

不同菌株发酵黄精抗氧化、降血糖和降血脂活性比较研究

王懿文, 周映君, 朱作华, 严理, 胡镇修,
彭源德, 谢纯良

(中国农业科学院麻类研究所, 长沙 410128)

摘要: 传统的黄精炮制方法一般采用耗时、耗能的酒蒸法或酒炖法。为了开发出耗能低、耗时短、条件温和的黄精炮制工艺, 筛选了黄精发酵最适菌株, 对发酵前后黄精制品中抗氧化、降血糖和降血脂活性进行了系统研究。最终筛选到一株最适黄精发酵菌株植物乳杆菌 Picp-2。采用植物乳杆菌 Picp-2 对黄精进行液态发酵, 所得黄精多糖的 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基 (DPPH·)、羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基 ($\cdot\text{O}_2^-$) 清除率及总还原力分别提升 50.38%, 13.10%, 14.48%, 31.47%。同时, Picp-2 发酵组 α -葡萄糖苷酶抑制率增加 83.24%。研究结果表明, 植物乳杆菌 Picp-2 能够通过液态发酵显著提升黄精抗氧化、降血糖活性。本文为黄精炮制工艺的开发与研究提供了理论依据和指导。

关键词: 发酵; 黄精; 抗氧化; 降血糖; 降血脂

中图分类号: R 283.1 文献标志码: A

Antioxidant, hypoglycemic and lipid-lowering activities of *Polygonatum sibiricum* fermented by different strains

WANG Yiwen, ZHOU Yingjun, ZHU Zuohua, YAN Li, HU Zhenxiu, PENG Yuande, XIE Chunliang
(Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410128, China)

Abstract: The traditional *Polygonatum sibiricum* (*P. sibiricum*) processing method, alcohol steaming method or alcohol stewing method, is time-consuming and energy-consuming. In order to develop low energy consumption, short time-consuming and mild conditions of *P. sibiricum* processing technology, the optimum *P. sibiricum* fermentation strain was screened, and the fermented *P. sibiricum* activities of anti-oxidation, hpyerglycemic and lipid-lowering were systemly researched. *Lactiplantibacillus*

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程重大任务专项项目 (CAAS-ASTIP-2023-IBFC); 国家麻类产业技术体系建设专项 (CARS-16)

第一作者: 王懿文 (1998-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 农产品生物炼制与转化. E-mail: 374870850@qq.com

通信作者: 谢纯良 (1984-), 女, 研究员. 研究方向: 药食同源发酵食品开发. E-mail: xiechunliang@caas.cn

引文格式: 王懿文, 周映君, 朱作华, 等. 不同菌株发酵黄精抗氧化、降血糖和降血脂活性比较研究[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(4): 375-381. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20240702001

Citation: WANG Yiwen, ZHOU Yingjun, ZHU Zuohua, et al. Antioxidant, hypoglycemic and lipid-lowering activities of *Polygonatum sibiricum* fermented by different strains[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(4): 375-381.

plantarum Picp-2, an optimum strain, was eventually screened. Using *L. plantarum* Picp-2 on *P. sibiricum* by liquid fermentation, the *P. sibiricum* polysaccharide obtained DPPH·, ·OH, ·O₂⁻ clearance rate and total reducing power increased by 50.38%, 13.10%, 14.48% and 31.47%, respectively. At the same time, the inhibition rate of α-glucosidase in Picp-2 fermentation group increased by 83.24%. The results show that *L. plantarum* Picp-2 significantly increases the antioxidant and hypoglycemic activities of *P. sibiricum* by liquid fermentation. This study provides a theoretical basis and guidance for the development and research of *P. sibiricum* processing technology.

Keywords: *fermentation*; *Polygonatum sibiricum*; *antioxidant*; *hypoglycemic*; *lipid-lowering*

黄精 (*Polygonatum sibiricum*) 为百合科植物的干燥根茎，是一种传统的药食同源中草药^[1-5]。中医认为黄精具有增气、滋阴、润肺、健脾的特性^[6-7]。生黄精含有一种特殊多糖类物质——黏液质，生食该物质会产生强烈的麻口感，因此黄精必须经过炮制后才可以入药、食用^[8-9]。

