DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260617003
引用格式: 刘帅, 陈琛, 赵山山, 等. 宣木瓜中抗氧化乳酸菌的筛选及在发酵宣木瓜汁中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 259–269.
Liu Shuai, Chen Chen, Zhao Shanshan, et al. Screening of antioxidant lactic acid bacteria in *Chaenomeles speciosa* and its application in fermented *Chaenomeles speciosa* juice [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 259–269. (in Chinese with English abstract).

宣木瓜中抗氧化乳酸菌的筛选及在发酵宣木瓜汁中的应用

刘 帅[1], 陈 琛[1], 赵山山[1], 孙宏图[1], 刘洪伟[2], 郝光飞[1*]
(1. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 邯郸 056038; 2. 河北省科学院生物研究所, 石家庄 050000)

摘 要: 目的 从宣木瓜中分离筛选抗氧化性乳酸菌。**方法** 通过对宣木瓜中的乳酸菌菌株进行筛选、分离、鉴定评估其益生特性、抗氧化能力。**结果** 得到 4 株优势菌株 MG3、MG9、MG13、MG21 均为植物乳杆菌。其中菌株 MG13 具有较好的益生功能同时具备较强抗氧化活性: 发酵上清液和菌悬液 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基的清除率分别为 90.93%和 59.30%, 羟基自由基清除率分别为 93.47%和 49.19%、超氧阴离子清除率分别为 91.00%和 72.25%。将 MG13 用于宣木瓜汁发酵, 可显著提升其抗氧化活性, 与未发酵样品相比 DPPH 自由基清除率和 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]阳离子自由基清除率分别提升至 78.91%和 87.02%, 发酵分别提升了宣木瓜汁中黄酮和多酚的含量 55.44%和 30.25%, 有效改善了宣木瓜汁的功能特性。**结论** MG13 发酵显著优化了宣木瓜汁的品质, 本研究为药食同源植物基资源的微生物发酵利用提供了理论依据与优质菌种资源。

关键词: 宣木瓜; 乳酸菌; 益生特性; 抗氧化活性; 发酵宣木瓜汁
中图分类号: TS255.7 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0259–11

Screening of antioxidant lactic acid bacteria in *Chaenomeles speciosa* and its application in fermented *Chaenomeles speciosa* juice

LIU Shuai[1], CHEN Chen[1], ZHAO Shan-Shan[1], SUN Hong-Tu[1], LIU Hong-Wei[2], HAO Guang-Fei[1*]
(1. *College of Life Sciences and Food Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*; 2. *Institute of Biology*, *Hebei Academy of Sciences*, *Shijiazhuang* 050000, *China*)

ABSTRACT: Objective To isolate and screen lactic acid bacteria with antioxidant capacity from *Chaenomeles speciosa*. **Methods** The probiotic properties and antioxidant capacity of *Chaenomeles speciosa* were evaluated by screening, isolating and identifying the lactic acid bacteria strains in it. **Results** The 4 dominant strains, namely MG3, MG9, MG13 and MG21, were identified as *Lactiplantibacillus plantarum*. Strain MG13 exhibited excellent probiotic

收稿日期: 2026-06-17
第一作者: 刘帅(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: 740918394@qq.com
***通信作者:** 郝光飞(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: wuyucool@126.com

performance and strong antioxidant activity. The 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging rates of its fermentation supernatant and bacterial suspension reached 90.93% and 59.30%, respectively; the hydroxyl radical scavenging rates were 93.47% and 49.19%; and the superoxide anion radical scavenging rates were 91.00% and 72.25%. When MG13 was applied to ferment *Chaenomeles speciosa* juice, the antioxidant activity of the juice was significantly improved. Compared with unfermented juice, the DPPH and 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radical scavenging rates of fermented juice increased significantly to 78.91% and 87.02%, respectively. The content of flavonoids and polyphenols in fermented juice rose by 55.44% and 30.25%, which effectively enhanced the functional properties of *Chaenomeles speciosa* juice. **Conclusion** Fermentation with strain MG13 significantly optimizes the quality of *Chaenomeles speciosa* juice. This study provides theoretical support and high-quality strain resources for the microbial fermentation and utilization of medicinal and edible plant materials.

KEY WORDS: *Chaenomeles speciosa*; lactic acid bacteria; probiotic properties; antioxidant activity; fermented *Chaenomeles speciosa* juice

0 引 言

宣木瓜(*Chaenomeles speciosa*)是一种《本草纲目》记载的具有舒筋活络、祛风除湿功能的食药同源的蔷薇科植物果实[1]; 其中含有较多的熊果酸、齐墩果酸等抗氧化生理活性物质[2]。随着现代提取分离技术的发展, 宣木瓜的深加工产品逐渐丰富, 研究多集中于宣木瓜有效成分的提取工艺优化以及开发宣木瓜提取物作为功能性添加剂, 应用于化妆品、保健品等领域。目前针对宣木瓜抗氧化活性的机制研究多集中于化学活性成分方面[3], 而利用乳酸菌发酵对宣木瓜进行生物转化及其功能探究的相关研究目前研究较少。

乳酸菌是食品发酵领域应用最为广泛的益生菌类微生物, 能够生成乳酸, 降低体系酸度, 抑制腐败微生物增殖, 依靠生物作用延长食品贮藏期限; 同时菌株分泌多种胞外酶, 降解原料大分子组分, 释放游离氨基酸、挥发性风味物质, 优化食品香气、口感与质地。发酵过程还可释放多酚等活性功能成分, 提升产品抗氧化活性, 赋予食品附加营养价值。目前研究已筛选出多株具备优良抗氧化活性的乳酸菌: 王少龙[4]研究发现, 从酒曲中分离得到的戊糖片球菌 JQ-M3, 在过氧化氢环境中具有良好的生长耐受能力, 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除率可达 89.18%; 王刚等[5]研究发现, 泡菜中筛选分离的干酪乳杆菌 CCFM1566 及植物乳杆菌 CCFM8661 的 DPPH 自由基清除率均超过 60.0%, 对羟基自由基的清除能力也均高于 60.0%; 戴志伟等[6]研究发现从果蔬类西梅中筛选的肠膜明串珠菌 E2, DPPH 自由基清除率为 65.0%, 将其应用于西梅汁发酵可显著提升西梅汁的抗氧化活性。然而现有研究对高抗氧化菌株的发酵特性展开系统探究较少[7−8], 本研究利用宣木瓜原生优势菌株发酵果汁, 同步实现多酚、黄酮功能性成分富集, 开发高抗氧化药食同源发酵果汁, 为宣木瓜深加工提供理论与菌种支撑。

本研究对产自安徽、广西、河南等不同地区的宣木瓜中的乳酸菌菌株进行筛选、分离、鉴定, 通过评估益生性能、抗氧化能力, 结合形态学观察及分子生物学鉴定明确其分类地位。本研究旨在筛选抗氧化能力优良且益生性能良好的的乳酸菌菌株, 用于发酵宣木瓜汁以提升营养价值。研究成果将为药食同源食物提供加工理论与微生物资源, 推动食品发酵业的发展。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

宣木瓜产自安徽、广西、河南。

DPPH、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](分析纯, 上海源叶生物科技有限公司); 鼠李糖乳杆菌(美国菌种保藏中心); 福林酚、浓盐酸、水杨酸、$FeSO_4$、三羟基氨基酸甲烷-盐酸缓冲液(Tris-HCi)、过氧化氢、邻苯三酚、过硫酸钾、无水乙醇(分析纯)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 亚硝酸钠、硝酸铝、强氧化钠(分析纯)(国药集团化学试剂有限公司); 芦丁标准品(纯度≥98%)、德氏/曼-罗哥沙-夏普(De's/Man-Rogosa-Sharp, MRS)固体培养基、MRS 液体培养基、胃蛋白酶(3000 U/g)、牛胆盐、胰蛋白酶(250 U/g)(北京索莱宝科技有限公司)。

