宁豫昌, 杨向科, 郭宏伟, 等. 不同乳酸菌发酵对刺梨、苹果混合果汁理化特性和风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 355−367. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070176
NING Yuchang, YANG Xiangke, GUO Hongwei, et al. Effects of Different Lactic Acid Bacteria Fermentations on the Physicochemical Properties and Flavor of the Mixed Juice of *Rosa roxburghii* Tratt. and Apple[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 355−367. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070176

· 分析检测 ·

不同乳酸菌发酵对刺梨、苹果混合果汁理化特性和风味的影响

宁豫昌[1], 杨向科[1], 郭宏伟[1], 马　辉[1], 沙军军[1], 赵广伟[2], 张　曼[3], 张哲玮[3], 乔宏兴[3,*]
（1.河南牧业经济学院生命科学学院, 河南郑州 450046;
2.河南牧业经济学院动物科技学院, 河南郑州 450046;
3.河南牧业经济学院动物医药学院, 河南郑州 450046）

摘　要: 为解决刺梨果汁口感酸涩的问题，本文将新鲜的刺梨和苹果果汁混合后，分别采用植物乳杆菌、副干酪乳杆菌和发酵乳杆菌作为发酵剂进行发酵。发酵结束后，分别测定各试验组的理化指标、体外抗氧化指标，以及有机酸和挥发性组分，并以未发酵的混合果汁作为对照。理化指标结果表明，经副干酪乳杆菌发酵后的刺梨、苹果混合果汁中总酸、单宁酸的含量为 3.61 g/L 和 0.059 mg/mL，显著低于其他试验组和对照组（P<0.05），副干酪乳杆菌组的维生素 C 和类胡萝卜素的含量分别为 2.75 mg/100 mL 和 572.28 μg/mL，显著高于其他试验组（P<0.05）；体外抗氧化结果表明，3 种乳酸菌发酵均能增强混合果汁的抗氧化性能，其中副干酪乳杆菌组的各项抗氧化指标均优于对照组和其他试验组；有机酸检测结果显示，所有组别中副干酪乳杆菌组的苹果酸含量最低而乳酸含量最高，最有利于改善混合果汁中有机酸的组成；挥发性组分检测结果表明，利用副干酪乳杆菌发酵最有利于保留刺梨和苹果的关键风味。综上，以副干酪乳杆菌作为发酵剂，更有利于改善刺梨、苹果混合果汁酸涩的口感，增强果汁的抗氧化性能和保留混合果汁的关键香气物质。

关键词: 乳酸菌, 刺梨, 苹果, 理化特性, 风味, 发酵
中图分类号: TS255.36　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0355−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070176　　本文网刊:

Effects of Different Lactic Acid Bacteria Fermentations on the Physicochemical Properties and Flavor of the Mixed Juice of *Rosa roxburghii* Tratt. and Apple

NING Yuchang[1], YANG Xiangke[1], GUO Hongwei[1], MA Hui[1], SHA Junjun[1], ZHAO Guangwei[2], ZHANG Man[3], ZHANG Zhewei[3], QIAO Hongxing[3,*]

（1.College of Life Sciences, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China;
2.College of Animal Science and Technology, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China;
3.College of Veterinary Medicine, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China）

Abstract: To address the problem of the sour and astringent taste of *Rosa roxburghii* Tratt. juice, in this study, we mixed fresh *R. roxburghii* juice with fresh apple juice, and then used *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus paracasei*, and *Lactobacillus fermentum*, respectively, as starters for fermentation. Following fermentation, the physicochemical indices, *in vitro*

收稿日期: 2025−07−14
基金项目: 河南省重点研发专项（241111113400, 251111110700）; 河南省现代农业生猪体系中药替抗岗位专家项目（HARS-22-12-G2）; 河南省重点学科项目（312）; 河南牧业经济学院博士科研启动资金项目（2022HNUAHEDF038, 2021HNUAHEDF004）。
作者简介: 宁豫昌（1979−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品微生物, E-mail: ningyuchang1979@163.com。
*** 通信作者:** 乔宏兴（1976−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 发酵工程, E-mail: zzmzqhx@163.com。

antioxidant indices, organic acid contents, and volatile components of the fermented juices in each experimental group were determined, with the unfermented mixed juice being used as the control. The results of physicochemical analyses revealed that the total acid and tannic acid contents in the *R. roxburghii*–apple mixed juice fermented using *L. paracasei* were 3.61 g/L and 0.059 mg/mL, respectively, which were significantly lower than the respective values obtained for other experimental groups and the control group (P<0.05). For the *L. paracasei* fermentation, the contents of vitamin C and carotenoids were 2.75 mg/100 mL and 572.28 μg/mL, respectively, which were significantly higher than those recorded for the other experimental groups (P<0.05). In addition, the results of *in vitro* antioxidant assays revealed that fermentation with all three lactic acid bacterial strains promoted an enhancement of the antioxidant capacity of the mixed juice, among which, all assessed antioxidant indices of the *L. paracasei*-fermented juice were superior to the corresponding values obtained for the control group and other experimental groups. Moreover, the results of organic acid analyses indicated that among all groups, the *L. paracasei* group had the lowest malic acid content and highest lactic acid content, making it most conducive to improving the composition of organic acids in the mixed juice. The results of volatile component analyses indicated that fermentation with *L. paracasei* was most beneficial for retaining the key flavors of *R. roxburghii* and apple. In conclusion, among the assessed bacterial strains, using *L. paracasei* as a starter was found to be more beneficial for ameliorating the sour and astringent taste of the *R. roxburghii*–apple mixed juice, enhancing the antioxidant capacity of the juice, and retaining the key aroma substances.

Key words: lactic acid bacterial; *Rosa roxburghii* Tratt; apple; physicochemical properties; flavor; fermentation

刺梨(*Rosa roxburghii* Tratt.)为蔷薇科蔷薇属的落叶小灌木,广泛分布于我国安徽、江苏、江西、贵州、云南等省份,其中贵州省的刺梨分布面积最广、产量最大[1−2]。刺梨果实成熟时散发出浓郁的香味,且刺梨果实中含有超氧化物歧化酶、维生素 C、胡萝卜素、多酚、多糖、氨基酸等丰富的生物活性物质,赋予了刺梨抗氧化、防癌、降血脂、免疫调节等诸多保健价值。吴红等[3] 比较了贵州 17 个产地刺梨的抗氧化物质,结果显示,不同产地刺梨的总多酚含量分布在 1126~4063 μg/mL,总黄酮含量分布在 558~1626 μg/mL,维生素 C 含量分布在 8.61~15.79 mg/g,SOD 活性分布在 65.73~142.56 U/g。孙海达等[4] 采用超高效液相色谱-串联质谱法检测刺梨原汁中的游离氨基酸总量在 1405.66~2061.28 mg/kg。李倩倩[5] 采用水提醇沉法提取了刺梨多糖,并且发现刺梨多糖具有较好的抗宫颈癌活性。Wu 等[6] 的研究表明,刺梨黄酮提取物在 3.0~30.0 μg/mL 浓度范围内对斑马鱼具有良好的降血脂作用,且呈剂量依赖性。正是由于刺梨具有丰富的营养和诸多的健康价值,近年来,贵州省依托资源优势,努力将刺梨从普通农产品变为优质工业品,将刺梨培育成贵州省的一个百亿级特色优势产业[7]。目前已经开发的刺梨产品有果汁、果酒、饮料、口服液等,具有广阔的市场开发前景。然而刺梨果实中的单宁酸和有机酸含量高,例如,刺梨干果的单宁酸含量高达 2624.98 mg/100 g,刺梨鲜果中的总酸含量达 1358.89 mg/100 g,大量的单宁和有机酸往往使刺梨的果汁、果酒、饮料等产品呈现明显的酸涩口感,极大地影响了产品的接受度。

为解决刺梨果汁口感酸涩的问题,可将刺梨果汁与其他果汁混合,以掩盖或降低刺梨果汁的酸涩味,并且刺梨果汁与其他果汁混合还可能产生一定的协同或互补作用。赵光远等[8] 将刺梨与苹果混合打浆榨汁并巴氏杀菌后,制得的混合果汁兼具了刺梨与苹果的独特风味,口感较单一的刺梨果汁更为爽滑,而且刺梨中丰富的维生素 C 等抗氧化物质能有效防止苹果汁褐变。此外,有研究表明一些乳酸菌能够产生单宁酶,能降解植物原料中的单宁酸[9−10]。并且,乳酸菌通过复杂的代谢过程,能够对果汁中的有机酸进行转化,改变果汁中有机酸的组成或者降低有机酸的含量,改善果汁的口感和风味。例如,乳酸菌通过柠檬酸代谢途径能够转化柠檬酸形成重要的羰基风味化合物如双乙酰、乙偶姻和 2,3-丁二醇等[11]。许多乳酸菌能够通过苹果酸-乳酸发酵有效降低果汁中苹果酸的含量,起到降低果汁酸涩感的作用[12]。因此,为了改善刺梨果汁的口感和风味,使其变得柔和,本研究拟将刺梨果汁与苹果汁按一定比例混合,依据《可用于食品的菌种名单》[13],选用 3 种典型的乳酸菌进行发酵,比较不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的理化指标、体外抗氧化活性、风味物质等,旨在选择一种合适的乳酸菌用于刺梨、苹果混合果汁的发酵,也为乳酸菌发酵贵州省特色水果的产业应用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

