法，使用高效凝胶渗透色谱串联柱测定热、酸及灭菌处理三种条件(100 ℃，3.5 h、pH=1、121 ℃，30 min)处理后的粗多糖分子量。采用配备示差折光检测器的 Waters 高效液相色谱系统，以聚合物基质水溶性 SEC(GFC)色谱柱(8×300 mm)3 根串联的凝胶色谱柱分离，流动相为 0.05 mol/L NaCl 溶液(可减少多糖分子间的静电作用，避免分子聚集，从而保证分离效果和结果准确性)，流速 0.65 mL/min，柱温维持在 40 ℃(以降低溶液黏度并保持色谱柱性能稳定)，进样量 30 μL。以标准品(右旋糖酐 Dextran)相对分子质量的对数值为纵坐标，以相应色谱峰的保留时间(T)为横坐标进行线性回归，得到 lgMw-T(重均分子量)校正曲线：lgMw-T 校正曲线方程：lg Mw=−0.1811T+11.0551，R^2=0.9936。

1.2.6　热、酸及灭菌处理后发酵前后白扁豆花粗多糖红外光谱分析　为研究极端环境对两种白扁豆花粗多糖红外光谱特征的影响，选择热、酸及灭菌处理三种条件处理后(100 ℃，3.5 h、pH=1、121 ℃，30 min)的粗多糖分别进行红外光谱测定，参考 Ge 等[20]方法，分别称取 2 mg 粗多糖，加入 KBr 粉末 200 mg 研磨均匀，压片(保证样品具有良好的透光性和分散性，从而获得清晰的吸收峰，且避免因样品量过多导致吸收峰畸变)，使用 FT-IR 进行分析，波长范围 4000~400 cm^{-1}，扫描红外光谱图。

1.2.7　抗氧化活性测定　参考 Zhou 等[21]方法，测定粗多糖的 $ABTS^+$自由基清除率。取不同条件处理后的粗多糖溶液 0.025 mL，加入 0.25 mL ABTS 工作液，迅速混匀，室温避光反应 15 min。以蒸馏水替代粗多糖溶液作为空白对照组，PBS 缓冲液代替 ABTS

工作液作为样品对照组，未作处理的粗多糖溶液作为阳性对照，未作处理的 V_C 溶液检验数据的准确性。反应结束后，在 734 nm 波长下测定吸光度。$ABTS^+$ 自由基清除率的计算方法如下：

$$ABTS^+自由基清除率(\%)=\left(1-\frac{A_2-A_1}{A_0}\right)\times 100$$

式中，A_0 是蒸馏水和 ABTS 工作液的吸光度；A_1 是样品和 PBS 的吸光度；A_2 是样品和 ABTS 工作液的吸光度。

1.2.8　降血糖活性测定　参考 Yu 等[22] 方法，测定粗多糖的 α-淀粉酶抑制率。不同条件处理后的粗多糖溶液和 0.2 mL、1% 淀粉溶液混合，40 ℃ 反应 5 min，向混合溶液中加入 0.2 mL α-淀粉酶溶液（0.5 mg/mL），40 ℃ 反应 10 min，加入 0.4 mL DNS，98 ℃ 反应 3 min，冷却后记录混合溶液在 540 nm 处的吸光度，以未作处理的粗多糖溶液作为阳性对照。α-淀粉酶抑制率的计算公式如下：

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_2-A_1}{A_0}\right)\times 100$$

式中，A_0 是 PBS、α-淀粉酶、淀粉和 DNS 的吸光度；A_1 是样品、PBS、淀粉和 DNS 的吸光度；A_2 是样品、α-淀粉酶、淀粉和 DNS 的吸光度。

1.2.9　降血脂活性测定　参考 Liu 等[23] 方法，测定粗多糖的胆酸盐结合能力。将不同条件处理后的粗多糖溶液与 0.2 mL 胃蛋白酶（10 mg/mL）、0.6 mL HCl（0.01 mol/L）混合，37 ℃ 振荡 1 h（150 r/min），用 NaOH 调节 pH 至 6.3，加入 0.8 mL 胰蛋白酶（10 mg/mL），37 ℃ 振荡 1 h（150 r/min）。分别加入 0.8 mL 甘氨脱氧胆酸钠（0.4 mmol/L）和牛磺脱氧胆酸钠（0.5 mmol/L），37 ℃ 振荡 1 h（150 r/min），离心 10 min（8000 r/min），立即吸取 1 mL 上清液，加入 3 mL 60% H_2SO_4，70 ℃ 水浴 1 h，然后冰浴 15 min。记录 387 nm 波长处的吸光度。分别用不同浓度的甘氨脱氧胆酸钠（0.03、0.06、0.12、0.18、0.24、0.3 mmol/L）和牛磺脱氧胆酸钠（0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 mmol/L）制成标准溶液曲线，未作处理的粗多糖溶液作为阳性对照，根据标准曲线和下列公式计算样品溶液与两种胆酸盐的结合能力：

$$甘氨脱氧胆酸钠结合能力(\%)=\left(\frac{C_1-C_2}{C_1}\right)\times 100$$

$$牛磺脱氧胆酸钠结合能力(\%)=\left(\frac{C_3-C_4}{C_3}\right)\times 100$$

式中，C_1 为甘氨脱氧胆酸钠加入量，μmol；C_2 为甘氨脱氧胆酸钠剩余量，μmol；C_3 为牛磺脱氧胆酸钠加入量，μmol；C_4 为牛磺脱氧胆酸钠剩余量，μmol。

1.3　数据处理

所有实验均进行三组平行，结果以平均值±标准差（SD）表示。所有统计结果均由 IBM SPSS Statistics 26、Graphpad Prism 9.5 软件得出。组间比较采用单因素方差分析（ANOVA）或 t 检验（根据数据的分布情况），$P<0.05$ 被视为具有统计学意义。如果存在多重比较，则采用 Bonferroni 校正进行修正。使用 Origin 2021 软件绘制插图。