SQ510C 立式压力蒸汽灭菌器(重庆雅马拓科技有限公司); SW-CJ-2D 垂直流超净工作台(苏州净化设备有限公司); pH-220 笔式酸度计(绍兴市苏珀仪器股份有限公司); ZXGPB2160 隔水恒温培养箱(上海智城分析仪器制造有限公司); XPR204 电子分析天平[精度 1 mg, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]。

1.2 实验方法

1.2.1 乳酸菌的分离与纯化

称取 10 g 木瓜样品置于灭菌的研钵捣碎, 然后置于

90 mL、0.85%生理盐水中, 使用恒温摇床 30 ℃振荡 0.5 h。然后进行 10 倍浓度稀释, 选择合适的稀释浓度样品采用倾注法对乳酸菌进行分离, 将凝固好的 MRS 培养基于厌氧条件下 37 ℃倒置培养 48 h, 然后挑取疑似乳酸菌菌落形态的菌落进行三区域划线, 纯化 2~3 次最后使用 30%甘油进行保存备用。

1.2.2　菌株益生功能

(1)菌株耐酸耐胆盐能力

参考樊秋月等[9]的方法并稍作修改。按体积分数 2%取菌悬液接种于不同初始 pH (2.0、3.0)的 MRS 培养基中, 在 37 ℃条件下, 培养 24 h。测定 pH 2.0、pH 3.0 下菌液的 $OD_{600\ nm}$ 值。空白对照为: 按体积分数 2%取菌悬液接种于自然 pH 的 MRS 培养基中的菌液。菌株在不同初始 pH 下的存活率计算公式如(1)所示:

$$\text{菌株存活率/\%}=\frac{\text{不同pH菌液OD值}}{\text{未经过pH处理的OD值(空白对照)}}\times 100\% \quad (1)$$

按体积分数 2%取菌悬液接种于不同胆盐浓度(0.2%、0.3%)的 MRS 培养基, 在 37 ℃条件下, 培养 24 h。测定 0.2%、0.3%胆盐浓度下菌液的 $OD_{600\ nm}$ 值。空白对照为: 按体积分数 2%取菌悬液接种于不含胆盐的 MRS 培养基中的菌液, 菌株在不同胆盐浓度下的存活率计算公式如(2)所示:

$$\text{菌株存活率/\%}=\frac{\text{不同胆盐浓度菌液的OD值}}{\text{未经胆盐浓度处理的菌液OD值(空白对照)}}\times 100\% \quad (2)$$

(2)菌株耐人工胃肠液能力

参考杨园园[10]的方法并稍作改编。取 1 mL 菌悬液与 9 mL 人工胃液混匀, 在 37 ℃条件下培养 3 h。测定其在 0 h、3 h 下的 $OD_{600\ nm}$ 值。未经人工胃液处理的菌液为空白对照组。

取上述人工胃液处理 3 h 后的菌液 1 mL 与 9 mL 人工肠液混匀, 在 37 ℃条件下培养 4 h, 测定其在 0 h、4 h 下的 $OD_{600\ nm}$ 值。未经人工肠液处理的菌液为空白对照组。菌株存活率计算公式如(3)、(4)所示:

$$\text{菌株存活率/\%}=\frac{\text{经人工胃液处理后的菌液OD值}}{\text{未经人工胃液处理后的菌液OD值(空白对照)}}\times 100\% \quad (3)$$

$$\text{菌株存活率/\%}=\frac{\text{经人工肠液处理后的菌液OD值}}{\text{未经人工肠液处理后的菌液OD值(空白对照)}}\times 100\% \quad (4)$$

1.2.3　菌株抗氧化能力测定

(1)乳酸菌各组分的制备

取乳酸菌发酵液, 于 4 ℃、8000 r/min 离心 10~15 min, 弃去菌体沉淀, 收集上清液。将上清液经 0.22 μm 无菌滤膜过滤除菌, 除去残留菌体, 所得滤液即为乳酸菌发酵上清液。供试乳酸菌经 MRS 液体培养基 37 ℃活化 2 代, 取对数生长期菌液洗涤、重悬。调整菌体的浓度为 1×10^8 CFU/mL, 即为菌悬液[11]。

(2) DPPH 自由基清除能力

参考 Zhang 等[12]的方法并稍作改编。取 0.1 mmol/L DPPH-乙醇溶液 2 mL, 加入 1 mL 待测样品充分混匀避光反应 30 min, 在 517 nm 波长下测量吸光度 A_1。以无水乙醇代替样品作为对照组 A_0, 以无水乙醇代替 DPPH 溶液作为空白组 A_2。计算公式如(5)所示:

$$\text{DPPH 自由基清除率/\%}=(1-\frac{A_1-A_2}{A_0})\times 100\% \quad (5)$$

(3)羟基自由基清除能力

采用水杨酸法[13]。9 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液 1 mL、9 mmol/L $FeSO_4$ 溶液 1 mL、8.8 mmol/L 过氧化氢溶液 1 mL, 加入 1 mL 待测样品, 混匀后 37 ℃水浴 30 min, 于 510 nm 测定吸光度 A_4。以蒸馏水代替样品为对照组 A_3, 以蒸馏水代替水杨酸为空白组 A_5。计算公式如(6)所示:

$$\text{羟基自由基清除率/\%}=1-(\frac{A_4-A_3}{A_5-A_3})\times 100\% \quad (6)$$

(4)超氧阴离子自由基清除能力

参考 Zhang[14]的方法并稍作改编。取 4.5 mL 50 mmol/L Tris-HCl 缓冲液, 25 ℃预热 20 min, 加入 1 mL 待测样品 0.4 mL 25 mmol/L 邻苯三酚溶液, 快速混匀。反应 4 min 后滴加 1 mL 浓盐酸终止反应, 于 325 nm 测定吸光度 A_7。以蒸馏水代替样品为对照组 A_6, 空白组为 A_8。计算公式如(7)所示:

$$\text{超氧阴离子自由基清除率/\%}=1-(\frac{A_7-A_6}{A_8-A_6})\times 100\% \quad (7)$$

1.2.4　菌株在宣木瓜中生长适应性

参考樊雨薇等[15]并稍作改编。将目标菌株按 2%接种量接种于宣木瓜汁中, 培养 37 ℃, 每 2 h 测量 $OD_{600\ nm}$ 值并绘制菌株生长曲线, 将生长性能强的菌株用于后续实验。

1.2.5　菌株鉴定

(1)生理生化鉴定

将筛选出益生性能好和抗氧化能力强的菌株进行革兰氏染色观察细胞形态, 以及明胶液化、产吲哚、硫化氢、硝酸盐还原和糖醇发酵实验。

(2) 16S rDNA 基因测序及系统发育树的构建

收集优势菌株菌体沉淀送至赛恒生物科技有限公司(上海)对目标菌株开展 16S rDNA 基因序列测定, 与美国国家生物技术信息中心(National Center for Biotechnology Information, NCBI)数据库进行同源性比对分析, 结合序列相似性完成菌株的分子生物学鉴定构建菌株系统发育树。

1.2.6　MG13 发酵宣木瓜汁的制备

本研究基于植物乳植杆菌生长特性及宣木瓜果汁理化性质, 结合文献[16]报道的发酵工艺参数, 通过预实验优化关键步骤, 形成最终工艺: 挑选成熟完好的宣木瓜果实, 经清洗、去皮去籽后调整料水比榨汁, 过滤得到原果汁, 将果汁巴氏杀菌(75 ℃, 15 s)后冷却至 37 ℃。植物乳植