富士苹果 贵州省威宁县;新鲜刺梨 贵州省六盘水市;副干酪乳杆菌(*Lactobacillus paracasei*; BNCC 189800)、植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*; BNCC 370751)、发酵乳杆菌(*Lactobacillus fermentum*; BNCC 194173) 北纳创联生物技术有限公司;MRS 肉汤培养基 北京奥博星生物技术有限责任公司;芦丁 色谱纯、2-辛醇 色谱纯、2,6-二叔丁基对甲酚(Butylated hydroxytoluene, BHT) 分析纯,北京索莱宝科技有限公司;1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 色谱纯,上海晶纯生化科技股份有限公司;果胶酶(1 U/mg)、纤维素酶(10 U/mg) 食品级,河南万邦实业有限公

司；福林酚试剂（纯度 99 %）　国药集团化学试剂有限公司；无水葡萄糖、硫酸铜、单宁酸、乙二胺四乙酸二钠、酒石酸钾钠等　分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司。

H1850R 台式高速冷冻离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；ZQLY-300S 恒温培养摇床　上海知楚仪器有限公司；DNP-9272BS-Ⅲ电热恒温培养箱　上海新苗医疗器械制造有限公司；FE28 便携式 pH 计　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；752 紫外可见分光光度计　上海菁华科技仪器有限公司；FA1104 电子天平　上海舜宇恒平科学仪器有限公司；1260 液相色谱仪、C_{18} AQ（4.6mm×250 mm，5 μm）色谱柱、7890B-7000D 气相色谱质谱联用仪、HP-5MS（30 m×0.25 mm×0.25 μm）毛细管色谱柱　安捷伦科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　原料处理　分别将苹果、刺梨用清水冲洗干净，切成小块，去核，用质渣分离机进行榨汁后四层滤布过滤。将刺梨汁、苹果汁按 1∶1 混合均匀，纤维素酶和果胶酶按照 2∶3 的比例，0.3% 的添加量加入到混合果汁中，将混合果汁置于恒温水浴锅中，35 ℃ 酶解 1.5 h，酶解结束后将混合果汁 90 ℃ 灭酶 5 min 后即为试验待接种的果汁。

1.2.2　菌种活化和种子液制备　将保藏于斜面培养基中的副干酪乳杆菌、植物乳杆菌、发酵乳杆菌分别转接到 MRS 肉汤培养基中，在 37 ℃、转速 150 r/min 的摇床中培养 48 h，再用液体 MRS 培养基继续转接活化 2~3 代，直至培养液中乳酸菌含量达到 1.0×10^8 CFU/mL。将 3 种活化后的乳酸菌菌液 6000 r/min 离心 5 min 后，弃去上清液，然后用等量无菌生理盐水重悬后即为种子液。

1.2.3　乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的条件　3 种乳酸菌种子液以 7% 的接种量分别接种至刺梨、苹果混合果汁，37 ℃ 下发酵 24 h。将经过发酵的混合果汁作为试验组，而未经乳酸菌发酵的混合果汁记为对照组。

1.2.4　理化指标的测定

1.2.4.1　还原糖的测定　参考张弛等[14] 的方法，采用斐林试剂滴定法进行测定。

1.2.4.2　总酸的测定　按 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》pH 计电位滴定法，总酸含量以苹果酸计。

1.2.4.3　乳酸菌含量的测定　参照张盟[15] 的方法制备菌悬液，利用 MRS 培养基根据 GB 4789.2-2016 进行乳酸菌的活菌计数。

1.2.4.4　总酚的测定　采用福林酚比色法[16]。以不同梯度的没食子酸质量浓度（mg/mL）作为横坐标，并于 760 nm 处测定的 OD 值为纵坐标，以蒸馏水为空白对照，绘制标准曲线，回归方程为：y=1.8257x+0.0153，R^2=0.995。总酚含量以没食子酸的质量分数计，根据标准曲线计算样品中总酚的质量浓度。

1.2.4.5　维生素 C 的测定　参考齐芳芳[17] 的方法利用直接碘量法测定样品中维生素 C 的含量，方法略有改动。精确称取 100 mg 维生素 C 标准品，蒸馏水定容至 100.0 mL，充分混匀得到标准维生素 C 溶液。用稀盐酸将 100.0 mL 标准维生素 C 溶液的 pH 调至 3.0 后分为 4 份，每份 25 mL，在每一份中加入 2.0 mL 10 g/L 的可溶性淀粉溶液作为指示剂，用 0.02 mol/L 的碘液滴定标准维生素 C 溶液至蓝色，并保持 30 s 不褪色。记录滴定不同质量浓度标准维生素 C 溶液所消耗碘液的体积，并计算其平均值。取 25.0 mL 待测发酵果汁 4 份，分别加入 2.0 mL 10 g/L 的淀粉溶液作为指示剂，用 0.02 mol/L 的碘液滴定待测样液至蓝色，并保持 30 s 不褪色。记录待测样液所消耗碘液的体积，并求其平均值。维生素 C 的质量浓度按照以下公式计算：

$$\text{维生素C的质量浓度(mg/100 mL)} = \frac{mV_1}{V_2}\times 4$$

式中，m 表示 25.0 mL 标准维生素 C 溶液中维生素 C 的质量，mg；V_1 表示待测发酵果汁所消耗碘液体积的平均值，mL；V_2 表示标准维生素 C 溶液所消耗碘液体积的平均值，mL。

1.2.4.6　类胡萝卜素含量的测定　根据贾雨朦等[18] 的方法加以修改测定类胡萝卜素的质量浓度（μg/mL）。取 10.0 mL 样液加 20.0 mL 提取液（含质量分数 50% 正己烷、25% 丙酮、25% 乙醇、0.1% BHT、0.5 g NaCl），常温下搅拌 30 min 后加入 15.0 mL 蒸馏水，继续搅拌 10 min，搅拌结束将混合物倒入分液漏斗中，振荡 3 次，静置，待液体分为清晰的两层后收集上层有机相。空白组为加入 BHT（0.10 g/100 mL）并充分溶解后的正己烷，于 450 nm 波长处测定吸光度，按如下公式进行计算：

$$\text{类胡萝卜素的质量浓度(μg/mL)} = \frac{AV\times10^4}{E_{1\,cm}^{1\%}\times V_1}$$

式中，A 为待测果汁在 450 nm 处的吸光值；V 为收集的有机相的体积，mL；V_1 为量取的待测果汁的体积，mL；$E_{1\,cm}^{1\%}$ 为 β-类胡萝卜素在正己烷中的消光系数，记为 2560。

1.2.4.7　单宁酸含量的测定　参考字学娟[19] 的方法采用 Folin-Denis 显色法进行单宁酸含量的测定。以不同梯度的单宁酸质量浓度（mg/mL）作为横坐标，在不同浓度单宁酸溶液中分别加入 Folin-Denis 显色剂和饱和 Na_2CO_3 溶液，混匀后静置 30 min，并于 756 nm 处测定的 OD 值为纵坐标，以蒸馏水为空白对照，绘制标准曲线，回归方程为：y=1.4764x+0.0143，R^2=0.999，根据标准曲线计算样品中单宁酸的质量浓度。

1.2.5 混合发酵果汁体外抗氧化指标的测定

1.2.5.1 DPPH 自由基清除率的测定 参考董银卯等[20]方法加以修改，准确称取 0.079 g 的 DPPH 粉末，用无水乙醇定容至 1000 mL 容量瓶中，得到浓度为 0.20 mol/L 的 DPPH 溶液。分别吸取 2.0 mL 经适当稀释后的样液和 2.0 mL 的 0.20 mol/L 的 DPPH 溶液混合均匀后，37 ℃ 避光保存 30 min，在 517 nm 处测定吸光值，对照组溶剂用无水乙醇代替，DPPH 自由基清除率按如下公式进行计算：

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_c}\right) \times 100$$

式中，A_i 为 DPPH 溶液与样液的吸光值；A_j 为无水乙醇与样液的吸光值；A_c 为 DPPH 溶液与无水乙醇的吸光值。

1.2.5.2 羟自由基清除率的测定 参考董银卯等[20]方法加以修改，分别吸取经适当稀释后的 1.0 mL 样液，2.0 mL 9 mmo1/L $FeSO_4$ 溶液，2.0 mL 9 mmo1/L 水杨酸-乙醇溶液，最后加入 0.20 mL 8.8 mmo1/L H_2O_2 混合均匀后，37 ℃ 下保温 30 min，在 510 nm 处测定吸光值。空白管以超纯水替代样液，调零管以超纯水替代水杨酸-乙醇溶液，按如下公式进行计算：

$$\text{羟自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - A_s}{A_0} \times 100$$