目前，黄精的主要炮制工艺为《中国药典》中记载的酒蒸法和酒炖法^[9-11]，该法需要向黄精中添加黄酒，并进行反复蒸制、烘干。该工艺耗能高、耗时长，且蒸制过程中伴随高温等剧烈条件，产物中往往会产生大量美拉德反应产物 5-羟甲基糠醛^[12-14]。微生物发酵，即利用微生物生命代谢活动对发酵基质起到提质增效的作用，因其条件温和、耗能低，同时还能减轻中药材本身的毒副作用，目前已成为热门的中药材炮制手段之一^[15]。崔亚鹏等^[16]利用植物乳杆菌和酿酒酵母发酵金银花浸提液，显著提升了 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基 (DPPH·)、2,2'联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 (ABTS) 自由基的清除率。Zhu 等^[17]利用灵芝发酵大麻叶，显著提高了其 DPPH·、羟基自由基 (·OH) 清除率。吴德超等^[18]等论述了黑曲霉中产生的各种酶系，对中药材中的活性物质具有显著的转化作用。

本文比较分析了不同菌株、不同发酵方式对黄精活性物质含量、抗氧化活性、降血糖活性、降血脂活性的影响，以期确定最适的发酵菌株，为黄精深加工及新炮制工艺的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

1.1.1 材料及试剂

植物乳杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*) Picp- (CCTCC No: M20191045) 购自中国典型培养物保

藏中心；酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) SY 购自安琪酵母股份有限公司；中华红芝 (*Ganoderma lucidum*, CCTCC No: KF2008392) 购自中国典型培养物保藏中心；黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 曲精购自济宁玉园生物科技有限公司。

α-葡萄糖苷酶、胰脂肪酶、水杨酸 (分析纯)：北京索莱宝科技有限公司；H₂O₂ (分析纯)：湖南汇虹试剂有限公司；DPPH、硫酸亚铁、铁氰化钾 (分析纯)：国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 实验仪器

超声波清洗机：深圳市洁盟清洗设备有限公司 JP-060S；酶标仪：赛默飞世尔科技 (中国) 有限公司 I510；高速离心机：美国 Sigma 公司 3K15；电子天平：上海瑶新电子科技有限公司 LQ-C3002。

1.2 试验方法

1.2.1 黄精液态发酵

生黄精烘干后放入中药材粉碎机中粉碎，过 60 目筛网。称取 10 g 黄精粉末放入 500 mL 三角烧瓶中，向烧瓶中加入 50 mL 无菌水。将混合物在 121 ℃ 下灭菌 15 min。

超净操作台内，分别接种活化好的 10% (体积分数) 植物乳杆菌 Picp-2 和 2% (体积分数) 酿酒酵母 SY，对照组加入等量的无菌水。对照组、Picp-2、SY 发酵组置于恒温摇床内 140 r/min，37 ℃ 发酵 72 h；发酵结束后，将发酵样品冷冻干燥，4 ℃ 保存，备用。

1.2.2 黄精固态发酵

生黄精烘干后放入中药材粉碎机中粉碎，过 60 目筛网。黄精粉末于 121 ℃ 下灭菌 20 min。无菌操作台内，称取 15 g 灭菌后的黄精粉末于培养皿中，加入 15 mL 无菌水，再分别接入 3 mL 中华红芝、黑曲霉菌液孢子悬浮液，混匀后封口，置

于 28 ℃ 恒温培养箱中进行培养。发酵黄精置于冷冻干燥机中干燥, 4 ℃ 保存, 备用。

1.2.3 黄精多糖提取物制备

将黄精炮制样品用中药材粉碎机粉碎后, 称取黄精粉碎样品 1 g, 按样品质量与液体体积为 1 : 20 的比例加入纯水, 70 ℃ 下浸提 2 h, 离心收集上清。加入与上清液等体积的 10% (质量分数) 三氯乙酸溶液, 4 ℃ 静置 12 h 进行脱蛋白, 以 7 500 r/min 离心 10 min, 吸出上清液。向上清液中加入 4 倍上清液体积的无水乙醇, 醇沉过夜。以 7 500 r/min 离心 10 min, 收集沉淀, 加入 20 mL 纯水复溶, 即得多糖提取物。

1.2.4 抗氧化活性测定

a. DPPH·清除率(R_1)

用移液枪吸取 1 mL 黄精乙醇提取物, 将其放入 2 mL 的 EP 管中。向 EP 管中加入 1 mL 的 0.2 mmol/L DPPH 溶液。振荡混匀 EP 管中的溶液, 以确保提取物与 DPPH 溶液充分接触。然后避光静置反应 30 min。