杆菌 MG13 接种于 MRS 液体培养基, 37 ℃培养 24 h 后, 4500 r/min 离心 5 min, 弃上清液, 生理盐水清洗菌体, 调整菌体浓度约为 1×10^9 CFU/mL; 以 0.855%接种量接入果汁, 36.73 ℃条件下发酵 19.19 h, 未接种乳酸菌的宣木瓜果汁为对照组。

1.2.7 MG13 发酵对宣木瓜汁抗氧化性影响测定

取留存的宣木瓜汁样品(发酵前、中、后), 放入无菌组织捣碎机中, 加入 40 mL 无水乙醇(料液比 1:4, *w*:*V*), 高速捣碎 2 min, 制成匀浆; 将匀浆转移至无菌离心管中, 4 ℃、8000 r/min 离心 15 min, 取上清液, 用无菌滤纸过滤, 收集滤液, 即为提取液, 置于 4 ℃冷藏, 12 h 内完成检测[17]。

取 0.1 mmol/L DPPH-乙醇溶液 2 mL, 加入 1 mL 待测样品充分混匀避光反应 30 min, 在 517 nm 波长下测量吸光度 A_{10}。以无水乙醇代替样品作为对照组 A_9, 以无水乙醇代替 DPPH 溶液作为空白组 A_{11}。计算公式如(8)所示:

$$\text{DPPH 自由基清除率/\%}=(1-\frac{A_{10}-A_{11}}{A_9})\times100\% \quad (8)$$

参照通用 ABTS 分光光度法进行测定。配制 7.4 mmol/L ABTS 溶液与 2.6 mmol/L 过硫酸钾溶液, 等体积混合后避光静置 12 h, 得到 ABTS 储备液; 使用无水乙醇稀释储备液, 调节其在 734 nm 处吸光度为 0.70±0.02, 制得 ABTS 工作液。吸取 1 mL 待测样品提取液, 加入 4 mL ABTS 工作液, 涡旋混匀, 室温避光反应 6 min, 于 734 nm 波长测定吸光度, $ABTS^+$自由基清除率计算公式如(9)所示:

$$ABTS^+\text{自由基清除率/\%}=(1-\frac{A_{13}-A_{14}}{A_{12}})\times100\% \quad (9)$$

1.2.8 MG13 发酵对宣木瓜汁功能性成分影响测定

(1)总酚含量的测定

参考 Castro 等[18]方法稍作改编。采用福林酚法酚类物质还原福林酚试剂产生蓝色络合物, 765 nm 测吸光度, 以没食子酸做标准曲线定量, 求得回归方程为 Y=0.087X+0.002(决定系数 r^2=0.992)。样品中总酚含量计算公式如(10)所示:

$$W=\frac{C_1\times V_1\times N_1}{M_1} \quad (10)$$

式中: C_1 为没食子酸质量浓度, mg/mL; V_1 为提取液总体积, mL; N_1 为稀释倍数; M_1 为取样量, mL。

(2)总黄酮含量的测定

参考李长健[19]方法稍作改编。采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠比色法, 黄酮类在碱性条件下与亚硝酸钠、硝酸铝络合显色, 510 nm 测吸光度, 芦丁为标准品, 求得回归方程为 Y=0.0367X+0.003 (r^2=0.9991)。样品中总黄酮含量计算公式如(11)所示:

$$W=\frac{C_2\times V_2\times N_2}{M_2} \quad (11)$$

式中: C_2 为芦丁质量浓度, mg/mL; V_2 为提取液总体积, mL; N_2 为稀释倍数; M_2 为取样量, mL。

1.2.9 MG13 发酵对宣木瓜汁可溶性固形物影响测定

采用手持折射仪法。取适量发酵宣木瓜果汁, 经滤纸过滤除去悬浮残渣, 在 20 ℃条件下使用手持折射仪测定滤液可溶性固形物含量, 结果以°Brix 表示, 每组平行测定 3 次。

1.2.10 感官评价

采用随机 3 位数盲评法开展样品感官评定, 样品随机递送并设置重复品评, 品评间隙清水漱口以消除干扰, 选择 15 名接受专业训练的人员, 从色泽、香气、滋味、组织形态等方面进行评价, 满分 100 分(表 1)。

表 1 宣木瓜果汁感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for *Chaenomeles speciosa* juice

项目	评分标准	得分/分
色泽(20 分)	色泽均匀透亮, 光泽自然, 无杂色	17~20
	色泽较均匀, 光泽一般, 无明显分层	13~16
	色泽不均, 暗沉, 轻微浑浊分层	9~12
	颜色异常, 严重浑浊、分层、霉点异色	0~8
香气(25 分)	木瓜果香浓郁纯正, 发酵乳香, 无异味	21~25
	果香较明显, 发酵香气正常	17~20
	果香变淡, 发酵味偏重, 无不良气味	13~16
	果香微弱, 出现酸败味、刺鼻发酵味	0~12
滋味(35 分)	木瓜风味突出, 发酵口感柔和, 回味好	30~35
	酸甜尚可, 酸味甜味略重, 风味较协调	24~29
	酸味明显偏重, 果香被掩盖, 口感一般	18~23
	过酸苦涩、有馊味、刺激味, 无法接受	0~17
组织形态(20 分)	液体均匀, 流动性好, 无明显沉淀、悬浮物	17~20
	少量细微沉淀, 流动性正常, 无分层	13~16
	沉淀较多, 轻微分层, 流动性变差	9~12
	大量沉淀、明显分层、出现絮状物	0~8

1.3　数据处理

采用 SPSS 21 和 Origin 2024 进行数据分析及绘图, 利用 MEGA11 构建系统发育树。

2　结果与分析

2.1　乳酸菌的分离与纯化结果

对宣木瓜样品中乳酸菌分离纯化, 得到 58 株乳酸菌菌株, 菌株在碳酸钙 MRS 培养基中生长有明显溶钙现象, 菌落呈圆形、凸起、大小中、微白, 符合乳酸菌的菌落特征。菌株革兰氏染色后镜检呈紫色杆状、无芽孢、无荚膜, 符合植物乳杆菌基本特征(表 2)。

表 2　不同地区菌株分离情况(个)
Table 2　Isolation status of strains in different regions (in units)

地区	革兰氏染色		镜检		合计
	阳性	阴性	球菌	杆菌	
广西省	18	1	15	4	19
安徽省	27	1	25	3	28
河南省	13	4	16	1	17
合计	58	6	56	8	64

2.2　菌株益生特性分析结果

2.2.1　菌株耐酸耐胆盐实验结果

从 58 株菌株中筛选出 18 株溶钙效果显著的菌株开展益生特性测定, 其中 MG3、MG9、MG13、MG17、MG18、MG21 综合性能更优(图 1A)。6 株菌在 pH 3.0 下存活率均超过 85%, 当 pH 为 2.0 时菌株 MG3、MG9、MG13、MG17 依然可以保持在 80%以上存活率。其中菌株 MG13 存活率最高(87.26%), 明显优于干酪乳杆菌以及分离自临夏地区传统泡菜中的植物乳杆菌[20–21]。在人体肠道胆盐浓度范围内, 上述 6 株菌耐胆盐能力良好(图 1B), 当胆盐浓度为 0.30%时, 6 株菌株存活率均在 49%以上, 其中菌株 MG13 表现出了较强的胆盐耐受能力(63.02%), 明显优于分离自新疆传统酸马奶源乳酸菌 K-9 以及自然发酵黏豆包谷物发酵液分离的棒状乳杆菌HSDF12在0.30%浓度下的存活率[22–23]。分离自宣木瓜的乳酸菌能够保留更多活菌抵达肠道发挥益生功能, 调节肠道菌群、促进营养物质吸收。