式中，A_0 为空白管的吸光值；A_S 为样液作为自由基清除剂加入后的吸光值。

1.2.5.3 超氧阴离子自由基清除率 参考陈天荣等[21]的方法加以修改，吸取 4.50 mL 0.05 mol/L Tris-HCl 缓冲液（pH8.2），置于 25 ℃ 水浴中预热 20 min 后，加入 1.0 mL 经适当稀释后的样品和 0.40 mL 25 mmol/L 邻苯三酚溶液。混合均匀后于 25 ℃ 水浴中反应 5 min，加入 1.0 mL 8 mol/L 盐酸终止反应，于 325 nm 处测定吸光度。空白组用 1.0 mL 蒸馏水代替样品。按如下公式进行计算：

$$\text{超氧阴离子自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - (A_x - A_1)}{A_0} \times 100$$

式中，A_0 为空白组样品吸光度；A_x 为样品吸光度；A_1 为蒸馏水替代邻苯三酚的本底吸光度。

1.2.6 混合发酵果汁有机酸的测定 参考窦志霞等[22]的方法并略作修改。配制 100~900 μg/mL 的丁二酸、乙酸标准溶液、50~450 μg/mL 的乳酸、柠檬酸标准溶液、20~200 μg/mL 的酒石酸、苹果酸标准溶液、5~50 μg/mL 的草酸标准溶液、0.5~5 μg/mL 的马来酸用作鉴定和定量有机酸的外部标准。试验组和对照组果汁经 8000 r/min 离心 10 min 得到测试样品，测试样品及标准液用 0.22 μm 的微孔滤膜过滤后进样测定。色谱条件：色谱柱 Agilent C_{18} AQ（4.6 mm×250 mm，5 μm）；流动相 A 为 0.1% 磷酸水溶液，流动相 B 为甲醇，采用梯度洗脱程序；柱温 35 ℃；进样量 10 μL；检测波长 210 nm。洗脱程序见表 1。

表 1 梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution progra

时间（min）	流速（mL/min）	流动相A（%）（0.1%磷酸水溶液）	流动相B（%）（甲醇）
0	0.5	97.5	2.5
13	0.5	97.5	2.5
13.1	0.5	0	100
18	0.5	0	100
18.1	0.5	97.5	2.5
25	0.5	97.5	2.5

1.2.7 混合发酵果汁挥发性组分的测定与分析 参考黄玉立等[23]的方法稍作改动，取 3 mL 混合发酵果汁置于 15 mL 顶空进样瓶中并于 80 ℃ 加热 30 min，30 min 后用将顶空微萃取进样针扎入顶空瓶中继续加热 30 min 后，250 ℃ 进样口解析 5 min。色谱条件为：HP-5MS（30 m×0.25 mm×0.25 μm）毛细管色谱柱，不分流模式进样，初温 35 ℃ 保持 2 min，以 5 ℃/min，升温至 125 ℃ 保持 3 min，以 10 ℃/min，升温至 200 ℃ 保持 2 min。载气为高纯氦气（He），流速为 1.0 mL/min，进样口温度 250 ℃，进样时间 1 min。质谱条件：离子源温度 230 ℃，四级杆温度 150 ℃，离子源为全惰性 EI，扫描质量范围 m/z 40~600。

定性、定量分析：参考 NIST 2020 谱库，选取匹配因子大于 50 的化合物，同时结合质谱数据进行定性，各挥发性风味化合物的相对含量，通过其色谱峰面积（A_i）与所有被鉴定出化合物的色谱峰面积总和（∑A）的比值进行计算，并以百分比形式表示。

$$\text{挥发性化合物i的相对含量}(\%) = \frac{A_i}{\Sigma A} \times 100$$

式中，A_i 是第 i 种挥发性化合物的色谱峰面积，∑A 是所有被定性鉴定出的挥发性化合物的色谱峰面积之总和。

1.2.8 挥发性组分相对气味活度值的计算与评价 采用相对气味活度值（ROAV）评价各挥发性组分对试验组和对照组香气体系的贡献度。一般认为 ROAV≥1 的化合物为关键香气成分，并且 ROAV 越大，表明该组分对整体香气体系贡献度越大，而 0.1≤ROAV<1 的化合物被认为对总体风味具有修饰作用。其计算公式参考张涛等[24]的计算方法。

$$ROAV_i \approx \frac{C_i}{C_{stan}} \times \frac{T_{stan}}{T_i} \times 100$$

式中，C_i 和 T_i 分别为该挥发性物质的相对含量和该挥发性物质的阈值，T_{stan}、C_{stan} 分别是对样品总体风味贡献最大的组分的相对百分含量和相对应的感觉阈值。

1.3 数据处理

获取的原始数据使用 Microsoft Excel 2010 进行整理和绘图；使用 SPSS19.0 数据分析软件进行数

据的显著性分析，采用 Duncan's multiple range test 方法分析，$P<0.05$ 表示存在显著性差异；所有试验数据均进行 3 次重复，结果以平均值±标准偏差表示。

2　结果与分析

2.1　理化指标的测定

本研究从还原糖、酸度、乳酸菌含量、总酚、维生素 C、类胡萝卜素等方面比较 3 株乳酸菌菌株对刺梨、苹果混合果汁发酵的影响。

2.1.1　还原糖含量的测定结果　图 1 反映的是不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁后的还原糖含量。从图 1 中可见，对照组的还原糖含量为 0.039 g/mL，发酵结束后，植物乳杆菌组、副干酪乳杆菌组以及发酵乳杆菌组的还原糖含量分别为 0.032、0.029、0.031 g/mL。3 个试验组的还原糖含量都显著小于对照组（$P<0.05$），表明植物乳杆菌、副干酪乳杆菌以及发酵乳杆菌均能够在刺梨、苹果混合果汁中消耗还原糖并良好生长。3 个试验组中，副干酪乳杆菌发酵混合果汁的还原糖含量显著低于植物乳杆菌和发酵乳杆菌（$P<0.05$），表明副干酪乳杆菌在刺梨、苹果的混合果汁中具有明显的生长优势，其消耗还原糖的能力高于其它 2 种乳酸菌。

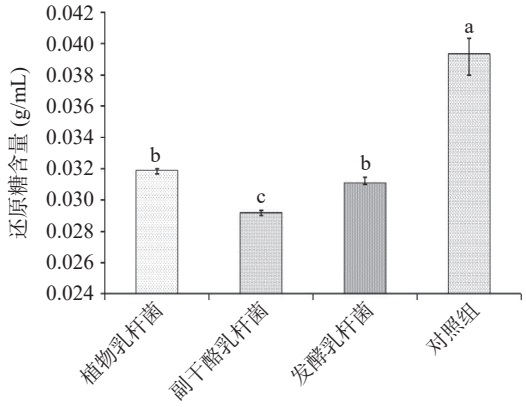


图 1　不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的还原糖含量

Fig.1　Content of reducing sugars in mixed juice of *R. roxburghii* and apple fermented by different lactic acid bacteria

注：不同字母表示差异显著（$P<0.05$），图 2~图 7 同。

2.1.2　总酸的测定结果　研究表明，苹果酸是刺梨和苹果果实中主要的有机酸[25−26]，因此本试验在测定果汁中总酸时以苹果酸计。图 2 是各试验组和对照组的总酸，从图 2 中可以看出对照组的总酸为 4.82 g/L，发酵结束后，植物乳杆菌、副干酪乳杆菌以及发酵乳杆菌发酵混合果汁的总酸分别为 4.10、3.61、3.85 g/L，且 3 个试验组与对照组之间均具有显著性差异（$P<0.05$），推测经不同种类的乳酸菌发酵后，均能显著降低刺梨、苹果混合果汁中的苹果酸含量。已知苹果酸具有调节果汁酸碱平衡，影响果汁口味的作用，但是苹果酸含量过高会刺激口腔黏膜导致果汁口感粗糙，降低果汁的整体适口性[27]。刺梨果实中苹果酸的含量可达 7.26 mg/g 鲜重，显著高于蔷薇科其他种类的水果[28−29]，这是导致刺梨鲜果和果汁口感粗糙的重要因素。乳酸菌能够以苹果酸作为底物，利用苹果酸-乳酸酶、苹果酸酶、苹果酸脱氢酶等将苹果酸分解为乳酸和二氧化碳[30−31]。因此，利用乳酸菌发酵可分解果汁中的苹果酸，达到降低果汁酸度，使果汁口感更加柔和的作用。Liu 等[32] 利用乳酸菌发酵制备刺梨和薏苡仁饮料，结果显示，原料中的苹果酸从发酵前的 21.227 mg/mL 降至发酵后的 14.067 mg/mL，减少了约 30%，有效改善了饮料的酸味和涩味。

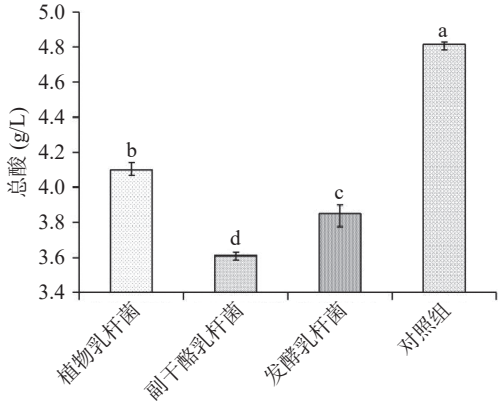


图 2　不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的总酸

Fig.2　Total acid of *R. roxburghii* and apple mixed juice fermented by different lactic acid bacteria