2　结果与分析

2.1　热、酸及灭菌处理后对发酵前后白扁豆花粗多糖分子量的影响

2.1.1　热处理　随处理时间的延长，发酵前后白扁豆花粗多糖的分子量均呈下降趋势，且发酵后的粗多糖分子量显著低于发酵前（图 1A，图 1B，表 1）。对于

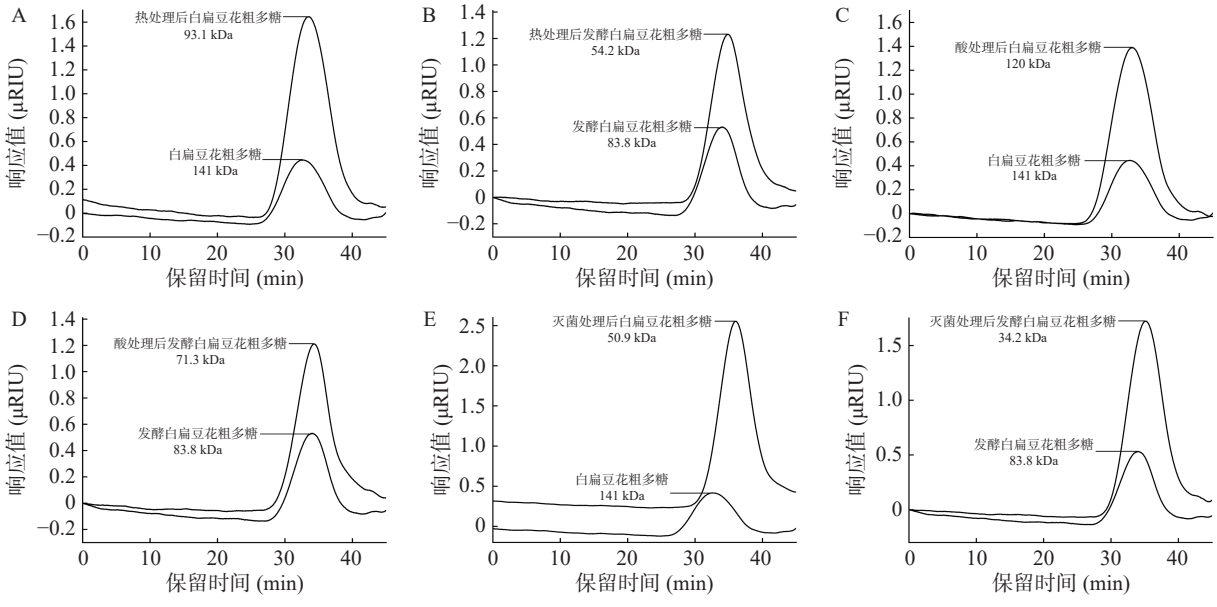


图 1　三种条件处理及未处理的发酵前后白扁豆花粗多糖的分子量

Fig.1　Molecular weight of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation under three treatment conditions and untreated

注：A、C、E 为白扁豆花粗多糖，B、D、F 为发酵后白扁豆花粗多糖，图 2 同。

未发酵白扁豆花粗多糖，温度升高会增强白扁豆花粗多糖分子链的流动性，从而明显加快白扁豆花粗多糖与水分子之间氢键的断裂，进而在一定程度上影响白扁豆花粗多糖的构象稳定性[24]。当超过一定温度时，糖苷键容易发生断裂，导致粗多糖分子链降解，分子量降低[25]。发酵后的粗多糖分子量显著低于发酵前，表明发酵会促进粗多糖的部分降解或结构重排，导致其对热处理的耐受性降低，从而增强热降解的效果。

2.1.2 酸处理 发酵前后白扁豆花粗多糖在酸处理后，随处理时间的延长，其分子量均呈下降趋势，且发酵后的粗多糖分子量显著低于发酵前（图 1C，图 1D，表 1）。对于未发酵白扁豆花粗多糖，酸处理后多糖的分子量显著降低，这与酸水解作用密切相关[26]。多糖分子中的糖苷键在酸性条件下会发生水解反应，随着水解度的增加，水解反应进行得越剧烈，多糖分子链断裂的程度越大，分子量也就随之下降[27]。发酵后的粗多糖发生了部分水解或结构变化，使其在酸处理下更容易降解。酸处理和发酵共同作用下，可能导致了粗多糖结构的进一步改变，从而影响了其稳定性和生物活性。

表 1 三种条件处理及未处理的发酵前后白扁豆花粗多糖的分子量结果

Table 1 Molecular weight results of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation under three treatment conditions and untreated

样品	RT（min）	Mw（kDa）
白扁豆花粗多糖	32.608	141
发酵白扁豆花粗多糖	33.858	83.8
热处理后白扁豆花粗多糖	33.606	93.1
热处理后发酵白扁豆花粗多糖	34.904	54.2
酸处理后白扁豆花粗多糖	33.002	120
酸处理后发酵白扁豆花粗多糖	34.248	71.3
灭菌处理后白扁豆花粗多糖	35.055	50.9
灭菌处理后发酵白扁豆花粗多糖	36.011	34.2

2.1.3 灭菌处理 发酵前后白扁豆花粗多糖在灭菌处理后，随处理时间的延长，其分子量均呈下降趋势，且发酵后的粗多糖分子量显著低于发酵前（图 1E，图 1F，表 1）。未发酵白扁豆花粗多糖在灭菌过程会导致多糖结构解聚，多糖分子中的糖苷键等化学键在高温下稳定性降低，容易发生断裂[28]，分子量骤降[29]。对于发酵白扁豆花粗多糖，高温灭菌激活了微生物细胞内的一些水解酶，如糖苷酶等，这些酶在细胞破裂后释放出来，使得多糖的糖苷键断裂，生成寡糖、单糖等小分子物质，导致多糖分子量下降[30]。

2.2 红外光谱分析

如图 2，发酵前后白扁豆花粗多糖的红外光谱图在热、酸及灭菌处理后均无明显差异，说明处理并没有破坏发酵前后白扁豆花粗多糖的主要结构。3435 cm^{-1} 附近的吸收峰，与 O-H 的伸缩振动有关，峰形较宽，这是由于羟基发生缔合[31]。2935 cm^{-1} 附近的特征峰代表较弱的 C-H 伸缩振动，包括 CH、CH_2、CH_3 的伸缩和弯曲振动[32]。1748 cm^{-1} 附近的特征峰，与酯化羰基 C=O 的伸缩振动有关[33]。1669 cm^{-1} 附近的特征峰，与羰基 C=O 的伸缩振动有关[34]。1443 cm^{-1} 附近的特征峰，是由于 C-H 的变角振动和 C-H 键伸缩振动构成了糖环的特征吸收[35]。1233 cm^{-1} 附近的特征峰，与 S-O 的不对称伸缩振动有关[36]。1104 cm^{-1}、1019 cm^{-1} 附近的特征峰，与 C-O-C 和 C-O-H 键的伸缩振动有关，表明多糖中存在吡喃糖环。832 cm^{-1} 附近的特征峰，表明多糖存在 α-型糖苷键[9]。

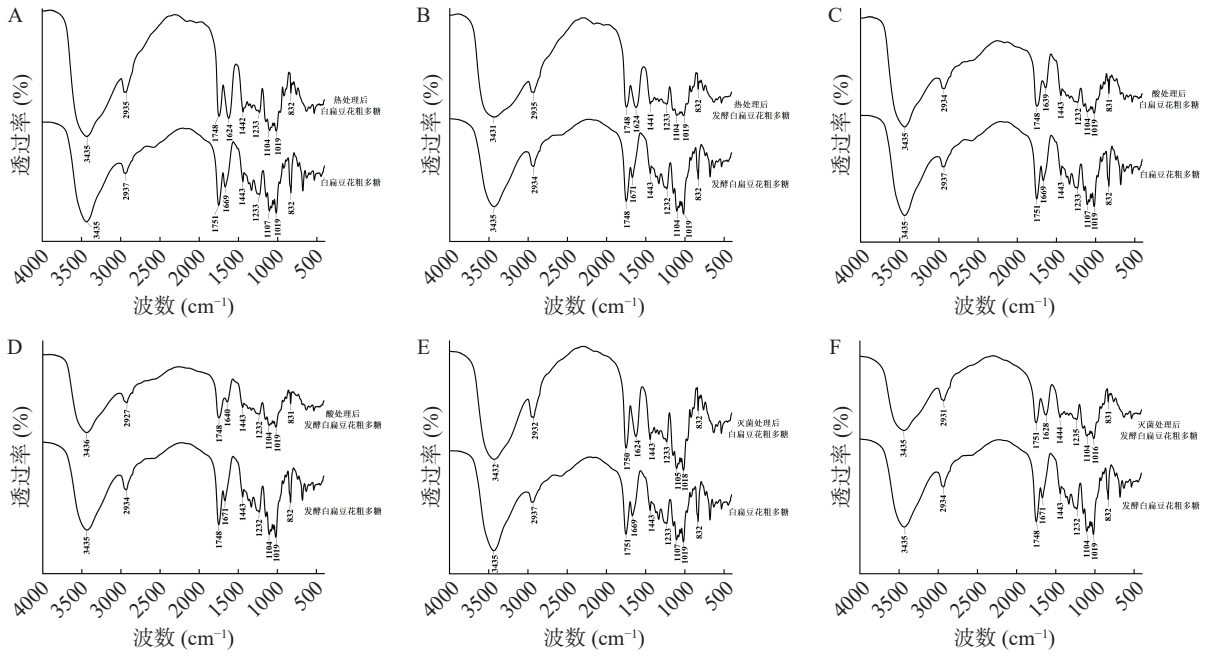


图 2 三种条件处理及未处理的发酵前后白扁豆花粗多糖的红外光谱图

Fig.2 Infrared spectra of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation under three treatment conditions and untreated