2.2.2　菌株耐人工胃肠液耐受测定结果

胃肠道耐受性测试结果表明(图 2), 6 株菌株在模拟胃液中处理 3 h 后, 除了菌株 MG18 外, 其余 5 株菌株存活率均不低于 75%(图 2A), 其中菌株 MG13 存活率最高(89.31%), 与现有研究的结果相符[24]。在模拟肠液处理 4 h 后, 各菌株存活率普遍下降(图 2B), 其中菌株 MG17 和 MG18 受肠液影响最大, 可能是胃蛋白酶对细胞结构破坏导致。菌株 MG13 存活率最高(55.85%), 但低于新疆哈萨克马奶中筛选的乳酸杆菌[25]。分析原因可能是宣木瓜源的乳酸菌长期适应植物源压力, 缺乏肠道蛋白酶的定向驯化, 表明乳酸菌肠道耐受能力并非随机分布, 而是与其原始生境长期驯化密切相关, 导致了菌株 MG13 的存活率不如乳酸杆菌。但菌株 MG13 在胆盐、胰蛋白酶多重胁迫下活菌数下降幅度最小, 稳定性强, 适合作为益生菌功能开发。

2.3　菌株抗氧化能力测定结果

本研究采用 DPPH 自由基、羟基自由基及超氧阴离子自由基 3 种体外抗氧化评价体系, 分别测定 6 株供试乳酸菌以及对照菌鼠李糖乳酪杆菌 GG (*Lactobacillus rhamnosus* GG, LGG)的菌悬液与发酵上清液的自由基清除能力(图 3)。不同菌株的抗氧化能力存在显著差异(P<0.05)。在菌悬液中, MG13 对 DPPH 自由基、羟基自由基和超氧阴离子自由基的清除率分别达到约 59.30%、49.19%和 72.25%, 明显高于其他菌株; 发酵上清液的抗氧化能力整体高于菌悬液,

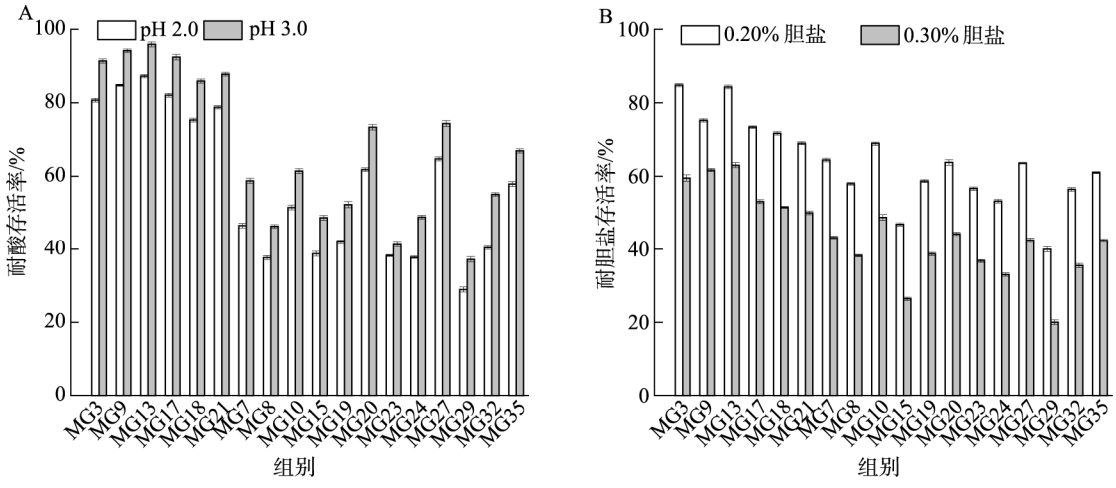
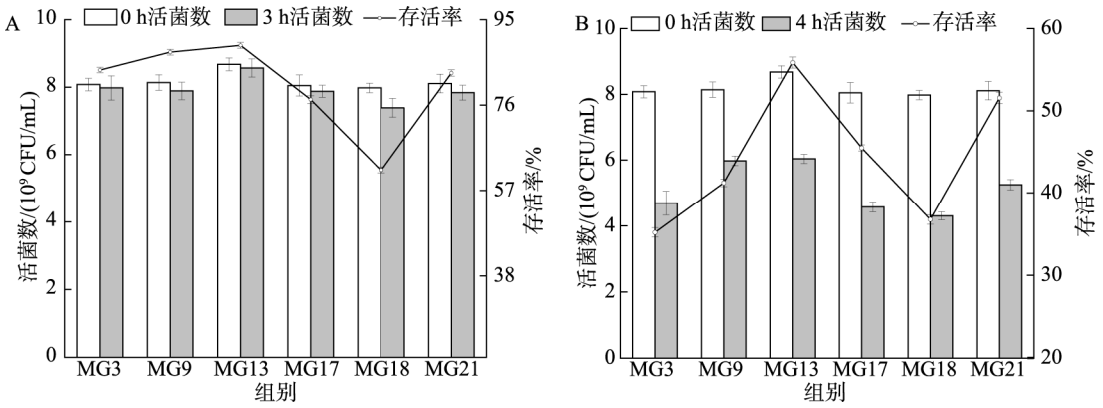


图 1　菌株耐酸耐胆盐存活率
Fig.1　Survival rates of acid and bile salt tolerance of strains



注: A 为耐胃液能力; B 为耐肠液能力。

图 2 各菌株的耐人工胃肠液能力

Fig.2 Tolerance of each strain to artificial gastric and intestinal fluids

其中 MG13 的 3 项自由基清除率分别达到约 90.93%、93.47%和 91.00%, 表现出较强的抗氧化活性, 且明显优于阳性对照菌株 LGG。对比而言, 菌株 MG13 的 DPPH 自由基清除能力(90.93%), 显著优于南阳浙川酸菜中筛选的植物乳杆菌 C2 (85.46%)[26]; 与从内蒙古奶酪中筛选的菌株 RQ9 (89.04%)相比[27], 菌株 MG13 的羟基自由基清除率明显更好; 与菌株 MRS12 相比, 浓度 10^9 CFU/mL 的菌株 MRS12 的超氧阴离子自由基清除率较高[28], 其菌悬液超氧阴离子自由基清除率与浓度 10^8 CFU/mL 菌株 MG13 不相上下, 说明菌株 MG13 超氧阴离子自由基清除率高于菌株 MRS12。

MG13 抗氧化能力突出, 主要归功于其菌体胞内的抗氧化酶、小分子活性物质以及细胞壁组分的协同作用。在发酵过程中, MG13 能够大量分泌胞外多糖、抗氧化肽、有机酸等多种代谢产物, 通过清除自由基、螯合金属离子等多重机制, 发挥广谱抗氧化活性, 其综合抗氧化能力优于其他供试菌株。MG13 抗氧化活性高的可能是宣木瓜本身具有极强的抗氧化能力, 源自宣木瓜的菌株 MG13 从宣木瓜中获得多种功能性成分, 为菌株生长代谢及抗氧化物质合成提供了充足的补充。

2.4 菌株在宣木瓜中生长适应性测定结果

菌株的生长情况相似, 发酵 4~16 h 处于对数生长期, 在 20~24 h 进入稳定期(图 4)。其中菌株 MG13 表现出了最优的生长性能, 在 24 h 发酵过程中稳定期 OD 值最高, 最大 $OD_{600\ nm}$ 值达 2.213, 菌株 MG3 生长相对较弱, 稳定期 $OD_{600\ nm}$ 值仅为 2.100。菌株 MG13 能够快速利用碳源进入对数生长期, 缩短发酵时间, 在发酵过程中能够耐受代谢产物维持较高的活菌数, 为后续功能发挥提供充足的生物量, 高生物量意味着更强的酶合成与底物转化能力[29], 因此结合益生功能结果, 抗氧化性结果, 菌株 MG13 被确定为优势菌株。