反应结束后, 用移液枪吸取 200 μ L 反应液, 放入酶标板中。将酶标板放入酶标仪中, 选择波长 517 nm 进行光密度(OD)测定。阳性对照组使用 100 μ g/mL 的维生素 C 溶液。根据下式计算清除率:

$$R_1 = [1 - (A_1 - B_1)/C_1] \times 100\%$$

式中: A_1 , B_1 , C_1 分别表示实验组、对照组、空白组在 517 nm 处的 OD 值。

b. $\cdot$ OH 清除率(R_2)

用移液枪将 2 mL 黄精乙醇提取物转移至 10 mL 的 EP 管中。分别向 EP 管中加入 6 mmol/L FeSO_4 溶液和 6 mmol/L H_2O_2 溶液各 2 mL。振荡 EP 管, 使溶液充分混合。将 EP 管静置, 进行反应 10 min。

反应结束后, 向各组 EP 管中加入 2 mL 6 mmol/L 水杨酸溶液。再次振荡 EP 管, 使溶液充分混合。静置, 进行反应 30 min。

反应结束后, 使用移液枪吸取 200 μ L 反应液, 转移至酶标板。将酶标板放入酶标仪中, 于波长 510 nm 下测定 OD 值。设置 100 μ g/mL 维生素 C 溶液作为阳性对照。根据下式计算清除率:

$$R_2 = (1 - A_2/B_2) \times 100\%$$

式中: A_2 , B_2 分别表示实验组、对照组在 510 nm

处的 OD 值。

c. 超氧阴离子自由基($\cdot\text{O}_2^-$)清除率(R_3)

将 1 mL 黄精乙醇提取物与 4.5 mL 0.05 mol/L Tris-HCl (pH=8.2) 溶液混合均匀, 置于 25 ℃ 水浴锅中, 进行恒温反应 20 min。加入 0.3 mL 0.05 mol/L 邻苯三酚, 继续保持水浴锅 25 ℃ 恒温反应 4 min。加入 1 mL 的 8 mmol/L HCl 溶液终止反应, 混合均匀。

在波长 325 nm 处测定吸光度, 根据下列公式计算待测样品的 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除率:

$$R_3 = [1 - (A_3 - B_3)/C_3] \times 100\%$$

式中: A_3 , B_3 , C_3 分别表示实验组、对照组 (纯水替代邻苯三酚)、空白组 (纯水替代样品) 的吸光度。

d. 总还原力

吸取 1 mL 黄精乙醇提取物, 再分别吸取 2.5 mL 0.2 mol/L PBS 溶液和质量分数为 1% 的 $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 溶液, 混匀后, 50 ℃ 恒温条件下反应 20 min。反应结束后, 加入 2.5 mL 质量分数为 10% 的三氯乙酸溶液, 迅速将其上清液和纯水按等比例混合至 5 mL, 最后加入 0.5 mL 质量分数为 0.1% 的 FeCl_3 溶液, 再次振荡混匀, 反应 10 min。反应完成后, 吸取 200 μ L 反应液于酶标仪中, 在 700 nm 波长下测定 OD 值。样品的总还原力与测得的 OD 值成正比。

1.2.5 降血糖、降血脂活性测定

a. α -葡萄糖苷酶抑制率(R_4)

将 0.2 mL 样品加入 1 mL α -葡萄糖苷酶溶液, 在 37 ℃ 的恒温条件下反应 10 min。在反应体系中加入 0.5 mL 的 5 mmol/mL PNPG 溶液, 继续在 37 ℃ 的恒温条件下反应 10 min。反应结束后, 向反应体系中加入 1 mL 的 0.1 mol/L Na_2CO_3 溶液以终止反应。将反应液转移到酶标仪中, 在 405 nm 的波长下测定吸光度。

$$R_4 = [1 - (A_4 - B_4)/(C_4 - D_4)] \times 100\%$$

式中: A_4 , B_4 , C_4 , D_4 分别表示实验组、实验背景组、空白组、空白背景组的吸光度。

b. 胰脂肪酶抑制率(R_5)

分别取 500 μ L 样品、胰脂肪酶 (1.2 U/mL) 和 PBS (pH=7.4), 混合均匀, 然后在 37 ℃ 的恒温条件下反应 10 min 后, 向混合液中加入 500 μ L 的 P-NPB 溶液 (11.2 mol/L), 再次混合均匀。在 37 ℃ 的恒温条件, 继续反应 20 min, 反应结束