2.1.3　乳酸菌含量的测定结果　在筛选果蔬发酵菌种时，活菌含量越高往往表明菌株的生长能力和对发酵基质的利用能力越强[33]。图 3 是不同乳酸菌在刺梨、苹果混合果汁中发酵时的活菌含量统计结果。当以副干酪乳杆菌作为发酵菌种时，混合果汁中的乳酸菌含量最高，为$(4.86\pm0.04)\times10^7$ CFU/mL。说明相比植物乳杆菌和发酵乳杆菌，副干酪乳杆菌更适宜在刺梨、苹果混合果汁中生长繁殖。在其他研究中，副干酪乳杆菌也常被用作刺梨果汁的发酵菌种，并且有助于维持果汁抗氧化性以及提高果汁中生物活性物质的含量[34−35]。

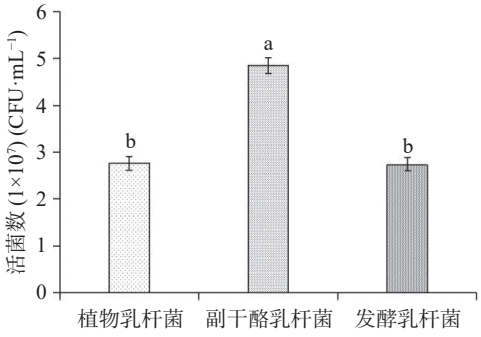


图 3　不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的乳酸菌含量

Fig.3　Lactic acid bacteria content of *R. roxburghii* Tratt and apple juice fermented by different lactic acid bacteria

2.1.4　总酚含量的测定结果　利用不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的总酚含量测定结果见图 4。由图 4 可见，对照组的总酚含量为 0.162 mg/mL，发酵结束后，植物乳杆菌、副干酪乳杆菌以及发酵乳杆菌

发酵混合果汁的总酚含量分别为 0.231、0.213 和 0.217 mg/mL。3 个试验组的总酚含量都显著高于对照组(P<0.05)。许多研究表明,乳酸菌发酵能够不同程度地增加果蔬汁中酚类物质的含量[36−37],但原因尚不十分明确。多项研究认为,植物中的部分多酚与纤维素等大分子紧密结合形成结合型酚而难以被常规溶剂提取,而发酵过程中微生物合成的多种水解酶则可利用水解作用破坏植物大分子与多酚结合的共价键,使一些结合酚转化为游离酚,从而使溶解在溶剂中的总酚含量增加[38−39]。此外,一些微生物还可能通过复杂的代谢反应将植物中的绿原酸、对香豆酸等物质转化为咖啡酸、原儿茶酸等酚类物质[40−41]。已知白藜芦醇、槲皮素、咖啡酸等许多酚类物质具有抗炎、抗氧化、保护心脑血管等生物学活性,本研究结果表明,利用不同的乳酸菌发酵均能够显著增加刺梨、苹果混合果汁中酚类物质的含量。

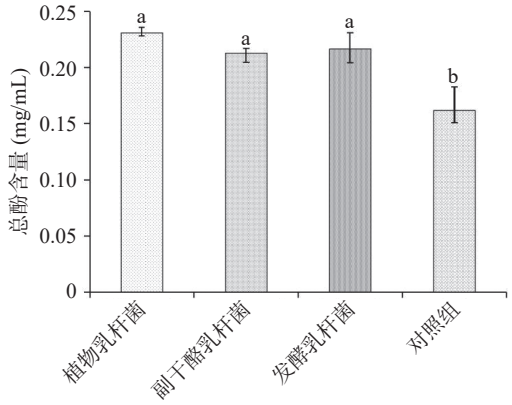


图 4 不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的总酚含量

Fig.4 Total phenolic content of *R. roxburghii* Tratt and apple juice fermented by different lactic acid bacteria

2.1.5 维生素 C 含量的测定结果 图 5 反映的是不同乳酸菌发酵后刺梨、苹果混合果汁的维生素 C 含量变化。其中对照组的维生素 C 含量为 2.91 mg/100 mL,发酵结束后,植物乳杆菌组、副干酪乳杆菌组以及发酵乳杆菌组的维生素 C 含量分别下降至 2.48、2.75、2.51 mg/100 mL。3 个试验组的维生素 C 含量均显著小于对照组(P<0.05),其中副干酪乳杆菌组的维生素 C 含量又显著高于其他 2 个对照组(P<0.05)。结果表明,经不同乳酸菌的发酵作用,均会导致刺梨、苹果混合果汁中维生素 C 含量显著下降,这一方面是由于维生素 C 的化学性质不稳定,易发生氧化和降解,另一方面可能是由于乳酸菌产生过氧化氢或其他氧化性代谢产物加速了维生素 C 的氧化分解[42]。

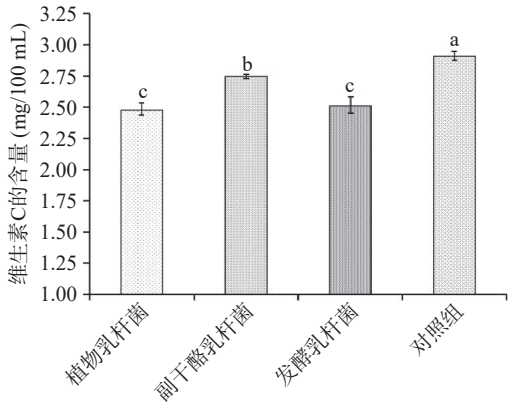


图 5 不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的维生素 C 含量

Fig.5 Vitamin C content of *R. roxburghii* Tratt and apple juice fermented by different lactic acid bacteria

2.1.6 类胡萝卜素含量的测定结果 类胡萝卜素能够有效地淬灭氧自由基,因此具有良好的抗氧化性。图 6 反映的是不同乳酸菌发酵对刺梨、苹果混合果汁中类胡萝卜素含量的影响。对照组的类胡萝卜素含量为 160.73 μg/mL,发酵结束后,植物乳杆菌组、副干酪乳杆菌组以及发酵乳杆菌组的类胡萝卜素含量分别为 408.33、572.28、477.07 μg/mL,3 个试验组的类胡萝卜素含量均显著高于对照组(P<0.05),说明不同的乳酸菌发酵均能显著地提高果汁中类胡萝卜素的含量,其中以副干酪乳杆菌为发酵剂时,混合果汁中类胡萝卜素含量的增加最为显著(P<0.05)。从已有的研究来看,经乳酸菌发酵后常能显著提高果蔬汁中类胡萝卜素的含量,例如,Bartkiene 等[43] 发现,相比未发酵处理的样品,利用沙克乳酸杆菌(*Lactiplantibacillus sakei*)发酵能够使番茄酱中的类胡萝卜素含量提高 33.6%~41.1%; Mhlanga 等[44] 利用多种乳酸菌发酵处理南瓜叶,结果表明,不同乳酸菌发酵均能提高南瓜叶中类胡萝卜素的含量,其中,利用植物乳杆菌和长双歧杆菌(*Bifidobacteria longum*)发酵可使类胡萝卜素的含量提高 1.85 倍和 1.64 倍。Xu 等[45] 研究认为,乳酸菌发酵提高果蔬汁中类胡萝卜素含量的原因主要有二,一是某些乳酸菌具有合成类胡萝卜素的能力,二是乳酸菌发酵可以增强植物基质中类胡萝卜素等植物化学物质的释放。然而,也有研究表明,乳酸菌发酵可能导致果蔬汁中类胡萝卜素含量的下降,例如,乳酸菌发酵会导致枸杞子中类胡萝卜素含量显著降低[46]。

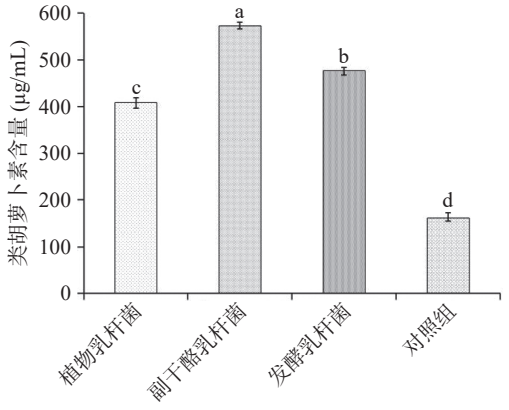


图 6 不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的类胡萝卜素含量

Fig.6 Carotenoids content of *R. roxburghii* Tratt and apple juice fermented by different lactic acid bacteria