2.5 菌株鉴定结果

2.5.1 生理生化鉴定结果

对 4 株菌株(MG3、MG9、MG13、MG21)进行生理生化实验(表 3)。4 株菌株产硫化氢、吲哚实验、明胶液化实验均为阴性、硝酸盐还原均为阳性; 糖类发酵实验发现: 4 株菌株均能利用麦芽糖、葡萄糖、乳糖、蔗糖等碳水, 除 MG21 外均能利用半乳糖、甘露糖。

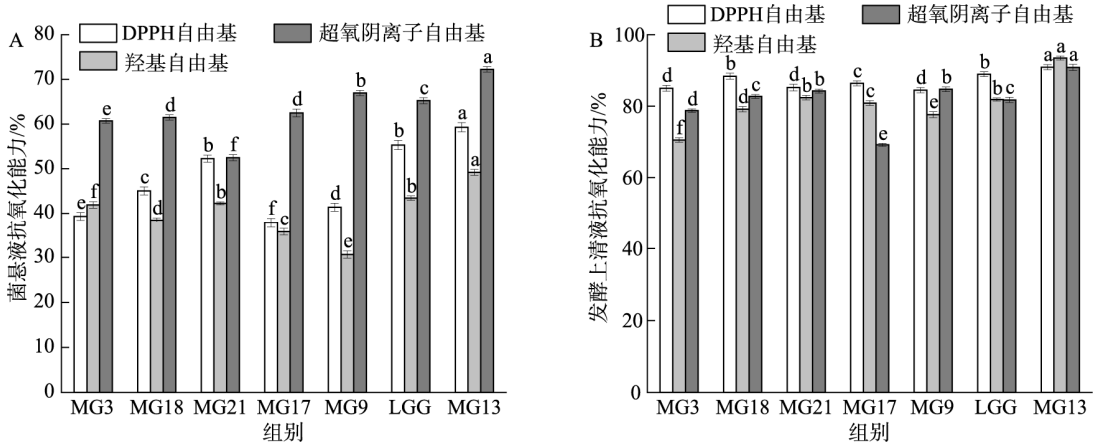


图 3 各菌株抗氧化能力

Fig.3 Antioxidant capacity of each strains

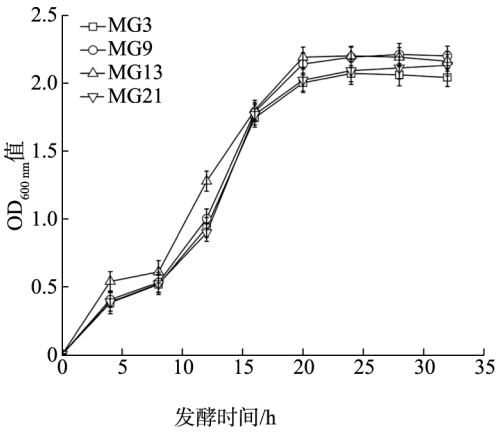


图 4　各菌株生长曲线
Fig.4　Growth curves of each strains

2.5.2　16S rDNA 基因测序及系统发育树的构建结果

经过 16S rDNA 序列测定, 对比 NCBI 数据库进行系统发育树构建(图 5), 4 株供试菌株 MG3、MG9、MG13、MG21 与模式菌株植物乳杆菌 JCM1149 (NR117813.1)聚为同一进化分支, 自举值达 100%, 表明其与植物乳杆菌亲缘关系极近。结合 16S rRNA 序列同源性比对结果, 可将 4 株菌鉴定为植物乳杆菌。

2.6　MG13 发酵对宣木瓜汁抗氧化性以及功能性成分影响测定结果

菌株 MG13 发酵宣木瓜汁对 DPPH 自由基、$ABTS^{+}$ 自由基均具有一定的清除能力, 都是随着发酵时间呈现先升高后降低的趋势, 且在 18 h 达到最大值(图 6)。而 18 h

表 3　各菌株生理、生化实验结果
Table 3　Physiological and biochemical experimental results of each strain

特征	MG3	MG9	MG13	MG21
硝酸盐还原	+	+	+	+
产硫化氢	–	–	–	–
吲哚实验	–	–	–	–
麦芽糖	+	+	+	+
葡萄糖	+	+	+	+
乳糖	+	+	+	+
半乳糖	+	+	+	–
甘露糖	+	+	+	–
蔗糖	+	+	+	+
明胶液化	–	–	–	–

注: +表示阳性; –表示阴性。

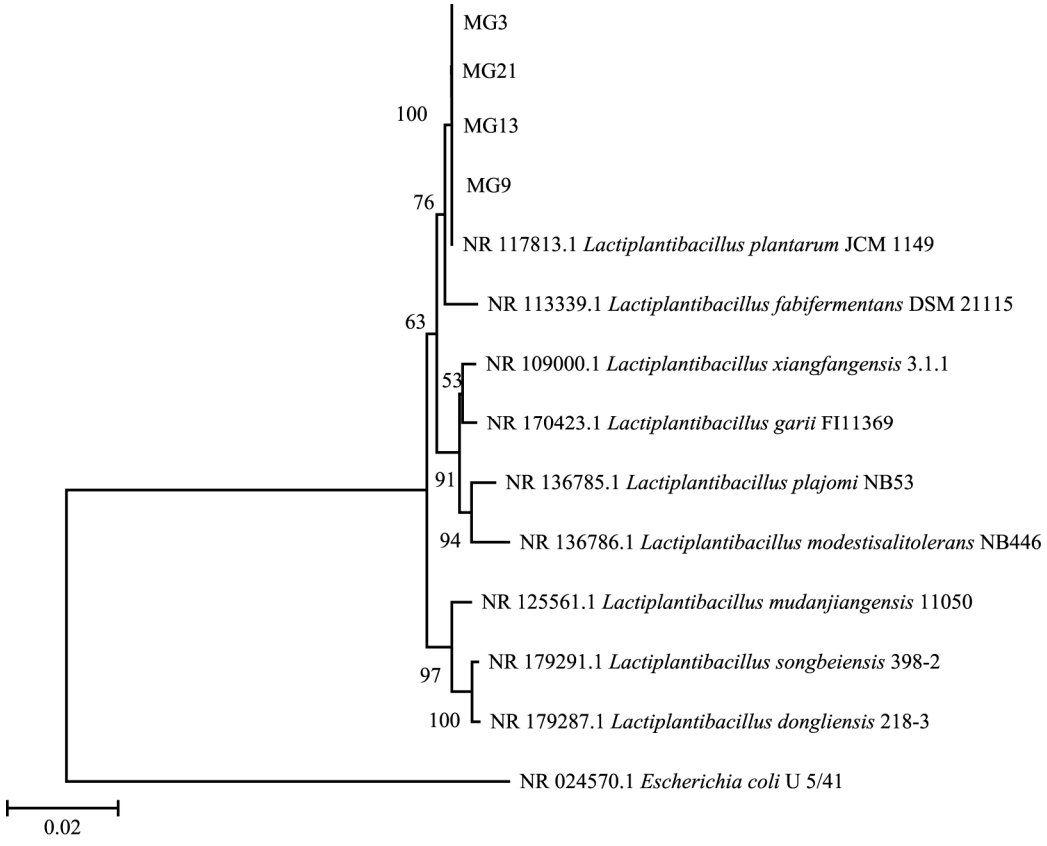


图 5　基于 16S rDNA 基因序列的菌株系统发育树
Fig.5　Phylogenetic tree of strains based on 16S rDNA gene sequences