后，迅速在 405 nm 的波长下测定混合液的吸光度。

$$R_5 = [1 - (A_5 - B_5)/(C_5 - D_5)] \times 100\%$$

式中： A_5 、 B_5 、 C_5 、 D_5 分别表示实验组、实验背景组、空白组、空白背景组的吸光度。

1.2.6 黄精多糖含量测定

按照王彦平等^[19]提出的修改方法，用苯酚-硫酸法测定黄精多糖含量。

1.3 统计学分析

采用 Graphpad Prism 数据统计学分析软件来处理和分析实验数据。本文采用 T-test 统计方法对数据进行统计学差异分析。在分析过程中，设定 $P<0.05$ 表明两组样本之间存在统计学差异。

2 结果与讨论

2.1 不同菌株发酵黄精多糖含量

不同菌株发酵后黄精多糖含量如图 1 所示。图中不同字母 a~c 代表统计学差异。植物乳杆菌 Picp-2 发酵组多糖含量为 (48.38 ± 2.4) mg/g，相较生黄精多糖含量 (52.39 ± 0.89) mg/g 下降了 7.66%，但无显著差异。酿酒酵母 SY、中华红芝、黑曲霉发酵组多糖含量分别为 (40.02 ± 2.33) ， (24.34 ± 1.90) ， (28.31 ± 4.04) mg/g，分别较生黄精多糖含量显著降低 23.62%，53.53%，45.97% ($P<0.05$)。微生物发酵过程中的生命活动会消耗黄精中的碳水化合物，而黄精中含有大量果胶、纤维素等物质，微生物需将这些物质水解后方可利用，不同菌株产纤维素酶能力不一致，对黄精中碳水化合物利用度存在差异，因此发酵后多糖含量存在一定差异^[15, 20]。多糖为黄精的主要活性成分，植物乳杆菌 Picp-2 在发酵过程中，对多糖的保留率最好。

2.2 不同菌株发酵黄精多糖 DPPH·清除率

DPPH·作为一种人工合成自由基，因其反应迅速、便捷，被广泛利用在植物物质抗氧化活性测定中，但由于任何供氢体都能清除 DPPH·，且 DPPH·只能在有机溶剂中进行反应，因此存在一定局限性^[21]。不同菌株发酵后黄精多糖 DPPH·清除率如图 2 所示，经过植物乳杆菌 Picp-2 和酿酒酵母 SY 发酵后，黄精多糖 DPPH·清除率分别为 $30.86\%\pm2.00\%$ ， $28.00\%\pm1.10\%$ ，相较生黄精多糖 DPPH·清除率 ($20.52\%\pm2.26\%$) 分别显著提升了 50.38%，36.45% ($P<0.05$)，其中植物乳杆菌 Picp-2 发酵组的提升率最大。中华红芝和黑曲霉发酵

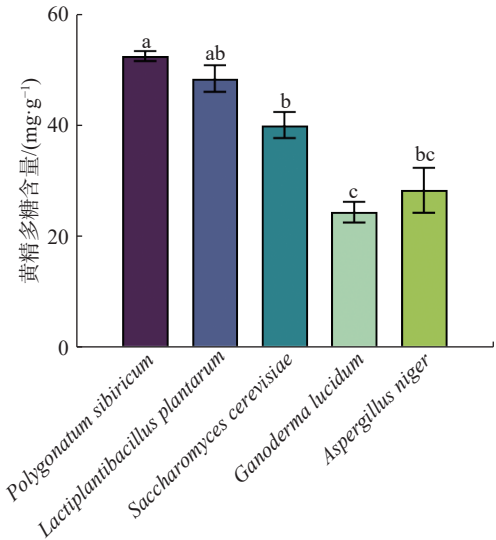


图 1 不同菌株发酵的黄精多糖含量 ($P<0.05$)

Fig.1 The polysaccharide content of *Polygonatum sibiricum* fermented with different strains ($P<0.05$)

后黄精多糖 DPPH·清除率分别为 $21.50\%\pm1.08\%$ ， $22.48\%\pm0.55\%$ ，相较生黄精多糖 DPPH·清除率无显著变化。