2.1.7　单宁酸含量的测定结果　单宁酸常见于蔷薇属（*Rosa*）植物的果实，具有止血、止痛、消炎等作用[47]。但是，含量过高的单宁酸因为与口腔黏膜的作用而常导致明显的酸涩感。图 7 是不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的单宁酸含量。其中，未经发酵的对照组的单宁酸含量最高，达到了 0.485 mg/mL，而经植物乳杆菌、副干酪乳杆菌、发酵乳杆菌发酵后的混合果汁的单宁酸含量分别为 0.143、0.059、0.133 mg/mL。可见，经 3 种乳酸菌发酵后，均能显著地降低混合果汁中的单宁酸含量（P<0.05），其中，以副干酪乳杆菌为发酵菌种时，混合果汁的单宁酸含量最低，其单宁酸含量较对照组下降了 87.8%。乳酸菌发酵能够显著降低刺梨、苹果混合果汁中单宁酸的含量，推测是由于一些乳酸菌能够利用合成的单宁酶实现对单宁酸的分解。例如，Kanauchi[48] 以没食子酸甲酯为底物，罗丹宁和氢氧化钾溶液显色，用分光光度计检测了植物乳杆菌的单宁酶活力；Pham 等[49] 在多株乳酸菌的基因组中发现了编码单宁酶的基因。

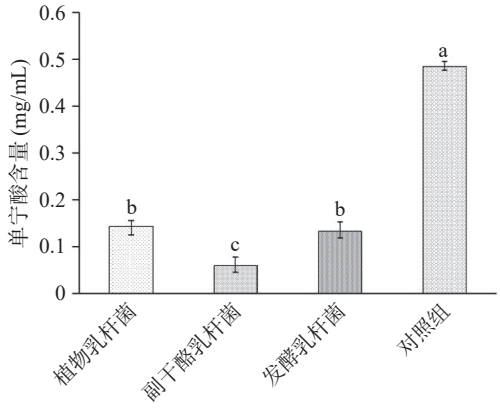


图 7　不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的单宁酸含量

Fig.7　Tannin content of *R. roxburghii* Tratt and apple juice fermented by different lactic acid bacteria

2.2　体外抗氧化指标的测定

表 2 是经不同乳酸菌发酵后，刺梨、苹果混合果汁的各项体外抗氧化指标的测定结果。除了植物乳杆菌组的超氧阴离子自由基清除率小于对照组外，各试验组的各项抗氧化指标均优于对照组，其中，副干酪乳杆菌组的 DPPH 自由基清除率、羟自由基清除率、超氧阴离子自由基清除率在所有试验分组中均最高，分别达到了 95.63%±0.08%、87.61%±1.95%、86.90%±1.57%。一些研究显示，乳酸菌发酵能够一定程度地提高食品的抗氧化性，例如，植物乳杆菌和副干酪乳杆菌通过发酵转化可以快速使蔓越莓花色苷向苯酚-吡喃型花青素进行生物转化，从而提高蔓越莓果汁的抗氧化性能[50]；经嗜酸乳杆菌和发酵乳杆菌发酵后，桃汁的亚铁离子还原能力和超氧阴离子自由基清除率均比未发酵的桃汁有显著提高[51]。乳酸菌发酵产物具有抗氧化性能的原因是多方面的，主要包括其产生的抗氧化酶活性、代谢产物的抗氧化能力以及金属螯合特性等[52]。

2.3　有机酸的测定结果

有机酸的种类和含量对果汁的口感、风味和营养价值都发挥着重要作用[53]，许多研究显示，乳酸菌的代谢可以改变果汁中有机酸的组成情况。表 3 是利用 3 种不同乳酸菌发酵的刺梨、苹果混合果汁中有机酸的组成和含量。经过 3 种乳酸菌的发酵之后，刺梨、苹果混合果汁中的酒石酸、苹果酸和琥珀酸的含量均显著下降（P<0.05），其中苹果酸的含量变化最为明显。在未经发酵的对照组混合果汁中，苹果酸的含量为 2064.70 μg/mL，而植物乳杆菌组、副干

表 2　不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的体外抗氧化指标测定结果

Table 2　*In vitro* antioxidant indexes of *R. roxburghii* Tratt and apple juice fermented by different lactic acid bacteria

体外抗氧化指标	植物乳杆菌	副干酪乳杆菌	发酵乳杆菌	对照组
DPPH自由基清除率(%)	94.80±0.45^{b}	95.63±0.08^{a}	95.37±0.09^{a}	93.84±0.08^{c}
羟自由基清除率(%)	71.13±1.88^{b}	87.61±1.95^{a}	86.30±1.47^{a}	70.99±1.30^{b}
超氧阴离子自由基清除率(%)	53.55±1.17^{d}	86.90±1.57^{a}	76.85±2.03^{b}	61.92±1.02^{c}

注：同行不同小写字母表示为显著差异（P<0.05），表3同。

表 3　不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的 9 种有机酸的测定结果（μg/mL）

Table 3　Determination of nine organic acids in *R. roxburghii* Tratt and apple juice fermented by different lactic acid bacteria (μg/mL)

有机酸种类	植物乳杆菌	副干酪乳杆菌	发酵乳杆菌	对照组
草酸	–	–	–	–
酒石酸	160.83±3.21^{b}	160.96±4.64^{b}	163.62±2.43^{b}	172.28±5.76^{a}
苹果酸	1909.94±8.76^{a}	1344.68±10.12^{c}	1639.03±7.75^{b}	2064.70±11.25^{a}
乳酸	149.41±2.33^{c}	740.45±6.89^{a}	403.74±3.42^{b}	–
乙酸	43.02±0.78	–	–	–
柠檬酸	–	–	–	–
琥珀酸	4536.24±13.44^{b}	4438.19±9.88^{c}	4554.55±12.46^{b}	4816.55±16.53^{a}
马来酸	–	0.29±0.00^{a}	–	0.23±0.00^{a}
富马酸	–	–	–	–

注：“–”表示未检出物。

酪乳杆菌组、发酵乳杆菌组的苹果酸含量分别为 1909.94、1344.68、1639.03 μg/mL，其中，副干酪乳杆菌组的苹果酸含量最低，相比对照组下降了 34.87%。因本研究中混合果汁总酸的测定是以苹果酸计，因此表 3 中各组的苹果酸含量与图 2 中各组的总酸测定结果是相一致的。在对照组中未检测到乳酸的存在，而植物乳杆菌组、副干酪乳杆菌组、发酵乳杆菌组的乳酸含量则分别为 149.41、740.45、403.74 μg/mL。已知部分乳酸菌能够通过苹果酸-乳酸发酵将苹果酸转化为乳酸，因此，本研究结果表明，植物乳杆菌、副干酪乳杆菌和发酵乳杆菌均能以苹果酸为碳源进行产能代谢，并进一步形成乳酸。苹果酸具有酸味爽口的特点，但是含量过多则会产生刺激性和苦涩感，相比苹果酸而言，乳酸的口感绵软温和，在改善发酵果汁感官性质的同时也提高了产品的微生物稳定性[54]。

2.4 挥发性组分的测定结果

本研究检测了 3 种不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的挥发性组分，并以未经发酵的新鲜刺梨、苹果混合果汁作为对照组，检测结果见表 4。图 8 是不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的挥发性组分

表 4 不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的挥发性组分测定结果

Table 4 Determination of volatile components in *Rosa roxburghii* Tratt and apple juice fermented by different lactic acid bacteria

类别	序号	物质名称	相对含量(%)			
			植物乳杆菌	副干酪乳杆菌	发酵乳杆菌	对照组
醛类化合物	Q1	己醛	2.77±0.09	10.41±0.34	3.58±0.07	13.54±1.82
	Q2	2-己烯醛	2.00±0.23	22.99±2.53	2.68±0.31	18.23±2.56
	Q3	苯乙醛	0.31±0.04	0.29±0.06	0.23±0.06	0.15±0.02
	Q4	壬醛	0.42±0.04	2.44±0.07	1.44±0.06	2.58±0.12
	Q5	苯甲醛	–	5.87±0.87	6.38±1.12	3.09±0.64
	Q6	3,5-二甲基苯甲醛	–	0.92±0.12	0.4±0.09	0.97±0.21
	Q7	5-二甲基苯甲醛	1.1±0.06	–	–	–
	Q8	2-甲基戊醛	–	0.04±0.01	–	–
	Q9	(E)-2-庚烯醛	–	0.08±0.01	–	–
	Q10	2-甲基丁醛	–	–	–	0.96±0.18
	Q11	薄荷醇	–	–	–	0.51±0.19
	Q12	癸醛	–	–	–	0.12±0.13
	Q13	*β*-环柠檬醛	–	–	–	0.3±0.04
	小计		6.6	43.04	14.71	40.45
酯类化合物	Z1	硅烷二醇二甲酯	2.29±0.21	0.61±0.09	2.82±0.84	1.95±0.11
	Z2	邻苯二甲酸二异丁酯	0.26±0.05	0.21±0.08	0.24±0.07	0.21±0.07
	Z3	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	0.4±0.03	–	0.13±0.04	0.39±0.08
	Z4	乙酸丁酯	1.9±0.11	3.32±0.78	–	8.18±1.24
	Z5	乙酸乙酯	–	0.18±0.08	–	0.14±0.05
	Z6	2-甲基丁酸乙酯	–	0.55±0.87	–	1.74±0.14
	Z7	甲酸叶醇酯	5.39±1.23	–	6.11±1.35	–
	Z8	邻苯二甲酸丁基酯	0.26±0.06	0.09±0.02	–	–
	Z9	乙酸正丙酯	0.8±0.02	–	–	–
	Z10	水杨酸甲酯	0.22±0.01	–	–	–
	Z11	2-十三烷基丁酸酯	0.07±0.00	–	–	–
	Z12	1,4,4-三甲基环-2-一乙酸烯醇内酯	0.24±0.06	–	–	–
	Z13	异丁酸异丁酯	–	0.05±0.00	–	–
	Z14	亚砷酸三(三甲基硅烷基)酯	–	–	1.24±0.31	–
	Z15	邻苯二甲酸二丁酯	–	–	0.1±0.00	–
	Z16	2-甲基丁基乙酸酯	–	–	–	9.67±2.11
	Z17	丁酸丙酯	–	–	–	0.5±0.07
	Z18	丙酸丁酯	–	–	–	0.38±0.14
	Z19	乙酸戊酯	–	–	–	0.43±0.21
	Z20	2-甲基丁酸丙酯	–	–	–	0.43±0.08
	Z21	乙酸叶醇酯	–	–	–	0.34±0.08
	Z22	乙酸己酯	–	–	–	1.69±0.41
	Z23	2-甲基丁酸丁酯	–	–	–	0.11±0.03
	Z24	异丁酸辛酯	–	–	–	0.07±0.01
	Z25	邻苯二甲酸-1-丁酯-2-异丁酯	–	–	–	0.1±0.00
	小计		11.83	5.01	10.64	26.33