后, DPPH 自由基清除率和 ABTS$^+$自由基清除率呈现下降。与未发酵样品(0 h)相比, DPPH 自由基清除率和 ABTS$^+$自由基清除率分别显著提升至 78.91%和 87.02% (P<0.05)。发酵前期乳酸菌生长代谢旺盛持续代谢多种水解酶破坏植物细胞壁结构, 将原本结合态功能性物质(黄酮、多酚等)水解为游离态, 游离态物质拥有更多的羟基结构更容易清除自由基, 而菌株自身有较强的抗氧化能力在发酵对数期内细胞内谷胱甘肽过氧化酶等保持高活性, 菌体细胞壁上胞外多糖等成分具有一定自由基清除能力, 因此发酵前期抗氧化能力快速上升。到了发酵中后期酸性环境可能释放氧化酶系(多酚氧化酶)会氧化降解多酚物质以及乳酸菌处于衰亡期, 菌株大量死亡导致抗氧化活性降低。与其他乳酸菌发酵饮料相比, 胡萝卜饮料经发酵后 DPPH 自由基清除率和 ABTS$^+$自由基清除率分别提高了 66.3%和 21.0%[30]; 在枸杞红枣复合饮料的发酵中, DPPH 自由基清除率可从 28.61%提升至 78.62%[31], 结果共同表明了乳酸菌发酵过程中产生的代谢物有利于食品的抗氧化性提升[32]。

菌株 MG13 发酵宣木瓜汁对黄酮和多酚均有一定的影响(图 6)。当发酵时间 20 h 宣木瓜汁中黄酮和多酚均达到峰值分别为 4.43 mg/mL 和 8.87 mg/mL。发酵分别提升了宣木瓜汁中黄酮和多酚的含量 55.44%和 30.25%。乳酸菌发酵通过改变果汁中黄酮和多酚等酚类化合物的组成、含量及存在形式影响其抗氧化功能。虽然总含量的变化方向不一, 但多数情况下发酵能通过生成活性更强的酚类衍生物, 最终实现增强果汁整体抗氧化能力的效果。DPPH 自由基和 ABTS$^+$自由基清除能力在 18 h 达到顶峰而黄酮、多酚在 20 h 才达到顶峰, 18 h 后整体的抗氧化能力下降了而黄酮和多酚仍然在积累, 表明乳酸菌可分泌糖苷酶, 催化宣木瓜中结合态黄酮、多酚糖苷水解, 生成游离酚苷元; 酚苷元具备更多活性酚羟基, 自由基清除能力优于糖苷前体物质, 推动体系抗氧化活性持续上升。发酵后期, 游离酚类物质易发生氧化降解、聚合反应, 造成功能性成分含量回落, 抗氧化能力随之下降。该结果表明, 乳酸菌酶解引发的酚类化合物结构转化, 是发酵宣木瓜汁抗氧化特性变化的重要内在原因。本研究与乳酸菌发酵蔓越莓汁以及发酵桑葚汁均呈现相同的趋势提高了酚类和黄酮的含量[33–34]。植物乳杆菌 ATCC14917 发酵苹果汁使总酚和黄酮含量下降但具有更强抗氧化物质(酚类衍生物、槲皮素等)含量增加[35]。

发酵过程 DPPH 自由基、ABTS$^+$自由基清除率波动幅度明显大于总多酚与总黄酮含量。原因可能是, 福林酚法仅能表征体系总酚物质含量, 无法区分结合态多酚糖苷与游离酚苷元。乳酸菌发酵可分泌糖苷酶, 催化宣木瓜中结合态黄酮、多酚糖苷水解转化为游离苷元; 相较于糖苷, 游离苷元具备更多暴露的酚羟基, 自由基清除活性更强。该过程中多酚总量增幅有限, 但高活性游离酚组分占比持续提高, 推动抗氧化活性明显上升。同时, 发酵生成的乳酸等有机酸可与酚类物质产生抗氧化协同作用, 进一步放大体系自由基清除能力。此外, 部分大分子多酚在微生物酶解作用下降解为高活性小分子酚, 同样使抗氧化活性响应更为灵敏。因此总多酚、总黄酮含量变化幅度小于体外抗氧化指标。

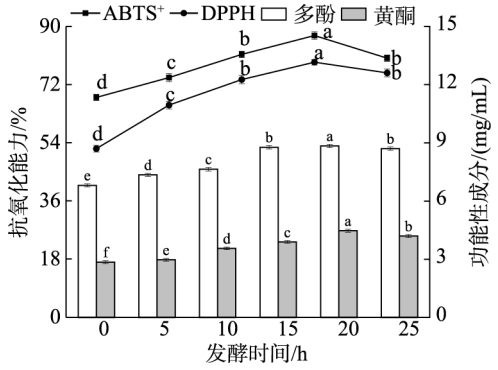


图 6 MG13 发酵宣木瓜汁抗氧化以及功能性成分影响

Fig.6 Effects of MG13 fermentation on antioxidant and functional components of *Chaenomeles speciosa* juice

2.7 MG13 发酵对宣木瓜汁可溶性固形物影响测定结果

发酵过程中可溶性固形物含量的持续下降, 反映了菌株 MG13 对宣木瓜汁中糖类碳源的持续利用, 其变化与发酵体系的抗氧化能力呈间接的关联(图 7)。发酵前期, 菌株旺盛的代谢活动在消耗糖类的同时, 分泌大量水解酶释放结合态多酚与黄酮, 推动活性成分含量与抗氧化能力同步升高[36]; 此阶段可溶性固形物的下降速率与多酚、黄酮的释放效率呈正相关, 间接促进了抗氧化活性的提升。发酵后期(24~30 h), 随着糖源耗尽, 菌株代谢活性衰退, 多酚、黄酮发生氧化降解, 导致抗氧化能力显著下降[37](P<0.05)。

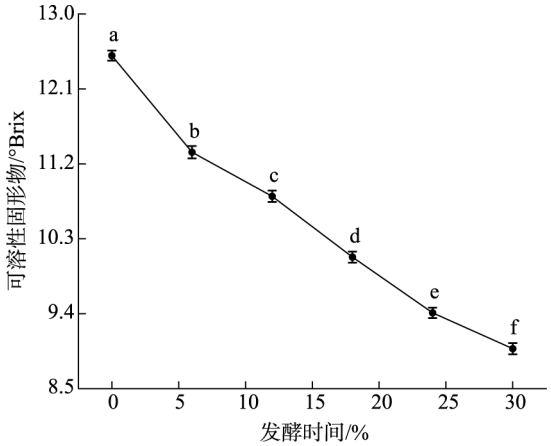


图 7 MG13 发酵宣木瓜汁对可溶性固形物的影响

Fig.7 Effects of MG13 fermentation on soluble solids content in *Chaenomeles speciosa* juice

2.8　感官评价结果

将 MG13 发酵宣木瓜汁与未接种的宣木瓜汁对比进行感官评价(图 8)。乳酸菌发酵改善了木瓜汁的感官品质，本研究中菌株 MG13 发酵对宣木瓜汁的感官特性产生了多方面正向影响。首先，显著改善了滋味：宣木瓜样品中含有较多的有机酸，未发酵时口感酸涩而 MG13 发酵过程中产生的乳酸有效降低了原料的涩味与粗糙感，使口感更柔和协调，这也是整体感官评分提升的关键原因[38–39]。其次，菌株代谢产生的酯类、醇类等挥发性风味物质，赋予了产品柔和的发酵香气，改善了原料的生青味，使香气的接受度略有提升[40]。而色泽评分的轻微下降，推测与发酵过程中多酚氧化褐变及 pH 变化对色素稳定性的影响有关，这也是乳酸菌发酵中常见的现象。综合来看，MG13 发酵显著优化了宣木瓜汁的感官品质，尤其是滋味特性，为产品的开发应用提供了感官层面的支撑。