2.3 不同菌株发酵黄精多糖·OH 清除率

·OH 属于活性氧 (ROS)，为生物体内天然存在的自由基，是生命系统最重要的一类，是引起食品氧化变质、机体器官病变的重要因子，通过评价·OH 清除率可直接反应出机体的抗氧化能力^[22]。不同菌株发酵后黄精多糖·OH 清除率如图 3 所示。经过植物乳杆菌 Picp-2、酿酒酵母 SY、中华红芝和黑曲霉发酵后，黄精多糖·OH 清除率分别为 $55.34\%\pm3.34\%$ ， $50.90\%\pm0.21\%$ ， $47.10\%\pm0.60\%$ ， $49.08\%\pm1.62\%$ ，相较生黄精多糖·OH 清除率 $48.93\%\pm0.11\%$ ，植物乳杆菌 Picp-2 发酵黄精多糖·OH 清除率上升了 13.10%，无统计学差异。

2.4 不同菌株发酵黄精多糖·O₂⁻清除率

·O₂⁻同·OH 一样，均属于活性氧，活性氧还包括过氧化氢 (H₂O₂)、氧化脂质 (LO·)、过氧化脂质 (LOO·) 等。·O₂⁻源于氧化酶在机体生命活动、血红蛋白自氧化及光解作用^[23]。不同菌株发酵后黄精多糖·O₂⁻清除率如图 4 所示，经过植物乳杆菌 Picp-2、酿酒酵母 SY、中华红芝和黑曲霉发酵后，黄精多糖·O₂⁻清除率分别为 $31.39\%\pm2.55\%$ ， $31.49\%\pm1.32\%$ ， $27.39\%\pm1.94\%$ ， $29.08\%\pm2.14\%$ ，生黄精多糖·O₂⁻清除率为 $27.42\%\pm2.17\%$ 。植物乳杆菌 Picp-2 和酿酒酵母 SY 发酵黄精多糖·O₂⁻清除率较生黄精多糖·O₂⁻清除率上升了 14.48% 和

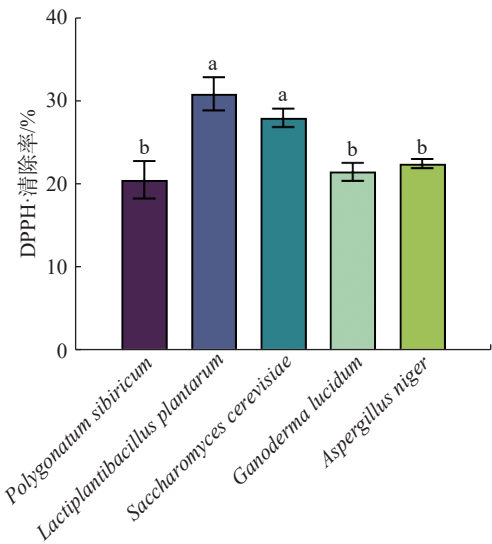


图 2 不同菌株发酵黄精多糖 DPPH·清除率 ($P < 0.05$)

Fig.2 The DPPH· scavenging rate of polysaccharide of *Polygonatum sibiricum* fermented with different strains ($P < 0.05$)

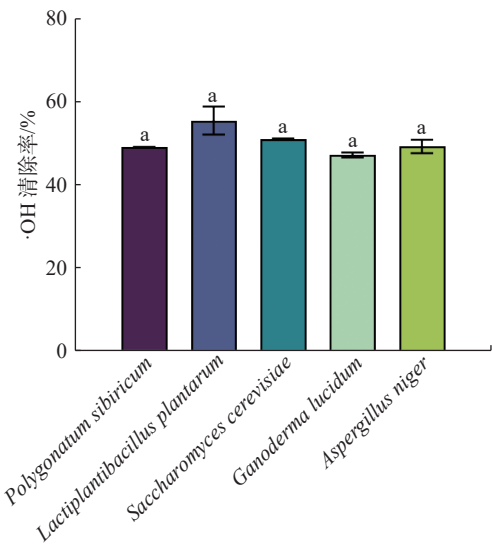


图 3 不同菌株发酵黄精多糖·OH清除率 ($P < 0.05$)

Fig.3 The ·OH scavenging rate of polysaccharide of *Polygonatum sibiricum* fermented with different strains ($P < 0.05$)