2.3　发酵对白扁豆花粗多糖在热、酸及灭菌处理后生物活性稳定性的影响

2.3.1　发酵对白扁豆花粗多糖在热处理后生物活性稳定性的影响

2.3.1.1　抗氧化稳定性　如图 3 所示，100 ℃ 加热 3.5 h 后，发酵后白扁豆花粗多糖对 $ABTS^+$自由基的清除率为 91.71%±0.10%，优于发酵前 86.23%±1.05%，与对照组相比，发酵前后在各温度下的清除率均显著升高（P<0.05）。结果表明，发酵处理提高了白扁豆花粗多糖的抗氧化能力，与 Shao 等[37] 关于发酵能够显著提高山药多糖的抗氧化活性的研究结果一致。在其他温度条件下，发酵后粗多糖的清除率也普遍高于发酵前，但 100 ℃ 条件下的表现尤为突出（P<0.05）。高温加热与发酵处理之间可能存在协同效应，发酵通过改变多糖的结构特征（如分支度和羧基/羟基暴露）提升其反应活性位点的同时，高温加热又促使多糖适度降解并生成低分子量片段，从而共同增强自由基清除能力。此外，发酵结合热处理常导致多糖分子量下降，而低分子量多糖具有更强的自由基清除能力，这与 Zhong 等[38] 关于分子结构与抗氧化活性之间关系的研究相符。因此，发酵白扁豆花粗多糖在热处理后表现更优的抗氧化稳定性，可能源于发酵与热处理协同促进的分子量降解及结构优化。

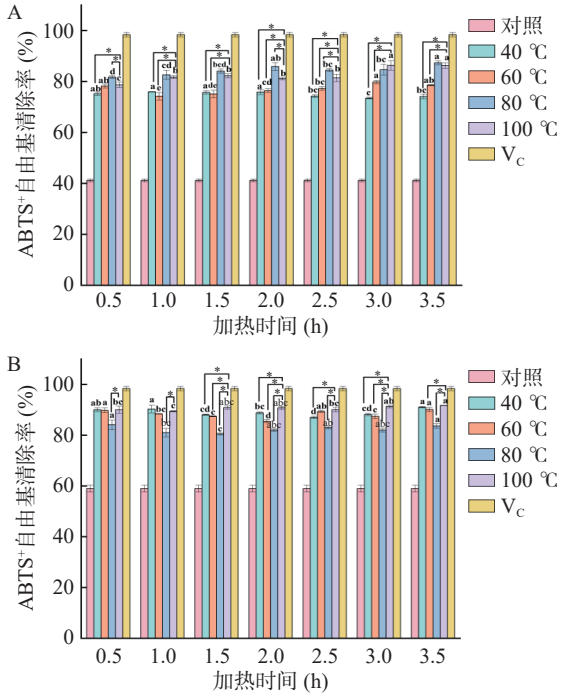


图 3　热处理对发酵前后白扁豆花粗多糖抗氧化稳定性的影响

Fig.3　Effects of heat treatment on the antioxidant stability of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation

注：不同小写字母表示在相同加热温度下不同时间处理之间差异显著（P<0.05），*表示在相同加热时间下不同温度与 100 ℃ 处理组相比差异显著（P<0.05）；A 为白扁豆花粗多糖，B 为发酵后白扁豆花粗多糖；图 4 同。

2.3.1.2　降血糖稳定性　如图 4 所示，100 ℃ 加热 3.5 h 后，发酵后白扁豆花粗多糖对 α-淀粉酶的抑制率为 51.84%±1.28%，优于发酵前 41.70%±2.65%，但与对照组相比，发酵前后在各温度下的抑制率均显著降低（P<0.05）。与发酵前相比，发酵后白扁豆花粗多糖在不同温度下的抑制率变化趋势有所不同，发酵后的粗多糖在 100 ℃ 加热 3.5 h 后抑制率明显升高，表现出更好的降血糖稳定性，说明发酵不仅改变了多糖的结构特性，还提升了其热适应性与功能表现。这与 Xiang 等[39] 研究关于发酵能够显著提高茶多糖降血糖活性的研究结果一致。多糖降血糖活性受分子量与构象的适宜区间调控，不同分子量对 α-淀粉酶的抑制效应存在差异[40]。多糖可通过静电相互作用与 α-淀粉酶上带正电的氨基酸残基结合并诱导构象改变，从而抑制其活性[41]。此外，多糖经过热/发酵处理还可能导致 α-淀粉酶的二级结构发生变化，刚性增强、柔性减弱[42]，以及多糖与其他化合物（如黄酮类化合物）的协同作用[43] 均可以增强对 α-淀粉酶的抑制效果。因此，发酵白扁豆花粗多糖在热处理后表现更优的降血糖稳定性，可能源于发酵与热处理协同促进的构象调整及分子间作用力增强。

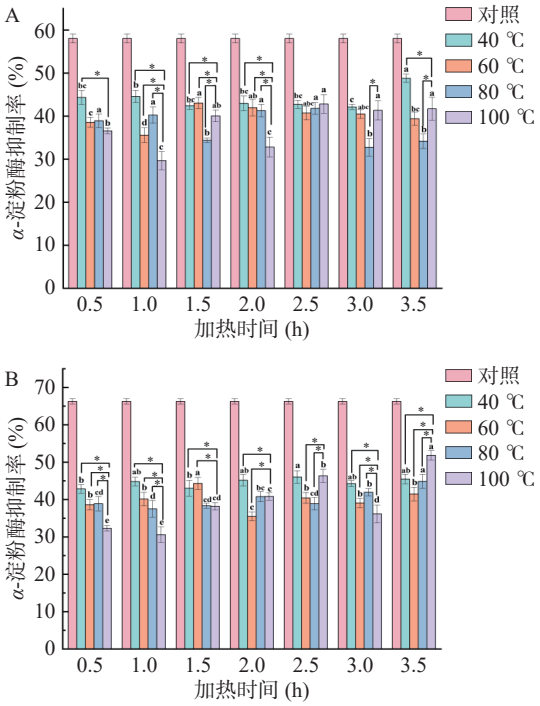


图 4　热处理对发酵前后白扁豆花粗多糖降血糖稳定性的影响

Fig.4　Effects of heat treatment on the hypoglycemic stability of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation

2.3.1.3　降血脂稳定性　如图 5 所示，100 ℃ 加热 3.5 h 后，发酵前白扁豆花粗多糖对甘氨脱氧胆酸钠和牛磺脱氧胆酸钠的结合能力分别为 65.35%±1.31%、62.78%±2.18%，优于发酵后 44.17%±2.27%、52.79%±0.82%。与发酵前相比，发酵后白扁豆花粗多糖 100 ℃ 加热 3.5 h 后，对两种胆酸盐的结合能力