续表 4

类别	序号	物质名称	相对含量(%)			
			植物乳杆菌	副干酪乳杆菌	发酵乳杆菌	对照组
醇类化合物	C1	正己醇	30.95±6.34	14.14±4.22	24.16±8.95	9.80±1.65
	C2	2-乙基己醇	0.17±0.05	0.28±0.04	0.19±0.03	0.29±0.03
	C3	芳樟醇	0.67±0.05	0.79±0.07	0.60±0.09	0.88±0.14
	C4	S-(-)-2-甲基-1-丁醇	4.4±0.57	1.79±0.22	4.12±0.66	–
	C5	1-壬醇	0.2±0.02	0.14±0.05	0.12±0.02	–
	C6	Alpha-紫罗兰醇	0.78±0.14	–	0.81±0.25	0.51±0.11
	C7	雪松醇	0.12±0.04	–	0.09±0.02	0.13±0.05
	C8	1-奈醇	0.31±0.07	0.15±0.02	–	0.11±0.00
	C9	丁醇	–	0.81±0.18	–	1.3±0.09
	C10	1-丁醇	3.37±1.03	–	2.88±0.88	–
	C11	反式-2-己烯-1-醇	5.94±1.24	–	5.48±1.17	–
	C12	4-甲基-1-庚醇	0.43±0.15	–	0.38±0.08	–
	C13	顺-*α*,*α*-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋-2-甲醇	0.07±0.01	–	–	0.06±0.00
	C14	顺式-2-壬烯-3-醇	0.09±0.02	–	–	–
	C15	2-甲基乙酸1-丁醇	–	0.56±0.14	–	–
	C16	(E)-氧化芳樟醇	–	0.2±0.03	–	–
	C17	顺式-alpha,alpha,5-三甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-甲醇	–	0.12±0.08	–	–
	C18	3-甲基-2-己醇	–	–	0.15±0.04	–
	C19	2-奈醇	–	–	0.56±0.06	–
	C20	正辛醇	–	–	–	0.17±0.03
	C21	2-丙基-1-庚醇	–	–	–	0.09±0.02
	C22	香叶基丙醇	–	–	–	0.13±0.04
	小计		47.5	18.98	39.54	13.47
酮类化合物	T1	苯乙酮	0.95±0.06	0.98±0.04	0.82±0.07	0.62±0.05
	T2	大马酮	–	0.55±0.21	–	0.17±0.08
	T3	*β*-紫罗兰酮	–	0.1±0.00	–	0.12±0.01
	T4	大马士酮	0.29±0.05	–	–	–
	T5	2-庚酮	–	–	–	0.38±0.02
	T6	6-甲基-5-庚烯-2-酮	–	–	–	0.52±0.21
	T7	*α*-紫罗兰酮	–	–	–	0.06±0.01
	小计		1.24	1.63	0.82	1.87
酚类化合物	F1	3,5-二叔丁基苯酚	0.76±0.04	0.51±0.31	0.70±0.07	0.46±0.22
	F2	2-叔丁基-4-甲氧基苯酚	–	0.22±0.03	0.2±0.02	–
	F3	丁香酚	0.11±0.01	–	–	–
	小计		0.87	0.73	0.9	0.46
酸类化合物	S1	己酸	10.16±1.32	14.59±2.43	10.82±2.22	6.74±0.84
	S2	辛酸	11.00±1.23	3.03±0.64	10.15±0.87	5.58±1.22
	S3	壬酸	4.85±0.32	4.62±0.68	8.04±1.24	3.06±0.68
	S4	反式-3-己烯酸	0.51±0.14	0.04±0.24	0.57±0.32	–
	S5	正癸酸	2.44±0.57	–	0.91±0.24	0.49±0.11
	S6	异辛酸	0.18±0.05	0.24±0.05	–	0.05±0.00
	S7	庚酸	–	0.34±0.04	0.27±0.03	–
	S8	醋酸	0.25±0.02	–	0.16±0.01	–
	S9	(2Z)-2-辛烯酸	0.44±0.08	1.1±0.34	–	–
	S10	3-辛烯酸	–	–	0.77±0.21	0.34±0.06
	S11	十三烷酸	–	0.2±0.00	–	–
	S12	甲酸	–	–	0.13±0.02	–
	S13	十一烷酸	–	6.19±2.13	–	–
	小计		29.83	30.35	31.82	16.26
烃类化合物	T1	葑烯	–	0.13±0.04	–	0.1±0.00
	T2	(3E)-3-十一碳烯	0.56±0.14	–	–	–
	T3	苯并环丁烯	–	0.46±0.08	–	–

续表 4

类别	序号	物质名称	相对含量(%)			
			植物乳杆菌	副干酪乳杆菌	发酵乳杆菌	对照组
	T4	柠檬烯	−	0.2±0.02	−	−
	T5	3-三氟乙酰氧戊烷	−	0.09±0.01	−	−
	T6	毕澄茄烯	−	0.07±0.01	−	−
	T7	1-癸烯	−	−	0.14±0.02	−
	T8	异丁基环己烷	−	−	−	0.07±0.00
	T9	茶螺旋烷	−	−	−	0.33±0.05
	T10	6-(2-丁烯基)-1,5,5-三甲基-环己烯	−	−	−	0.06±0.01
	T11	α-蒎烯	−	−	−	0.04±0.00
	小计		0.56	0.95	0.14	0.6
其他化合物	E1	2,3-二氢苯并呋喃	2.33±0.54	−	2.17±0.78	−
	E2	柠檬腈	−	−	0.17±0.05	−
	小计		2.33	−	2.24	−

注: “−”表示未检出。

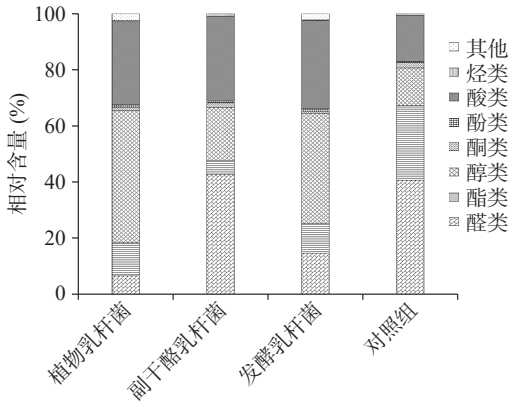


图 8 不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁的挥发性组分相对含量占比变化

Fig.8 Changes in the relative proportions of volatile components in mixed *R. roxburghii* Tratt-apple juice fermented with different lactic acid bacteria