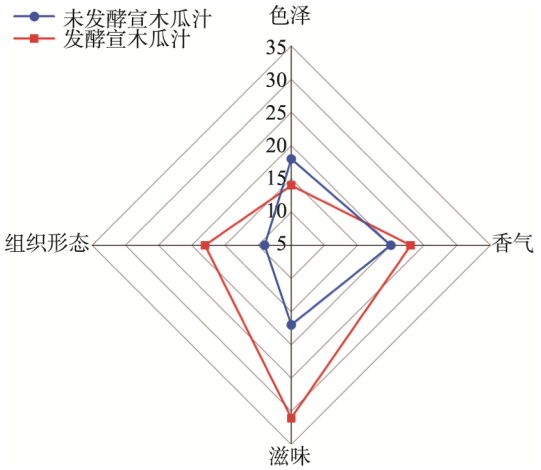


图 8　MG13 发酵宣木瓜汁感官评价

Fig.8　Sensory evaluation of *Chaenomeles speciosa* juice fermented by strain MG13

3　结　论

本研究从宣木瓜中分离筛选 58 株乳酸菌，通过系统评价益生性能、抗氧化能力以及在宣木瓜中生长适应性，最终筛选得到 4 株菌株均为植物乳杆菌，其中菌株 MG13 尤为突出，在 DPPH 自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基清除能力上均显著优于其他供试菌株(P<0.05)，具备突出的抗氧化活性。生长曲线结果显示，MG13 在宣木瓜基质中增殖迅速、生物量高，发酵适应性良好。将 MG13 应用于发酵宣木瓜汁，可提升宣木瓜汁的抗氧化性，将发酵后的宣木瓜 DPPH 自由基清除率和 $ABTS^+$自由基清除率分别至 78.91%和 87.02%，发酵提升了宣木瓜汁中黄酮和多酚的含量，分别提升了 55.44%和 30.25%，发酵过程中 DPPH 自由基、$ABTS^+$自由基清除率波动幅度显著大于总多酚、总黄酮含量，福林酚法仅可测定总酚总量，难以区分结合态多酚糖苷与游离酚苷元；MG13 分泌糖苷酶促进糖苷水解生成高活性游离苷元，游离酚羟基增多，且乳酸等有机酸与酚类存在抗氧化协同效应，加之大分子多酚降解为活性更强的小分子酚，最终表现为抗氧化活性变化幅度高于多酚、黄酮总量。MG13 发酵显著优化了宣木瓜汁的感官品质，尤其是滋味特性有效改善了宣木瓜的功能特性和应用价值。综上，本研究筛选的 MG13 菌株发酵可显著提升宣木瓜汁的抗氧化活性，果汁抗氧化水平由菌株代谢作用与宣木瓜基质组分共同调控。本研究仍存在一定局限性：仅评价体外抗氧化能力，缺少细胞或体内实验支撑；同时未挖掘 MG13 与糖苷合成相关功能基因，酚类物质转化的分子调控机制尚不明确。后续可利用高效液相色谱法分析酚类单体组成，开展菌株功能基因挖掘，并推进发酵工艺中试放大，结合细胞实验综合评价果汁功能活性。

参考文献

[1] 何靖容，商亚芳，马意龙，等. 不同产地宣木瓜不同部位活性成分比较分析[J]. 食品工业，2025，46(3)：123–127.
He Jingrong, Shang Yafang, Ma Yilong, et al. Distribution of active components in different parts of *Chaenomeles speciosa* from different area [J]. The Food Industry, 2025, 46(3): 123–127.

[2] 卢腾飞，米玉璋，李佳，等. 光皮木瓜蒸制过程中化学成分及其抗氧化活性变化研究[J]. 中国医院药学杂志，2026，46(10)：1124–1129.
Lu Tengfei, Mi Yuzhang, Li Jia, et al. Changes in chemical constituents and antioxidant activity during the steaming process of *Chaenomeles sinensis* [J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2026, 46(10): 1124–1129.

[3] Braga A R C, De Souza Mesquita L M, Martins P L G, et al. *Lactobacillus* fermentation of *Jussara* pulp leads to the enzymatic conversion of anthocyanins increasing antioxidant activity [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 69: 162–170.

[4] 王少龙. 高抗氧化活性乳酸菌筛选及其在鸡生产中的应用[D]. 北京：中国农业科学院，2023：1.
Wang Shaolong. Screening of lactic acid bacteria with high antioxidant activity and its application in production of chickens [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023: 1.

[5] 王刚，田丰伟，刘小鸣，等. 2 株具有优良体外抗氧化能力乳酸菌的筛选与鉴定[J]. 食品工业科技，2013，34(15)：149–153，157.
Wang Gang, Tian Fengwei, Liu Xiaoming, et al. Screening and identification of two lactic acid bacteria strains with excellent antioxidant activities *in vitro* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(15): 149–153, 157.

[6] 戴志伟，孔令明，刘伟，等. 西梅发酵乳酸菌的筛选、鉴定及其抗氧化特性研究[J]. 中国食品学报，2022，22(7)：310–318.
Dai Zhiwei, Kong Lingming, Liu Wei, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria fermenting prunes and studies on their antioxidant properties [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(7): 310–318.

[7] Mi Ruoyu, Lu Wei, Zhang Xuan, et al. Screening and identification of

strains for high quality and antioxidant activity of Baijiu from strong-flavor Daqu and analysis of microbial synergistic effects [J]. PLoS One, 2025, 20(3): e0319616.

[8] Aleksandrova V, Chikov G, Velikova G V, et al. *In vivo* antioxidant activity evaluation of peptides produced during the fermentation of yoghourt-like dairy products [J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2013, 19(Supplement 2): 90–100.

[9] 樊秋月, 林焱, 朱伟云. 藏猪源乳酸菌的分离鉴定及益生特性测定[J]. 微生物学报, 2025, 65(7): 3165–3176.
Fan Qiuyue, Lin Yan, Zhu Weiyun. Isolation, identification, and probiotic property evaluation of lactic acid bacteria from Xizang pigs [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(7): 3165–3176.

[10] 杨园园. 贵州泡菜中乳酸菌的筛选鉴定及其在红枣泥中的应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020: 1.
Yang Yuanyuan. Screening and identification of lactic acid bacteria in Guizhou pickles and its application in red jujube puree [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020: 1.

[11] 康晶. 抗氧化乳酸菌的筛选及其在发酵香肠中的应用[D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2023: 1.
Kang Jing. Screening of lactic acid bacterium with antioxidant activity for fermented sausage and its application [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Business, 2023: 1.

[12] Zhang Yulong, Hu Ping, Lou Lijiao, et al. Antioxidant activities of lactic acid bacteria for quality improvement of fermented sausage [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(12): 2960–2967.

[13] 张香美, 赵玉星, 闫晓晶, 等. 1 株具抑菌和抗氧化活性乳酸菌的筛选及鉴定[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 93–98.
Zhang Xiangmei, Zhao Yuxing, Yan Xiaojing, et al. Screening and identification of lactic acid bacterium with antimicrobial and antioxidant activity [J]. Food Science, 2018, 39(2): 93–98.

[14] Zhang Shuwen. Antioxidative activity of lactic acid bacteria in yogurt [J]. African Journal of Microbiology Research, 2011, 5(29): 5194–5201.

[15] 樊雨薇, 邓长阳, 徐雪莹, 等. 余甘子表面产单宁酶乳酸菌的筛选及在发酵余甘子果汁中的应用[J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 196–204.
Fan Yuwei, Deng Changyang, Xu Xueying, et al. Screening of tannase-producing LAB from *Phyllanthus emblica* surface and its application in fermented *Phyllanthus emblica* juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 196–204.