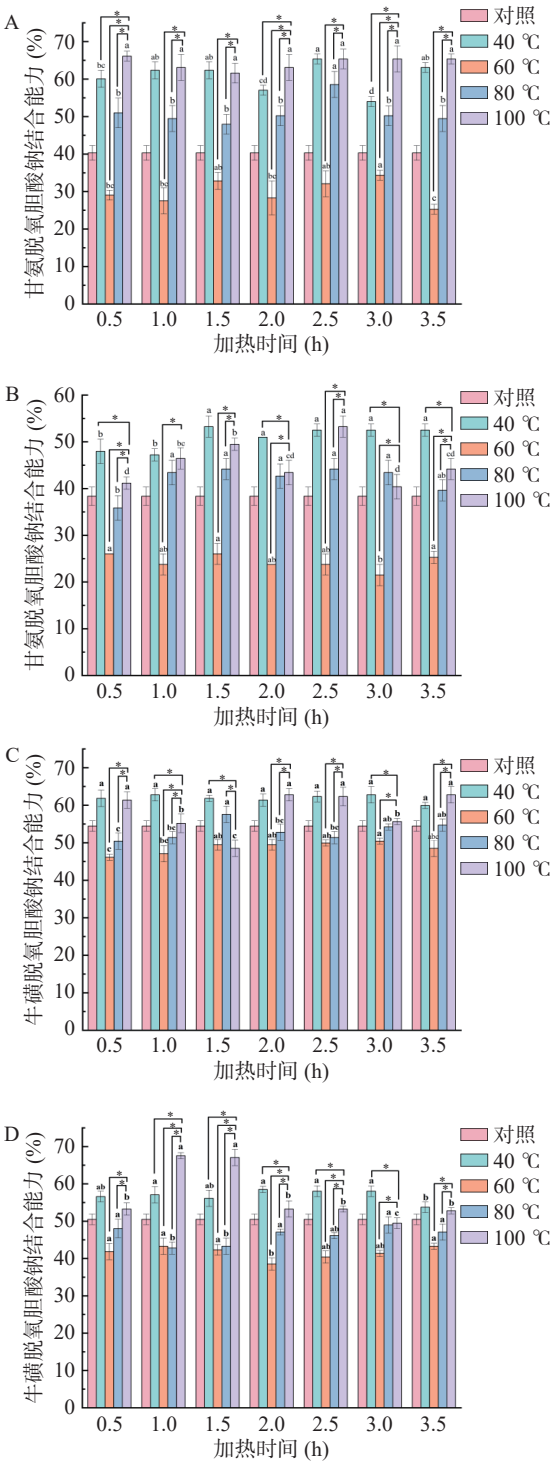


图 5 热处理对发酵前后白扁豆花粗多糖降血脂稳定性的影响

Fig.5 Effects of heat treatment on the hypolipidemic stability of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation

注: 不同小写字母表示在相同加热温度下不同时间处理之间差异显著(P<0.05), *表示在相同加热时间下不同温度与 100 ℃处理组相比差异显著(P<0.05); A、C 为白扁豆花粗多糖, B、D 为发酵后白扁豆花粗多糖。

均有所下降。多糖与胆酸盐的结合机制可能涉及疏水相互作用、静电相互作用以及流体动力学限制等因素。Wang 等[44] 研究表明低分子量多糖在降血脂方面具有更好的活性, 经过热处理的发酵前后白扁豆花多糖发生了分子量的降解, 这可能是其降血脂活性显著增强的主要原因。此外, 多糖的体外结合能力与其表观黏度相关, 胆固醇与多糖之间的高疏水相互作用可能是其稳定性增强的原因[45]。多糖凝胶的空间构型也可能提供一个有利于胆固醇与凝胶相互作用的环境, 从而加速胆固醇的提取和结合[46]。因此, 发酵前白扁豆花粗多糖在热处理后下表现出更优的降血脂稳定性, 可能源于发酵和热处理共同促进的构象调整和分子间作用力的增强。

2.3.2 发酵对白扁豆花粗多糖在酸处理后生物活性稳定性的影响

2.3.2.1 抗氧化稳定性 如图 6, pH=1 时, 发酵后白扁豆花粗多糖对 $ABTS^+$自由基的清除率为 48.20%±0.76%, 优于发酵前 38.22%±0.25%, 且此条件下, 发酵前后白扁豆花粗多糖对 $ABTS^+$自由基的清除率优于其他 pH 处理后的相应清除率。与对照组相比, 各 pH 下发酵前后白扁豆花粗多糖对 $ABTS^+$自由基清除率均降低。在 pH1~6 的范围内, 发酵前后白扁豆花粗多糖的清除率均趋于稳定, 无显著波动, 发酵后的粗多糖组分在同等 pH 条件下表现出更优的清除率, 表明发酵提升了白扁豆花粗多糖的抗氧化能力, 并增强了其在酸处理后的抗氧化稳定性。在强酸条件下, 多糖易发生部分水解与构象调整, 使其活性基团更易暴露, 从而增强其清除自由基的能力[27]。同时, 酸性环境下白扁豆花中的酚类和黄酮类等成分与多糖之间更易形成交联结构, 进一步提升清除能力[47]。Liu 等[12] 研究表明微生物发酵能够通过酶的作用促进多糖结构的适度降解, 使其更具活性, 从而改善其在酸性环境中的抗氧化稳定性。Fernandes 等[48] 研究表明 pH 降低会调控多糖与酚类等活性成分的相互作用, 显著提高自由基清除效率。已有研究表明, 发酵不仅能够提高植物多糖的抗氧化活性, 还能增强其在不同环境条件下的稳定性[49]。因此, 发酵白扁豆花粗多糖在酸处理后表现出更优的抗氧化稳定性, 可

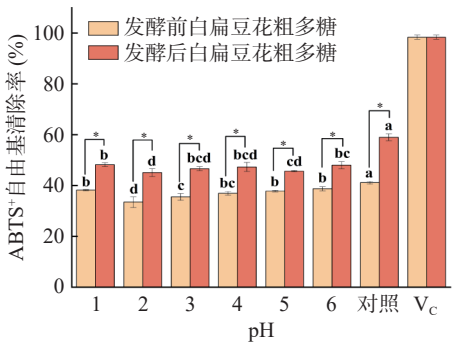


图 6 酸处理对发酵前后白扁豆花粗多糖抗氧化稳定性的影响

Fig.6 Effects of acid treatment on the antioxidant stability of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation

注: 不同小写字母表示在不同 pH 下同组间差异显著(P<0.05), *表示在相同 pH 下两组间差异显著(P<0.05), 图 7~图 8 同。

能与发酵及酸处理共同诱导的结构优化和作用模式调整有关。

2.3.2.2　降血糖稳定性　如图 7，pH=1 时，发酵后白扁豆花粗多糖对 α-淀粉酶的抑制率为 63.16%±0.36%，优于发酵前 55.69%±1.15%，且此条件下，发酵前后白扁豆花粗多糖对 α-淀粉酶的抑制率优于其他 pH 处理后的相应抑制率。与对照组相比，各 pH 下发酵前后白扁豆花粗多糖的抑制率均降低。在 pH1~6 的范围内，发酵前后白扁豆花粗多糖的抑制率均趋于稳定，无显著波动，发酵后的粗多糖组分在同等 pH 条件下表现出更优的抑制率，表明发酵能够提升白扁豆花粗多糖的降血糖活性，并增强其在酸处理后的稳定性。研究表明，不同 pH 条件下，多糖的抑制效果可能受到其分子结构和环境条件的影响，发酵过程中产生的酚类物质可能对酶活性有显著影响[50]。在酸性条件下，某些多糖对 α-淀粉酶的抑制效果显著，李奕葶等[51] 分离纯化的酸性多糖对枯草芽孢杆菌来源的 α-淀粉酶抑制率达到 60.22%。Xiang 等[39] 研究发现发酵也能够提高茶叶多糖的降血糖活性。因此，发酵白扁豆花粗多糖在酸处理后仍能维持良好的降血糖稳定性，可能与发酵及酸处理共同引起的结构优化及活性成分作用增强密切相关。