相对含量占比变化。由表 4 的测定结果可见, 3 种乳酸菌发酵后的刺梨、苹果混合果汁中共计检测出了 72 种不同的挥发性组分, 而未经发酵处理的对照组果汁中检测到 55 种不同的挥发性组分。在对照组中, 相对含量占优的几种挥发性组分主要是 2-己烯醛、己醛、正己醇、2-甲基丁基乙酸酯、乙酸丁酯, 它们的相对含量分别是 18.23%、13.54%、9.80%、9.67% 和 8.18%; 经过植物乳杆菌或发酵乳杆菌发酵之后, 2-己烯醛、己醛、2-甲基丁基乙酸酯、乙酸丁酯的含量均明显地下降, 而在副干酪乳杆菌发酵之后, 除乙酸丁酯、2-甲基丁基乙酸酯的相对含量明显下降之外, 2-己烯醛、己醛、正己醇的相对含量则与对照组比较接近, 说明经副干酪乳杆菌发酵后的刺梨、苹果混合果汁的主要挥发性组分构成与对照组更接近。由图 8 可知, 在对照组果汁中, 醛类、酯类、酸类和醇类是主要的挥发性组分, 其相对含量分别为 40.45%、26.33%、16.26% 和 13.47%。与对照组相比, 当以植物乳杆菌和发酵乳杆菌分别作为发酵剂对混合果汁进行发酵后, 果汁中的醛类和酯类组分的占比均呈现了明显的降低, 醛类物质占比分别下降了 83.68% 和 63.63%, 酯类物质占比分别下降了 55.07% 和 59.59%, 而酸类和醇类挥发性组分的占比则出现了明显的升高, 其中酸类物质占比分别增加了 83.46% 和 95.69%。与对照组相比, 以副干酪乳杆菌作为发酵剂, 果汁中醛类物质的相对含量为 43.04%, 较对照组增加了 6.40%, 而酯类物质的相对含量仅为 5.01%, 较对照组减少了 80.97%, 而酸类和醇类物质的相对含量分别为 30.35% 和 18.98%, 较对照组分别增加了 86.65% 和 40.91%。因此, 与植物乳杆菌和发酵乳杆菌相比, 以副干酪乳杆菌为发酵剂时, 混合果汁中各类型挥发性组分相对含量占比变化更接近未经发酵的对照组果汁。

2.5 挥发性组分的香气贡献分析

以 ROAV≥1.0 为标准, 筛选出各试验组和对照组中关键的香气物质, 具体结果见表 5。其中, 对照组果汁中的关键香气成分有己醛、壬醛、2-己烯醛、乙酸丁酯、2-甲基丁酸乙酯、2-甲基丁基乙酸酯、2-甲基丁酸丙酯、正己醇、芳樟醇、β-紫罗兰酮、己酸等。已有的研究表明, 2-甲基丁酸乙酯、2-甲基丁基乙酸酯、壬醛、2-己烯醛、己酸、正己醇、芳樟醇等是刺梨果实的关键香气物质[55−57], 乙酸丁酯、2-甲基丁基乙酸酯、正己醇、2-己烯醛等是苹果的关键香气物质, 而己醛则是刺梨和苹果共有的关键香气物质[58−59]。由表 5 可知, 对照组中 ROAV 最大的前 3 种关键香气物质分别是 2-甲基丁酸乙酯、己醛、壬醛, 它们的 ROAV 分别是 100.0、98.0、93.4; 经过植物乳杆菌或发酵乳杆菌发酵之后, 已检测不到 2-甲基丁酸乙酯, 而己醛和壬醛的 ROAV 则分别下降至 10.0 和 16.6, 7.6 和 33.4; 而经副干酪乳杆菌发酵后的混合果汁中, 2-甲基丁酸乙酯、己醛、壬醛 3 种关键香气物质的 ROAV 分别是 34.6、82.5 和 96.6。此外, 与植物乳杆菌组和发酵乳杆菌组相比, 副干酪乳杆菌组中的 2-己烯醛、乙酸丁酯、芳樟醇、己酸等关

表 5　不同乳酸菌发酵刺梨、苹果混合果汁中 ROAV≥1 的挥发性化合物

Table 5　Volatile compounds with ROAV≥1 in *R. roxburghii* Tratt and apple juice fermented by different lactic acid bacteria

化合物	香气描述	阈值(mg/kg)	ROAV			
			植物乳杆菌	副干酪乳杆菌	发酵乳杆菌	对照组
己醛	青草香	0.005	10.0	82.5	16.6	98.0
2-己烯醛	青草香、果香	0.03	1.2	30.3	2.1	22.0
苯乙醛	水果甜香	0.0063	0.9	1.8	0.8	0.9
壬醛	花香	0.001	7.6	96.6	33.4	93.4
乙酸丁酯	甜香蕉、蜜饯	0.058	0.6	2.3	0.0	5.1
2-甲基丁酸乙酯	果香	0.00063	0.0	34.6	0.0	100.0
2-甲基丁基乙酸酯	甜香、香蕉	0.005	0.0	0.0	0.0	70.0
2-甲基丁酸丙酯	果香、甜香	0.0002	0.0	0.0	0.0	77.8
正己醇	香蕉香	0.0056	100.0	100.0	100.0	63.4
芳樟醇	浓郁带甜的木青香	0.006	2.0	5.2	2.3	5.3
β-紫罗兰酮	花卉、紫罗兰香	0.0035	0.0	1.1	0.0	1.2
己酸	奶酪、柚子	0.0356	5.2	16.2	7.0	6.9

注：阈值数据来源于《化合物嗅觉阈值汇编》。香气描述主要来源于网站 http: //www.flavornet.org/flavornet.html。

键香气物质的 ROAV 也更加接近对照组。由此可见，3 种乳酸菌中，以副干酪乳杆菌作为发酵剂时，能够更好地维持刺梨、苹果混合果汁中关键香气物质的相对含量，从而更有利于保持混合果汁中关键风味的稳定。

3　结论

本研究选用 3 种乳酸菌进行刺梨、苹果混合果汁的发酵，经发酵后，副干酪乳杆菌在混合果汁中的细胞含量最高，且以副干酪乳杆菌为发酵剂时，混合果汁中的还原糖含量最低，说明副干酪乳杆菌较植物乳杆菌和发酵乳杆菌在刺梨、苹果混合果汁中的生长性能更强。利用 3 种乳酸菌发酵均能降低混合果汁中的苹果酸和单宁酸的含量，并将苹果酸转化为乳酸，但是以副干酪乳杆菌作为发酵剂时，混合果汁的总酸、苹果酸、单宁酸水平均显著地小于对照组、植物乳杆菌组和发酵乳杆菌组（P<0.05），说明利用副干酪乳杆菌发酵更有利于改善混合果汁酸涩的口感。相比对照组，用 3 种乳酸菌进行刺梨、苹果混合果汁的发酵后，果汁中的总酚和类胡萝卜素的含量均显著增加（P<0.05），而维生素 C 的含量则显著降低（P<0.05），其中，副干酪乳杆菌组的类胡萝卜素和维生素 C 的含量均显著高于植物乳杆菌组和发酵乳杆菌组（P<0.05）。当以副干酪乳杆菌为发酵剂时，刺梨、苹果混合果汁的 3 种体外抗氧化指标不仅都显著大于对照组（P<0.05），也大于其余 2 个试验组。并且，副干酪乳杆菌组的苹果酸、酒石酸和琥珀酸含量在所有分组中均最低，而乳酸含量则显著大于植物乳杆菌组和发酵乳杆菌组（P<0.05），其降酸性能在 3 种乳酸菌中最优。此外，果汁的挥发性组分测定结果显示，以副干酪乳杆菌作为发酵剂，最有利于保留刺梨、苹果混合果汁中的关键性香气物质。综上所述，副干酪乳杆菌较植物乳杆菌和发酵乳杆菌更适宜用于刺梨、苹果混合果汁的发酵。

© 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］张家春，周鑫伟，周颖，等. 贵州省药食两用刺梨根、花、叶品质研究进展与展望[J]. 北方园艺，2022(6)：122−130. ［ZHANG Jiachun, ZHOU Xinwei, ZHOU Ying, et al. Research progress and prospect of root, flower and leaf quality of *Rosa roxburghii* for medicine and food in Guizhou Province[J]. Northern Horticulture, 2022(6)：122−130.］

［2］卿云光，任永超. 探讨温度条件对刺梨品质的影响[J]. 食品工业，2024, 45(11)：98−102. ［QING Yunguang, REN Yongchao. Discussion of the impact of temperature on the quality of *Rosa roxburghii*[J]. The Food Industry, 2024, 45(11)：98−102.］

［3］吴红，罗忠圣，罗宗乾，等. 贵州十七个产地刺梨抗氧化活性及抗氧化物质分析[J]. 北方园艺，2023(20)：94−101. ［WU Hong, LUO Zhongsheng, LUO Zongqian, et al. Analysis of antioxidant activity and antioxidant profile of *Rosa roxburghii* Tratt from 17 origins in Guizhou Province[J]. Northern Horticulture, 2023(20)：94−101.］

［4］孙海达，马凯，申鹰，等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定刺梨原汁中 27 种游离营养成分[J]. 食品科技，2024, 49(2)：294−301. ［SUN Haida, MA Kai, SHEN Ying, et al. Simultaneous determination of 27 free nutrients in *Rosa roxburghii* juice by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(2)：294−301.］

［5］李倩倩. 滇产刺梨果多糖的优化提取及其抗肿瘤作用及机制研究[D]. 大理：大理大学，2023. ［LI Qianqian. Study on optimal extraction and antitumor effect and mechanism of rose roxburghii tratt fruits polysaccharide from Yunnan[D]. Dali：Dali University, 2023.］

［6］WU Boxiao, LI Churan, LUO Xulu, et al. Identification of key hypolipidemic components and exploration of the potential mechanism of total flavonoids from *Rosa sterilis* based on network pharmacology, molecular docking, and zebrafish experiment[J]. Current Issues in Molecular Biology, 2024, 46(6)：5131−5146.