[16] 刘秀华. 皱皮木瓜发酵饮料工艺研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022: 1.
Liu Xiuhua. Research on the technology of fermented beverage of *Chaenomeles speciosa* (sweet) nakai [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022: 1.

[17] 冷京京. 开菲尔粒中高产胞外多糖乳酸菌的鉴定及其在发酵乳中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025: 1.
Leng Jingjing. Identification of lactic acid bacteria with high yield of exopolysaccharide in kefir grains and its application in fermented milk [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2025: 1.

[18] Castro L M G, Alexandre E M C, Pintado M, et al. Bioactive compounds, pigments, antioxidant activity and antimicrobial activity of yellow prickly pear peels [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(4): 1225–1231.

[19] 李长健. 乳酸菌发酵对刺五加叶活性成分的影响及其降糖作用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020: 1.
Li Changjian. Effect of lactic acid bacteria fermentation on active components of *Acanthopanax senticosus* leaves and its hypoglycemic effect [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020: 1.

[20] 吕丽芸,张捷,孔冰月,等.产 γ -氨基丁酸和胞外多糖乳酸菌的筛选及其益生特性分析[J/OL]. 食品工业科技, 1-17[2026-09-15]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025100281.
Lyu Liyun, Zhang Jie, Kong Bingyue, et al. Screening of lactic acid bacteria producing γ-aminobutyric acid and extracellular polysaccharides and their probiotic properties analysis [J/OL] Science and Technology of Food Industry, 1-17[2026-09-15]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025100281.

[21] 赵鑫, 胡蝶, 张素平, 等. 传统泡菜中乳酸菌的筛选鉴定及抗氧化特性分析[J]. 中国调味品, 2022, 47(2): 5–9.
Zhao Xin, Hu Die, Zhang Suping, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria in traditional pickles and analysis of the antioxidant properties [J]. China Condiment, 2022, 47(2): 5–9.

[22] 国立东, 毛吾丽旦·米吉提, 王丽群, 等. 新疆传统酸马奶源乳酸菌的分离、鉴定及其益生特性研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(6): 100–108.
Guo Lidong, Maowulidan Mijiti, Wang Liqun, et al. Isolation, identification and probiotic characteristics of lactic acid bacteria from traditional koumiss in Xinjiang [J]. China Brewing, 2025, 44(6): 100–108.

[23] 马佳歌, 徐丽, 倪春蕾, 等. 乳酸菌对糯玉米黏豆包品质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(12): 155–163.
Ma Jiage, Xu Li, Ni Chunlei, et al. Effect of lactic acid bacteria on the quality of Niandoubao from waxy corn [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(12): 155–163.

[24] 葛善赢, 张海涛, 王士佳, 等. 脉冲强光诱变选育高产乳酸植物乳杆菌及其益生特性研究[J]. 中国酿造, 2023, 42(10): 59–64.
Ge Shanying, Zhang Haitao, Wang Shijia, et al. Screening of high-yield lactic acid *Lactobacillus* plantarum by pulsed light mutagenesis and its probiotic properties [J]. China Brewing, 2023, 42(10): 59–64.

[25] 马新森, 魏敏敏, 张左利, 等. 新疆哈萨克酸马奶中功能性乳酸菌株的筛选、鉴定及功能评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(7): 151–159.
Ma Xinmiao, Wei Minmin, Zhang Zuoli, et al. Screening, identification and functional evaluation of functional lactic acid bacteria strains in Xinjiang Kazakh koumiss [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(7): 151–159.

[26] 李玉玺, 陈申奥, 龚忆坤, 等. 南阳淅川酸菜中乳酸菌的分离鉴定及抗氧化活性研究[J]. 南阳理工学院学报, 2025, 17(4): 103–108, 128.
Li Yuxi, Chen Shen'ao, Gong Yikun, et al. Separation and identification of lactic acid bacteria in sauerkraut from Nanyang Xichuan and analysis of antioxidant activity [J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2025, 17(4): 103–108, 128.

[27] 张佳佳, 李丽亚, 任清, 等. 内蒙古奶酪中乳酸菌的益生特性及抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2025, 50(4): 36–43.
Zhang Jiajia, Li Liya, Ren Qing, et al. Study on probiotic properties and antioxidant activity of lactic acid bacteria in Inner Mongolia cheese [J]. China Condiment, 2025, 50(4): 36–43.

[28] 许强, 袁乐梅, 唐雪梅, 等. 川西彝族酸菜汁中抗氧化乳酸菌筛选及益生特性研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(8): 60–64.
Xu Qiang, Yuan Lemei, Tang Xuemei, et al. Screening of *Lactobacillus* from traditional yi pickle juice in western Sichuan with antioxidant and

probiotic characteristics [J]. China Condiment, 2021, 46(8): 60–64.

[29] 马晓艳, 万霞, 陈亚淑, 等. 植物基发酵乳的研究和应用进展[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 320–335.
Ma Xiaoyan, Wan Xia, Chen Yashu, et al. Progress in research and application of plant-based fermented milk [J]. Food Science, 2024, 45(20): 320–335.

[30] Liu Zhuo, Huang Xizhuo, Liu Qiaozhen, et al. Lactic acid bacteria fermentation improves sensory properties, bioactivity, and metabolic profiles of carrot pulp [J]. Food Bioscience, 2025, 66: 106303.

[31] 田欢, 房丹丹, 张剑林, 等. 枸杞红枣复合发酵饮料工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(7): 180–188.
Tian Huan, Fang Dandan, Zhang Jianlin, et al. Process optimization and antioxidant activity of wolfberry and jujube compound fermented beverage [J]. China Brewing, 2025, 44(7): 180–188.

[32] Bellaloui N. Soybean seed phenol, lignin, and isoflavones and sugars composition altered by foliar boron application in soybean under water stress [J]. Food and Nutrition Sciences, 2012, 3(4): 579–590.

[33] 赵晨雨, 朱立斌, 朱丹, 等. 乳酸菌发酵对蔓越莓汁主要成分及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 187–195.
Zhao Chenyu, Zhu Libin, Zhu Dan, et al. Effect of lactic acid bacteria fermentation on the main components and antioxidant activity of cranberry juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 187–195.

[34] Fadlillah H N, Nuraida L, Sitanggang A B, et al. Production of antioxidants through lactic acid fermentation: current developments and outlook [J]. Annals of the University Dunarea de Jos of Galati, Fascicle VI: Food Technology, 2021, 45(2): 203–228.

[35] Li Zhongxi, Teng Jing, Lyu Yilu, et al. Enhanced antioxidant activity for apple juice fermented with *Lactobacillus plantarum* ATCC14917 [J]. Molecules, 2018, 24(1): 51.

[36] Rodríguez H, Curiel J A, Landete J M, et al. Food phenolics and lactic acid bacteria [J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 132(2–3): 79–90.

[37] Kwaw E, Ma Yongkun, Tchabo W, et al. Effect of *Lactobacillus* strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. Food Chemistry, 2018, 250: 148–154.

[38] Cele N P, Akinola S A, Manhivi V E, et al. Influence of lactic acid bacterium strains on changes in quality, functional compounds and volatile compounds of mango juice from different cultivars during fermentation [J]. Foods, 2022, 11(5): 682.

[39] Natarajan K, Rajendran A. Evaluation and optimization of food-grade tannin acyl hydrolase production by a probiotic *Lactobacillus plantarum* strain in submerged and solid state fermentation [J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90(4): 780–792.

[40] Thuku J K, Owaga E E, Wafula E N. Microbial, chemical and sensory properties of pineapple and beetroot juice blend fermented using mixed probiotic lactic acid bacteria cultures (*Lactobacillus* plantarum and L. rhamnosus) [J]. African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development, 2025, 25(9): 27795–27817.

(责任编辑: 曹岱琳　蔡世佳)