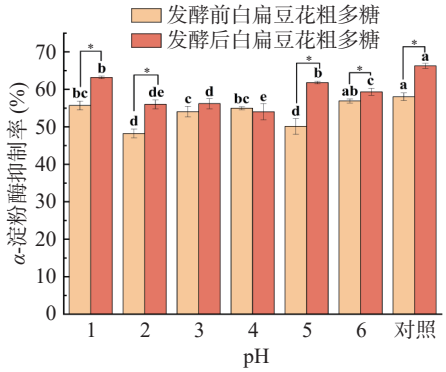


图 7　酸处理对发酵前后白扁豆花粗多糖降血糖稳定性的影响

Fig.7　Effects of acid treatment on the hypoglycemic stability of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation

2.3.2.3　降血脂稳定性　如图 8，pH=1 时，发酵前白扁豆花粗多糖对甘氨脱氧胆酸钠和牛磺脱氧胆酸钠的结合能力分别为 55.97%±1.96%、60.00%±0.82%，优于发酵后 42.27%±1.96%、57.62%±1.43%，且此条件下，发酵前后白扁豆花粗多糖对两种胆酸盐的结合能力优于其他 pH 处理后的相应结合能力。与对照组相比，各 pH 下发酵前白扁豆花粗多糖对甘氨脱氧胆酸钠的结合能力显著上升（P<0.05），而发酵后既有显著上升（P<0.05）也有无显著变化（P>0.05）；对于牛磺脱氧胆酸钠，发酵前后白扁豆花粗多糖的结合能力均显著上升（P<0.05）。在 pH1~6 的范围内，发酵前后白扁豆花粗多糖的结合能力均趋于稳定，无显著波动，且发酵前的粗多糖组分在同等 pH 条件下表现出更优的结合能力。Wang 等[44] 研究发现低分子量多糖具有更优的降血脂活性，经过 pH=1 处理的发酵前后白扁豆花多糖发生分子量降解，可能是其降血脂活性显著增强的主要原因。多糖的结合能力与其分子结构特性（如分子量）密切相关，研究表明，高分子量多糖由于其粘度大，对胆汁酸结合具有流体动力学限制作用，从而抑制其活性[52]。当 pH=1 时，白扁豆花粗多糖的分子量降解可能促进了其对两种胆酸盐的结合能力升高，这与 Zheng 等[53] 研究发现超高压辅助提取的红毛藻多糖具有相对较高的降血脂能力是由于其低分子量一致。胆汁酸呈离子状态，不易形成结晶，但在可溶解的非离子状态下则更容易与多糖结合。此外，多糖的疏水结构和静电相互作用也会影响其与胆汁酸的结合能力[54]。因此，发酵前白扁豆花粗多糖在酸处理后表现出更强的降血脂稳定性，可能与发酵及酸处理共同引发的分子量降解和结构变化有关。

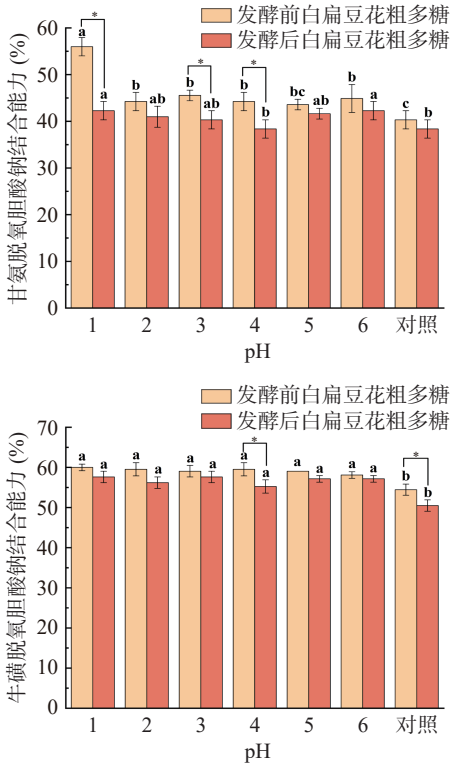


图 8　酸处理对发酵前后白扁豆花粗多糖降血脂稳定性的影响

Fig.8　Effects of acid treatment on the hypolipidemic stability of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation

2.3.3　发酵对白扁豆花粗多糖在灭菌处理后生物活性稳定性的影响

2.3.3.1　抗氧化稳定性　如图 9，121 ℃，30 min 灭菌处理后，发酵后白扁豆花粗多糖对 $ABTS^+$ 自由基的清除率为 61.39%±0.29%，优于发酵前 49.78%±0.44%，且此条件下，发酵前后白扁豆花粗多糖对 $ABTS^+$ 自由基的清除率优于其他灭菌条件处理后的相应清除率。与对照组相比，灭菌处理显著提高了发酵前粗多糖对 $ABTS^+$ 自由基的清除率（P<0.05），发酵后清除率的变化趋势在不同灭菌条件下存在差异。五种灭

菌条件处理后，发酵前后白扁豆花粗多糖的清除率均趋于稳定，无显著波动，发酵后的粗多糖组分在同等灭菌条件下表现出更优的清除率，表明发酵不仅提升了白扁豆花粗多糖的抗氧化能力，还增强了其在灭菌条件下的抗氧化稳定性。微生物在发酵过程中通过酶促作用及代谢产物改变了多糖结构并增强了抗氧化能力[12]。灭菌处理可能导致多糖适度去聚合或构象松弛，从而增加自由基反应位点的暴露[28]。此外，适度的高温高压可引发多糖链的有限去聚合与构象松弛，提升还原端与羟基等供氢/供电子基团的可及性，从而强化以电子转移/氢原子转移为主的 $ABTS^{+}$ 清除过程。因此，白扁豆花粗多糖在灭菌处理后表现出更强的抗氧化稳定性，可能与酶促降解、代谢产物作用及高温高压诱导的结构松弛共同引发的分子量下降和活性基团暴露有关。基于上述研究结果，并结合温度对抗氧化稳定性的影响，可以推断温度越高，越有助于促进白扁豆花粗多糖抗氧化潜能的充分发挥。

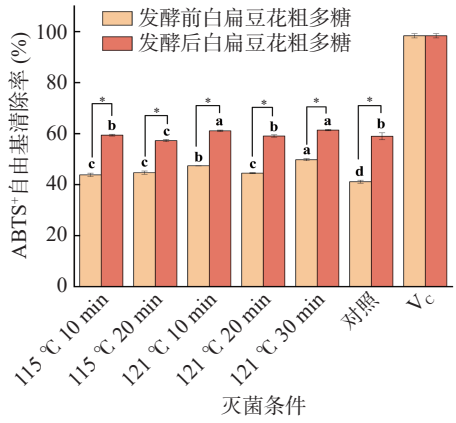


图 9 灭菌处理对发酵前后白扁豆花粗多糖抗氧化稳定性的影响

Fig.9 Effects of sterilization treatment on the antioxidant stability of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation

注：不同小写字母表示在不同灭菌条件下同组间差异显著（$P<0.05$），*表示在相同灭菌条件下两组间差异显著（$P<0.05$），图 10~图 11 同。

2.3.3.2 降血糖稳定性 如图 10，121 ℃，30 min 灭菌处理后，发酵后白扁豆花粗多糖对 α-淀粉酶抑制率为 56.36%±1.51%，优于发酵前 51.69%±1.55%，且此条件下，发酵后白扁豆花粗多糖对 α-淀粉酶抑制率优于其他灭菌条件处理后的相应抑制率。与对照组相比，灭菌处理显著降低了发酵前后白扁豆花粗多糖对 α-淀粉酶抑制率（$P<0.05$）。五种灭菌条件处理后，发酵前后白扁豆花粗多糖的抑制率均趋于稳定，无显著波动，除 121 ℃、20 min 的灭菌条件外，其他条件下发酵后的粗多糖组分在同等灭菌条件下表现出更优的抑制率，表明发酵不仅增强了多糖的降血糖效果，还提高了其在灭菌处理后的稳定性[55]。然而，在 121 ℃、20 min 的灭菌条件下，发酵未能显著提高抑制率，表明灭菌处理对多糖活性的影响存在阈值效应[39]。因此，白扁豆花粗多糖在灭菌处理后表现出更强的降血糖稳定性，可能与发酵过程中多糖结构的优化、酶促降解作用以及灭菌处理下分子量的下降和活性位点的暴露共同作用有关。

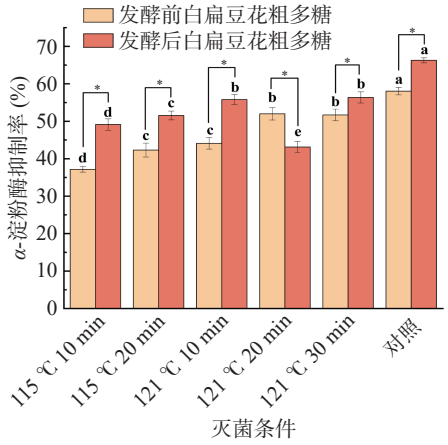


图 10 灭菌处理对发酵前后白扁豆花粗多糖降血糖稳定性的影响

Fig.10 Effects of sterilization treatment on the hypoglycemic stability of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation

2.3.3.3 降血脂稳定性 如图 11，121 ℃，30 min 灭

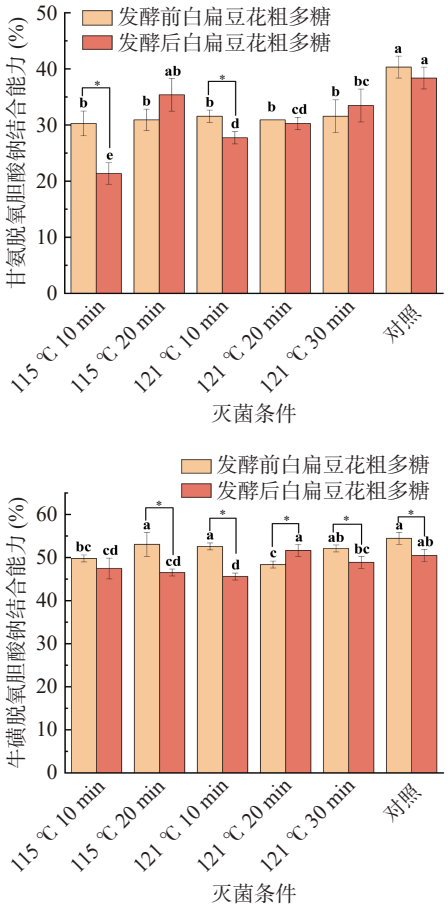


图 11 灭菌处理对发酵前后白扁豆花粗多糖降血脂稳定性的影响

Fig.11 Effects of sterilization treatment on the hypolipidemic stability of crude polysaccharides from Flos. *Dolichos lablab* L. before and after fermentation

菌处理后，发酵后白扁豆花粗多糖对甘氨脱氧胆酸钠的结合能力为 33.47%±2.92%，优于发酵前 31.55%±2.92%；发酵前白扁豆花粗多糖对牛磺脱氧胆酸钠的结合能力为 52.11%±0.81%，优于发酵后 48.85%±1.40%。与对照组相比，灭菌处理降低了发酵前后白扁豆花粗多糖对两种胆酸盐的结合能力，但发酵前后白扁豆花粗多糖的结合能力均趋于稳定。发酵前的多糖组分在大部分相同灭菌条件下展现出更高的结合能力，表明发酵前白扁豆花粗多糖在灭菌处理后具有更高的降血脂稳定性。Wang 等[44] 研究发现低分子量多糖具有更优的降血脂活性。并且发酵过程可能通过促进多糖分子的降解和结构改变，进一步提高其在降血脂方面的效果。因此，发酵前白扁豆花粗多糖在灭菌处理后表现出更强的降血脂稳定性，可能与发酵及灭菌处理共同引发的分子量降解和结构变化有关。

3　结论

本研究以白扁豆花粗多糖为研究对象，分析了发酵对白扁豆花粗多糖结构及生物活性稳定性的影响。研究结果表明，发酵降低了粗多糖在热、酸和灭菌处理后的分子量，但其主要结构特征未发生显著变化。在生物活性方面，发酵提高了白扁豆花粗多糖的抗氧化及降血糖活性，降低了降血脂活性。与已有研究相比，本研究进一步证实了发酵过程对粗多糖生物活性的不同影响，尤其是在抗氧化和降血糖方面的稳定性表现较好，表明在复杂加工环境下，白扁豆花粗多糖仍能保持其功能特性。然而，降血脂活性的降低提示，在开发白扁豆花降血脂功能食品时，需综合考虑不同加工条件对粗多糖生物活性的潜在影响。因此，选择适宜的加工方式对保持其活性和确保最终产品的功效与安全性至关重要。本研究为白扁豆花粗多糖在抗氧化及降血糖功能食品的开发提供了重要的理论依据，尤其是在面对复杂加工工艺时，其生物活性能够得到一定程度的保障。未来的研究应进一步探索白扁豆花粗多糖在不同环境条件下的生物活性稳定性，特别是其在其他加工工艺中的表现。此外，后续研究将采用细胞和动物模型，系统地深入研究白扁豆花粗多糖的抗氧化、降血糖及降血脂活性，以进一步确定其最佳热稳定性、酸稳定性以及高温高压稳定性。这将有助于推动白扁豆花粗多糖在功能食品中的应用，并为相关行业提供更具实用性的技术支持。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 李海洋，李若存，陈丹，等. 白扁豆研究进展[J]. 中医药导报，2018，24(10)：117−120. [LI H Y, LI R C, CHEN D, et al. Research progress of baibiandou (white hyacinth bean)[J]. Guiding Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2018, 24(10): 117−120.]

[2] GAO Yanping, HUANG Ruiting, QIU Yongyi, et al. Characterization of the chemical composition of different parts of *Dolichos lablab* L. and revelation of its anti-ulcerative colitis effects by modulating the gut microbiota and host metabolism[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 322: 117629.