14.84%，无统计学差异。

2.5 不同菌株发酵黄精多糖的总还原力

抗氧化剂的抗氧化性能往往与还原能力呈正相关，通过 Fe^{3+} 还原方法，能够有效评价抗氧化能力^[24]。不同菌株发酵后黄精多糖总还原力如图 5 所示，经过植物乳杆菌 Picp-2、酿酒酵母 SY 发酵后，黄精多糖总还原力为 0.1224 ± 0.0176 和 0.1099 ± 0.0219 ，相较生黄精多糖总还原力 (0.0931 ± 0.0058) 分别显著提升了 31.47% 和 18.05%。而中华红芝和

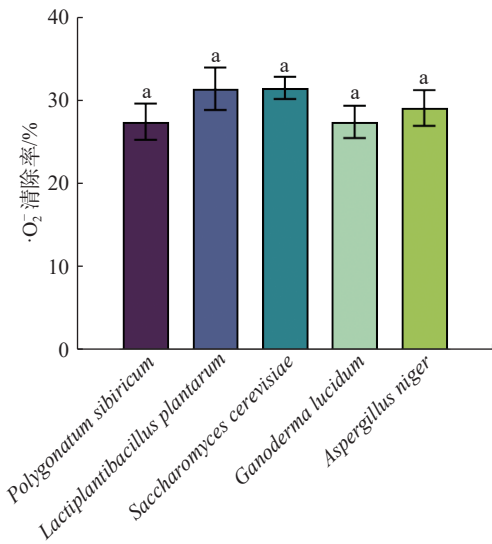


图 4 不同菌株发酵黄精多糖·O₂⁻清除率 ($P < 0.05$)

Fig.4 The ·O₂⁻ scavenging rate of polysaccharide of *Polygonatum sibiricum* fermented with different strains ($P < 0.05$)

黑曲霉发酵后黄精多糖总还原力分别为 0.0926 ± 0.0084 和 0.0963 ± 0.0107 ，相较生黄精多糖的总还原力无显著变化。

2.6 不同菌株发酵黄精多糖降血糖活性

不同菌株发酵后黄精多糖降血糖活性如图 6 所示。经过植物乳杆菌 Picp-2、酿酒酵母 SY、中华红芝和黑曲霉发酵后，黄精多糖 α -葡萄糖苷酶抑制率为 $70.89\% \pm 2.57\%$ ， $64.90\% \pm 0.78\%$ ， $69.34\% \pm 3.30\%$ ， $65.52\% \pm 7.95\%$ ，相较生黄精多糖 α -葡萄糖苷酶抑制率 ($38.69\% \pm 1.15\%$) 分别显著提升了 83.24%，67.74%，79.22%，69.35%，其中植物乳

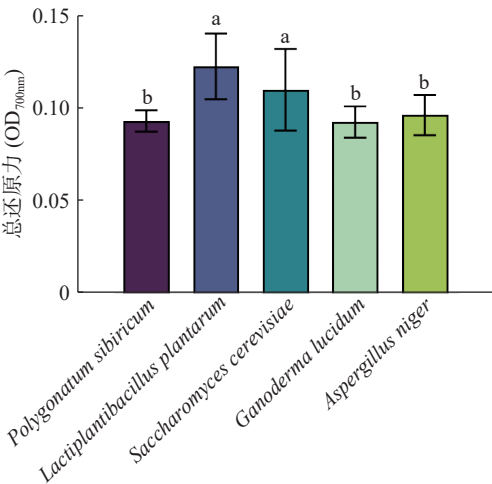


图 5 不同菌株发酵黄精多糖总还原力 ($P < 0.05$)

Fig.5 The total reducing power of polysaccharide of *Polygonatum sibiricum* fermented with different strains ($P < 0.05$)