[3] 石中唯，张卫，刘薇，等. 白扁豆花中酚酸类成分的分离与结构鉴定[J]. 中国药物化学杂志，2023，33(11)：857−863. [SHI Z W, ZHANG W, LIU W, et al. Isolation and identification of phenolic constituents from the flower bud of *Dolichos lablab* L.[J]. Chinese Journal of Medicinal Chemistry, 2023, 33(11): 857−863.]

[4] IM A R, KIM Y H, KIM Y H, et al. *Dolichos lablab* protects against nonalcoholic fatty liver disease in mice fed high-fat diets[J]. Journal of Medicinal Food, 2017, 20(12): 1222−1232.

[5] LI Xiaoping, LIANG Suisha, XIA Zhongkui, et al. Establishment of a *Macaca fascicularis* gut microbiome gene catalog and comparison with the human, pig, and mouse gut microbiomes[J]. Giga Science, 2018, 7(9): 100.

[6] 王冬晴，马长伟，王共明，等. 发酵技术在海藻功能性食品加工中的应用[J]. 食品与发酵工业，2024，50(12)：379−387. [WANG D Q, MA C W, WANG G M, et al. Application of fermentation technology in seaweed functional food processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(12): 379−387.]

[7] RIANINGSIH L, SUMARDIANTO. Antioxidant activity in seaweed (*Sargassum* sp.) extract fermented with *Lactobacillus* plantarum and *Lactobacillus acidophilus*[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 530(1): 012011.

[8] YUE Qiulin, WANG Zhongjian, YU Fupeng, et al. Changes in metabolite profiles and antioxidant and hypoglycemic activities of *Laminaria japonica* after fermentation[J]. LWT, 2022, 158: 113122.

[9] 许梦粤，丁泽宇，李锦鹏，等. 大豆多糖与纳豆多糖结构特征和主要生物活性比较[J]. 食品科学，2024，45(7)：78−86. [XU M Y, DING Z Y, LI J P, et al. Comparison of structural characteristics and major biological activities of polysaccharides from soybean and natto[J]. Food Science, 2024, 45(7): 78−86.]

[10] YANG Jinchu, ZHENG Yi, YANG Yongfeng, et al. Effects of microbial fermentation on the anti-inflammatory activity of Chinese yam polysaccharides[J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 11: 1509624.

[11] 郭守东. 微生物胞外多糖的结构及其抗氧化活性研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2010. [GUO S D. Structural characteristics of microbial exopolysaccharides and their antioxidant activities[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.]

[12] LIU Shuai, HU Jielun, ZHONG Yadong, et al. A review: Effects of microbial fermentation on the structure and bioactivity of polysaccharides in plant-based foods[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 137453.

[13] 许梦粤，曾长立，王红波. 药食同源植物多糖提取方法、结构解析和生物活性研究进展[J]. 食品研究与开发，2023，44(19)：216−224. [XU M Y, ZENG C L, WANG H B. Advances in extraction method, structural analysis and bioactivity of polysaccharides from medicinal and edible homologous plants[J]. Food Research and Development, 2023, 44(19): 216−224.]

[14] 王庆琳，陈安新，王芳，等. 功能性植物多糖的发酵对其结构及生物活性影响的研究进展[J]. 现代食品，2024，30(21)：46−49,54. [WANG Q L, CHEN A X, WANG F, et al. Research progress on the impact of fermentation processes on the structure and bioactivity of functional plant polysaccharides[J]. Modern Food, 2024, 30(21): 46−49,54.]

[15] 屈雅宁, 许梦粤, 唐双庆, 等. 枯草芽孢杆菌发酵对豆类粗多糖结构与抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 129−138. [QU Y N, XU M Y, TANG S Q, et al. Effects of the structure and antioxidant activity of legume crude polysaccharides after *Bacillus subtilis* fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 129−138.]

[16] 韦珍, 向昱, 杨兆杏, 等. 火龙果茎多糖组成及抗氧化稳定性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 263−271. [WEI Z, XIANG Y, YANG Z X, et al. Analysis of composition and antioxidant stability of *Pitaya* Stem polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 263−271.]

[17] 赵玲玲, 张红运, 范宏亮, 等. pH, Na^+和 Ca^{2+}对大豆种皮果胶类多糖乳化稳定性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(1): 30−36. [ZHAO L L, ZHANG H Y, FAN H L, et al. Effects of pH, Na^+ and Ca^{2+} on the emulsion stability of soybean hull pectic polysaccharide[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(1): 30−36.]

[18] 赵广河, 陆玺文, 胡梦琪, 等. 桃金娘果实多糖抗氧化稳定性的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 65−70. [ZHAO G H, LU X W, HU M Q, et al. Study of antioxidant stability of polysaccharides from *Rhodomyrtus tomentosa*(Ait.)Hassk berries[J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 65−70.]

[19] TAN Xiao, CHEN Ping, XIAO Liuyue, et al. Extraction, purification, structural characterization, and anti-inflammatory activity of a polysaccharide from *Lespedeza formosa*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 300: 140154.

[20] GE Yuanfei, ZHANG Yan, PENG Ting, et al. Gelling properties and formation mechanism of blueberry pomace polysaccharide gels induced by calcium ions[J]. Food Chemistry, 2025, 472: 142918.

[21] ZHOU Yingxuan, BAI Lu, GENG Sheng, et al. Characterization and Pickering emulsifying ability of *Adinandra nitida* leaf polysaccharides[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102090.

[22] YU Te, DAI Yonggang, WANG Zifei, et al. Ultrasound-induced modifications of *Auricularia auricula* polysaccharides: Implications for antioxidant and glucose-lowering activities[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102209.

[23] LIU Yuan, WANG Chao, LAN Yuanhong, et al. Optimization of extraction process of sterol of *Pleurotus tuber*-regium (Fr.) sing *Sclerotium* and their antioxidant and hypolipidemic effects[J]. Food Analytical Methods, 2024, 17(3): 349−357.

[24] LIU Juzhao, WANG Lu, JIANG Lijie, et al. In sight the behavior of natural *Bletilla striata* polysaccharide hydrocolloids by molecular dynamics method[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 266: 131245.

[25] LI Jiangfei, YE Guanjun, WANG Junwen, et al. Recent advances in pressurized hot water extraction/modification of polysaccharides: Structure, physicochemical properties, bioactivities, and applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24: e70104.

[26] DUAN Ruibing, LIU Yanzhao, LI Jie, et al. Insight into the mechanisms of acid treatment on alkali-soluble polysaccharides from crispy and mealy *Lotus* rhizomes[J]. LWT, 2024, 198: 115885.

[27] 张宏媛, 钱佳俊, 李哲远, 等. 部分酸水解对桃胶多糖结构和乳化功能的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 99−106. [ZHANG H Y, QIAN J J, LI Z Y, et al. Effect of partial acid hydrolysis on the structure and emulsifying function of Peach Gum polysaccharide[J]. Food Science, 2023, 44(4): 99−106.]

[28] MUNARIN F, BOZZINI S, VISAI L, et al. Sterilization treatments on polysaccharides: Effects and side effects on pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(1): 74−84.

[29] 赵晶, 蒋丽霞, 董冰冰. 多糖类凝胶灭菌方式的研究[J]. 中国医药指南, 2018, 16(18): 48−49. [ZHAO J, JIANG L X, DONG B B. Study on the sterilization method of polysaccharide gels[J]. Guide of China Medicine, 2018, 16(18): 48−49.]