杆菌 Picp-2 发酵组的抑制率提升幅度最大。多糖能够通过诱导 α -葡萄糖苷酶疏水性表面基团暴露,使其三级结构变化从而被抑制活性^[25]。

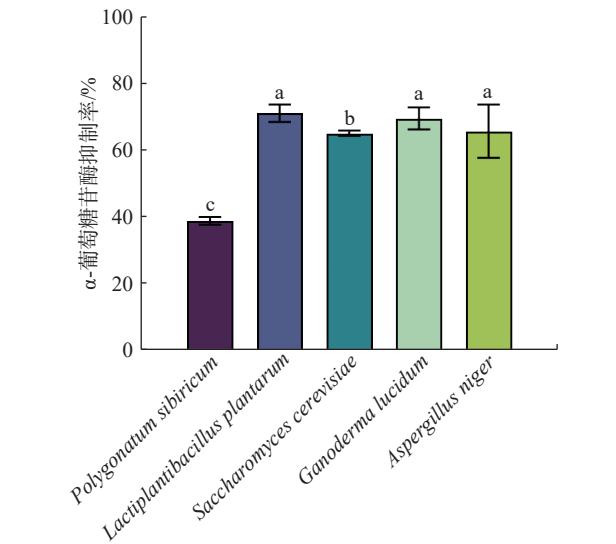


图6 不同菌株发酵黄精多糖 α -葡萄糖苷酶抑制率 ($P < 0.05$)
Fig.6 The inhibition rate of α -glucosidase of polysaccharide of *Polygonatum sibiricum* fermented with different strains ($P < 0.05$)

2.7 不同菌株发酵黄精多糖降血脂活性

不同菌株发酵后黄精多糖降血脂活性如图7所示。经过发酵后,植物乳杆菌 Picp-2 和酿酒酵母 SY 发酵黄精多糖胰脂肪酶抑制率分别为 $115.68\% \pm 1.18\%$ 、 $117.07\% \pm 4.79\%$, 相较生黄精多糖胰脂肪酶抑制率 ($121.58\% \pm 1.72\%$) 无显著变化;而中华红芝和黑曲霉发酵黄静多糖胰脂肪酶抑制率分别为 $76.85\% \pm 9.66\%$ 、 $107.76\% \pm 3.47\%$, 相较生黄精多糖胰脂肪酶抑制率分别显著降低了 44.73% 和 13.82%。多糖能够通过抑制胰脂肪酶活性,降低人体对脂质的吸收^[26]。微生物则可能通过代谢活动对黄精中多糖结构进行修饰,增强其对 α -葡萄糖苷酶、胰脂肪酶抑制,从而起到降血糖、降血脂的作用。

3 结 论

- a. 微生物发酵是一种条件温和、低能耗的中药材炮制方式,本文通过不同菌株分别黄精进行发酵,同时比较了不同发酵黄精多糖的抗氧化、降血糖、降血脂活性。
- b. 利用植物乳杆菌 Picp-2 对黄精进行液态发酵效果最佳,所得黄精多糖的 DPPH $\cdot$ 、 $\cdot$ OH、 $\cdot$ O₂⁻清除率和总还原力及 α -葡萄糖苷酶抑制率均最高。

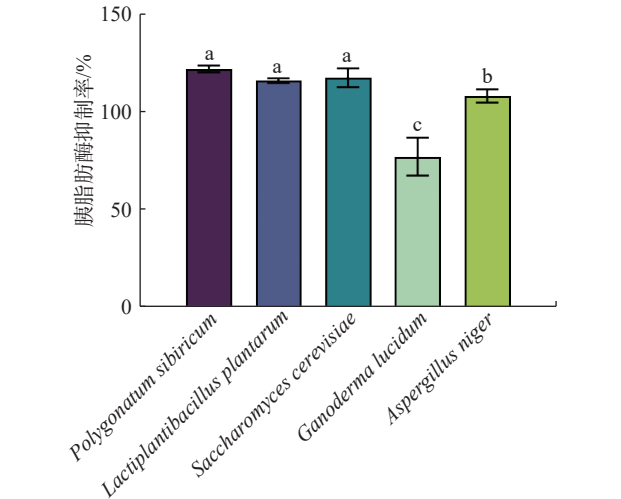


图7 不同菌株发酵黄精多糖胰脂肪酶抑制率 ($P < 0.05$)
Fig.7 The inhibition rate of pancreatic lipase of polysaccharide of *Polygonatum sibiricum* fermented with different strain ($P < 0.05$)

c. 本研究筛选确定了一株最适黄精发酵菌株植物乳杆菌 Picp-2, 能够有效提高黄精功效, 为黄精炮制工艺开发与研究提供了一定参考和理论依据。

参考文献:

[1] 陈小磊, 徐哲, 钱华丽, 等. 黄精炮制历史沿革及现代研究进展 [J/OL]. 中华中医药学刊: 1-15[2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.R.20240227.0833.002.html>.

[2] 宋添力, 张钰, 肖强, 等. 黄精化学成分以及药用价值的研究进展 [J/OL]. 中华中医药学刊: 1-17 [2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.R.20240228.1049.009.html>.

[3] LIU D, TANG W, HAN C, et al. Advances in *Polygonatum sibiricum* polysaccharides: extraction, purification, structure, biosynthesis, and bioactivity[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1074671.