[30] 高艳艳, 祝琳琳, 李想, 等. 酸水解和酶水解在多糖研究中的应用进展[J]. 中华中医药学刊, 2022, 40(5): 142−146. [GAO Y Y, ZHU L L, LI X, et al. Application progress of acid hydrolysis and enzyme hydrolysis in study of polysaccharides[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2022, 40(5): 142−146.]

[31] MENG Weimin, HU Miao, ZHANG Pengfei, et al. Efficient conversion of insoluble dietary fiber to soluble dietary fiber by *Bacillus subtilis* BSNK-5 fermentation of okara and improvement of their structural and functional properties[J]. Food Chemistry, 2025, 474: 143188.

[32] 王家薇, 沈锌佳, 梁楷云, 等. 不同提取工艺对长梗黄精多糖结构特征及生物活性的影响[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(5): 160−168. [WANG J W, SHEN X J, LIANG K Y, et al. Effects of different extraction processes on structural characteristic and biological activity of *Polygonatum filipes* Merr[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(5): 160−168.]

[33] 宣开莉, 陈浩, 王壮, 等. 不同酸性提取条件对黄大茶多糖理化性质、结构及降糖活性的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(11): 76−86. [XUAN K L, CHEN H, WANG Z, et al. Impacts of diverse acidic extraction conditions on the physicochemical properties, molecular structure and hypoglycemic activity of large-leaf yellow tea polysaccharide[J]. Food Science, 2025, 46(11): 76−86.]

[34] PENG Kaitao, ZHANG Yujie, ZHANG Qi, et al. Impact of enzymatic degradation treatment on physicochemical properties, antioxidant capacity, and prebiotic activity of *Lilium* polysaccharides[J]. Foods, 2025, 14(2): 246.

[35] 邹林武, 赵谋明, 游丽君. 香菇多糖提取工艺的优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(19): 177−182. [ZOU L W, ZHAO M M, YOU L J. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from *Lentinan* and there bioactive activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(19): 177−182.]

[36] 商佳琦, 邹丹阳, 滕翔宇, 等. 5 种食用菌多糖的结构特征及抗氧化活性对比[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 77−83,89. [SHANG J Q, ZOU D Y, TENG X Y, et al. Structural characterization and antioxidant activity of five kinds of edible fungus polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(15): 77−83,89.]

[37] SHAO Yiwen, KANG Qiaozhen, ZHU Jiaqing, et al. Antioxidant properties and digestion behaviors of polysaccharides from Chinese yam fermented by *Saccharomyces* boulardii[J]. LWT, 2022, 154: 112752.

[38] ZHONG Qiwu, WEI Bin, WANG Sijia, et al. The antioxidant activity of polysaccharides derived from marine organisms: An overview[J]. Marine Drugs, 2019, 17(12): 674.

[39] XIANG Gang, SUN Huaping, CHEN Yinyin, et al. Antioxidant and hypoglycemic activity of tea polysaccharides with different degrees of fermentation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 228: 224−233.

[40] BAO Yihong, SUN Kaifeng, GUO Yang. Effect of molecular weight on hypolipidemic and hypoglycemic activities of fermented Auriculaia *Auricula* supernatant[J]. Food Science and Technology, 2020, 40(suppl 1): 106-112.

［41］ 陈舒桐, 俞理, 李瑞, 等. 岩藻多糖的提取、化学改性、降血糖活性及机理研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2022, 34(1): 153−163. ［CHEN S T, YU C, LI R, et al. Research progress on extraction, chemical modification and hypoglycemic property and mechanism of fucoidans[J]. Natural Product Research and Development, 2022, 34(1): 153−163.］

［42］ 杜沁岭, 杨芳, 徐文, 等. 银耳多糖对淀粉消化酶的抑制作用及其机理研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 120−125. ［DU Q L, YANG F, XU W, et al. Inhibitory effect of *Tremella fuciformis* polysaccharide on starch digestive enzymes and its action mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 120−125.］

［43］ 覃亚娟, 王萍, 陈小爱, 等. 3 种黄酮类化合物对 *α*-淀粉酶的抑制机制[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(5): 110−122. ［QIN Y J, WANG P, CHEN X A, et al. Inhibition mechanism of three flavonoids on *α*-amylase[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(5): 110−122.］

［44］ WANG Chuyan, QIN Yuqi, CUI Xiaoao, et al. Structural characterization of blueberry fruit polysaccharides and assessment of its hypolipidemic and immunological activity[J]. Food Science and Human Wellness, 2025, 14(4): 9250083.

［45］ 王一涵, 谢清芸, 滕建文, 等. 分离纯化对银耳多糖结构及体外降脂活性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 81−90. ［WANG Y H, XIE Q Y, TENG J W, et al. Effects of separation and purification on the structure and lipid-lowering activity *in vitro* of *Tremella fuciformis* polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 81−90.］

［46］ HUANG Y L, MA Y S, TSAI Y H, et al. *In vitro* hypoglycemic, cholesterol-lowering and fermentation capacities of fiber-rich orange pomace as affected by extrusion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 796−801.

［47］ 唐雅园, 王雪峰, 韦珍, 等. 香蕉花多糖抗氧化活性及稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 100−107. ［TANG Y Y, WANG X F, WEI Z, et al. Antioxidant activity and stability of polysaccharide from banana flower[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 100−107.］

［48］ FERNANDES P A R, COIMBRA M A. The antioxidant activity of polysaccharides: A structure-function relationship overview[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 314: 120965.

［49］ ZHAO Y S, EWEYS A S, ZHANG J Y, et al. Fermentation affects the antioxidant activity of plant-based food material through the release and production of bioactive components[J]. Antioxidants, 2021, 10(12): 2004.

［50］ MAGRO A E A, SILVA L C, RASERA G B, et al. Solid-state fermentation as an efficient strategy for the biotransformation of lentils: Enhancing their antioxidant and antidiabetic potentials[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2019, 6(1): 38.

［51］ 李奕葶, 王文振, 赵嘉伟, 等. 真姬菇菌丝体发酵藜麦产物中多糖的抗氧化和 *α*-淀粉酶抑制活性[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(2): 19−27. ［LI Y T, WANG W Z, ZHAO J W, et al. Antioxidant and *α*-amylase inhibitory activity evaluation of polysaccharides extracted from fermented Quinoa by *Hypsizygus marmoreus* mycelium[J]. Food Research and Development, 2022, 43(2): 19−27.］

［52］ HU Jielun, NIE Shaoping, LI Chang, et al. *In vitro* effects of a novel polysaccharide from the seeds of *Plantago asiatica* L. on intestinal function[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 54: 264−269.

［53］ ZHENG Mingjing, OUYANG Huan, LI Zhipeng, et al. Ultra-high pressure assisted extraction of polysaccharide from *Bangia* fusco-purpurea: Structure and *in vitro* hypolipidemic activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135687.

［54］ 郭雨晨, 赵源, 石林凡, 等. 杏鲍菇粉对大豆分离蛋白-魔芋粉基模拟脂肪理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 1−7. ［GUO Y C, ZHAO Y, SHI L F, et al. Effect of adding *Pleurotus eryngii* powder on physicochemical properties of soybean protein isolate-konjac flour based simulated fat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 1−7.］

［55］ GUO Weihong, YUN Jianmin, WANG Biao, et al. Comparative study on physicochemical properties and hypoglycemic activities of intracellular and extracellular polysaccharides from submerged fermentation of *Morchella esculenta*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134759.