[4] CUI X W, WANG S Y, CAO H, et al. A review: the bioactivities and pharmacological applications of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides[J]. *Molecules*, 2018, 23(5): 1170.

[5] GONG H, GAN X N, LI Y Z, et al. Review on the genus *Polygonatum* polysaccharides: extraction, purification, structural characteristics and bioactivities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 229: 909-930.

[6] ZHANG Q H, YANG Z Y, SU W K. Review of studies on polysaccharides, lignins and small molecular compounds from three *Polygonatum* Mill. (*Asparagaceae*) spp. in crude and processed states[J]. *International Journal of*

- Biological Macromolecules, 2024, 260(Pt 2): 129511.
- [7] ZHAO P, ZHAO C C, LI X, et al. The genus *Polygonatum*: a review of ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2018, 214: 274–291.
- [8] 钟凌云, 龚千锋, 张的风, 等. 黄精炮制研究现状分析 [J]. *中药材*, 2007, 30(12): 1618–1621.
- [9] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典-2020 年版-一部 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 32.
- [10] 秦宇雯, 张丽萍, 赵祺, 等. 九蒸九晒黄精炮制工艺的研究进展 [J]. *中草药*, 2020, 51(21): 5631–5637.
- [11] 李彦伟, 魏伟, 刘凤霞, 等. 高压提取黄精糖类物质的工艺研究 [J]. *常州大学学报 (自然科学版)*, 2019, 31(1): 80–84.
- [12] ABRAHAM K, GÜRTLER R, BERG K, et al. Toxicology and risk assessment of 5-Hydroxymethylfurfural in food[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2011, 55(5): 667–678.
- [13] ZHANG X C, TAO N P, WANG X C, et al. The colorants, antioxidants, and toxicants from nonenzymatic browning reactions and the impacts of dietary polyphenols on their thermal formation[J]. *Food & Function*, 2015, 6(2): 345–355.
- [14] 鹿伟, 夏勇, 张世鑫, 等. 5-HMF 对早期 2 型糖尿病合并肝损伤小鼠糖脂代谢和肝功能影响的研究 [J]. *预防医学*, 2021, 33(11): 1109–1112.
- [15] 董建伟, 蔡乐, 李雪娇, 等. 中药材的微生物发酵改性研究进展 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 2018, 40(6): 1207–1212.
- [16] 崔亚鹏, 许锐, 陈泽元, 等. 酿酒酵母和植物乳杆菌混合发酵对金银花浸提液多酚物质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(5): 95–99.
- [17] ZHU Z H, WANG Y W, LIN D F, et al. Changes in polyphenols composition and antioxidative properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) inflorescences pretreated by *Ganoderma lucidum*[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 195: 116422.
- [18] 吴德超, 赵正权, 李运芝, 等. 黑曲霉转化中药化学成分研究进展 [J]. *中国药学杂志*, 2022, 57(14): 1153–1160.
- [19] 王彦平, 娄芳慧, 陈月英, 等. 苯酚-硫酸法测定紫山药多糖含量的条件优化 [J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(4): 170–174.
- [20] 贺成虎. 自然发酵麦麸的菌群分析以及不同发酵方式对麦麸生物活性物质的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [21] 张献忠, 黄海智, 钟烈洲, 等. 植物提取物体外抗氧化活性评价方法研究进展 [J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(11): 122–128.
- [22] 路艳珍. 苹果叶中活性成分的分离分析及活性评价研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [23] 季晓彤. 桃仁抗氧化肽的制备及其抗氧化作用的研究 [D]. 江苏无锡: 江南大学, 2018.
- [24] 王永洁, 秦玲, 范莹, 等. 海洋中药多糖的研究进展 [J]. *中国海洋药物*, 2024, 43(3): 73–78.
- [25] HE X, CHEN L Y, PU Y J, et al. Fruit and vegetable polyphenols as natural bioactive inhibitors of pancreatic lipase and cholesterol esterase: inhibition mechanisms, polyphenol influences, application challenges[J]. *Food Bioscience*, 2023, 55: 103054.
- [26] ZUPANČIČ O, KUSHWAH V, PAUDEL A. Pancreatic lipase digestion: the forgotten barrier in oral administration of lipid-based delivery systems?[J]. *Journal of Controlled Release*, 2023, 362: 381–395.

(编辑: 董 伟)