［7］赵玉山. 贵州：全力打造百亿级刺梨产业集群[J]. 中国果业信息，2024, 41(8)：62. ［ZHAO Yushan. Guizhou：Make every effort to build a 10 billion-level *Rosa roxburghii* industrial cluster[J]. China Fruit News, 2024, 41(8)：62.］

［8］赵光远，梁晓童，任莹莹. 苹果-刺梨混合果汁饮料浑浊稳定

性控制[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2014(3): 17−20. [ZHAO Guangyuan, LIANG Xiaotong, REN Yingying. Study on the compound juice beverage turbid stability of apple and *Rose roxburghii* Tratt[J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science), 2014(3): 17−20.]
[9] 马子琳, 曹伟超, 张宾乐, 等. 产单宁酶乳酸菌发酵红豆、扁豆酸面团的生化特性及其对馒头体外消化的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(19): 85−93,98. [MA Zilin, CAO Weichao, ZHANG Binle, et al. Biochemical characteristics of tannase-producing LAB fermented red beans and lentils sourdough and its effects on *in vitro* digestibility of steamed bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(19): 85−93,98.]
[10] 池耀卿, 卢海强, 王卫正, 等. 1 株产单宁酶戊糖片球菌的筛选及功能评价[J]. 河北农业大学学报, 2023, 46(6): 74−82. [CHI Yaoqing, LU Haiqiang, WANG Weizheng, et al. Screening and functional evaluation of a tannase-producing strain of *Pediococcus pentosaceus*[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2023, 46(6): 74−82.]
[11] 王金玲, 晏雨辰, 李巧月, 等. 生物降解柠檬酸及其影响因素的研究进展[J]. 现代食品科技, 2022, 38(2): 347−357,312. [WANG Jinling, YAN Yuchen, LI Qiaoyue, et al. Research progress of biodegradable citric acid and its influencing factors[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(2): 347−357, 312.]
[12] 刘辉, 张嘉璇, 张碧颖, 等. 酒酒球菌和植物乳杆菌接种时序对苹果酸-乳酸发酵的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(14): 78−87. [LIU Hui, ZHANG Jiaxuan, ZHANG Biying, et al. Effect of *Oenococcus oeni* and *Lactiplantibacillus plantarum* inoculation sequence on malolactic fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(14): 78−87.]
[13] 国家卫生健康委员会. 解读关于《可用于食品的菌种名单》和《可用于婴幼儿食品的菌种名单》更新的公告(2022 年第 4 号)[J]. 饮料工业, 2022, 25(5): 3−4. [National Health Commission. Interpretation of the Announcement on the Updates to the 'List of Bacterial Strains Usable in Food' and the 'List of Bacterial Strains Usable in Infant and Young Child Food(No. 4 of 2022)[J]. Beverage Industry, 2022, 25(5): 3−4.]
[14] 张弛, 刘坤, 刘荣光, 等. 食品中还原糖测定方法的比较综述[J]. 吉林农业, 2018(10): 93. [ZHANG Chi, LIU Kun, LIU Rongguang, et al. Comparative review on determination methods of reducing sugar in food[J]. Agriculture of Jilin, 2018(10): 93.]
[15] 张盟. 发酵型重组牛肉脯和牛肉干的开发研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2012. [ZHANG Meng. Development a method to manufacture fermented beef jerky[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012.]
[16] 曹雨桐, 强文乐, 付灏, 等. 不同外加糖源对桑葚果酒品质及香气的影响[J]. 中国酿造, 2024, 43(8): 162−169. [CAO Yutong, QIANG Wenle, FU Hao, et al. Effects of different additional carbohydrate sources on the quality and aroma of mulberry wine[J]. China Brewing, 2024, 43(8): 162−169.]
[17] 齐芳芳. 蔬菜中维生素 C 含量测定方法的研究[J]. 现代食品, 2023, 29(16): 206−208. [QI Fangfang. Study on the determination method of vitamin C content in vegetables[J]. Modern Food, 2023, 29(16): 206−208.]
[18] 贾雨朦, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 滁菊的功能成分及其体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 66−72. [JIA Yumeng, CHEN Qinqin, BI Jinfeng, et al. Functional components and *in vitro* antioxidant activity of *Chrysanthemum* flower (*Chrysanthemum morifolium* Ramat) from Chuzhou[J]. Food Science, 2019, 40(23): 66−72.]
[19] 字学娟. 主要热带乔灌木饲用价值评定及其单宁含量动态分析[D]. 海口: 海南大学, 2010. [ZI Xuejuan. Feeding values assessment of the major tropical trees and shrubs and the dynamic of tannins[D]. Haikou: Hainan University, 2010.]
[20] 董银卯, 何聪芬, 王领, 等. 火龙果酵素生物活性的初步研究[J]. 食品科技, 2009, 34(3): 192−196. [DONG Yinmao, HE Congfen, WANG Ling, et al. Study on the bioactivity of pitaya enzyme[J]. Food Science and Technology, 2009, 34(3): 192−196.]
[21] 陈天荣, 张玉红. 不同菌种对芜根发酵液风味物质及抗氧化性能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 211−220. [CHEN Tianrong, ZHANG Yuhong. Enhancing flavor compounds and antioxidant properties: Impact of diverse bacterial strains on fermentation broth of *Brassica rapa* L.[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(16): 211−220.]
[22] 窦志霞, 何兴芬, 薛宇航, 等. 猕猴桃酵素的乳酸菌和酵母菌发酵特性及成分变化[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 322−332. [DOU Zhixia, HE Xingfen, XUE Yuhang, et al. The fermentation characteristics and composition changes of fermented kiwifruit extract by lactic acid bacteria and yeasts[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(9): 322−332.]
[23] 黄玉立, 葛黎红, 马思尧, 等. 乳酸菌与酵母菌互作对萝卜泡菜发酵进程及风味品质的影响[J]. 中国酿造, 2024, 43(4): 197−202. [HUANG Yuli, GE Lihong, MA Siyao, et al. Effect of the interaction between lactic acid bacterium and yeast on the fermentation process and flavor quality of radish Paocai[J]. China Brewing, 2024, 43(4): 197−202.]
[24] 张涛, 黄晨, 郭德军, 等. 基于 GC-IMS 结合化学模式识别分析的广西主栽品种澳洲坚果干燥过程挥发性物质评价[J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 315−328. [ZHANG Tao, HUANG Chen, GUO Dejun, et al. Evaluation of volatile substances in the drying process of *Macadamia* nuts of Guangxi's main cultivars based on GC-IMS combined with chemical pattern recognition analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 315−328.]
[25] GAO Meng, YANG Nanxiang, SHAO Yingli, et al. An insertion in the promoter of a malate dehydrogenase gene regulates malic acid content in apple fruit[J]. Plant Physiology, 2024, 196(1): 432−445.
[26] SU Liyao, ZHANG Tian, WU Min, et al. Transcriptome and metabolome reveal sugar and organic acid accumulation in *Rosa roxburghii* fruit[J]. Plants, 2023, 12(17): 3036.
[27] 王立芳, 张微, 文连奎. 可降解 L-苹果酸和柠檬酸菌株的筛选及鉴定[J]. 食品科学, 2010, 31(21): 279−282. [WANG Lifang, ZHANG Wei, WEN Liankui. Screening and identification of a strain degrading L-malic acid and critic acid[J]. Food Science, 2010, 31(21): 279−282.]
[28] 安华明, 刘明, 杨曼, 等. 刺梨有机酸组分及抗坏血酸含量分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(10): 2094−2100. [AN Huaming, LIU Ming, YANG Man, et al. Analysis of main organic acid compositions in *Rosa roxburghii* Tratt[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(10): 2094−2100.]
[29] 冯建文, 栾北辰, 韩秀梅, 等. 不同苹果种质资源果实糖酸品质特征研究[J]. 中国南方果树, 2024, 53(5): 169−177. [FENG Jianwen, LUAN Beichen, HAN Xiumei, et al. Study on fruit sugar and organic acid characteristics in different apple germplasm resources[J]. South China Fruits, 2024, 53(5): 169−177.]
[30] EMKANI M, OLIETE B, SAUREL R. Effect of lactic acid fermentation on legume protein properties, a review[J]. Fermentation, 2022, 8(6): 244.
[31] NGUYEN P T, NGUYEN H T. Environmental stress for improving the functionality of lactic acid bacteria in malolactic fermentation[J]. The Microbe, 2024, 4: 100138.
[32] LIU Zhengyu, TIAN Xueyi, DONG Lidan, et al. Effects of dual-strain fermentation on physicochemical properties of *Rosa roxburghii* Tratt and *Coix* seed beverage[J]. LWT, 2024, 194: 115813.
[33] 王璐, 王伟伟, 王艳霞, 等. 果蔬发酵乳酸菌的筛选、鉴定及发酵性能分析[J]. 食品科学, 2020, 41(10): 166−171. [WANG Lu, WANG Weiwei, WANG Yanxia, et al. Screening, identification

and fermentation characteristics of lactic acid bacteria for fermentation of fruits and vegetables[J]. Food Science, 2020, 41(10): 166−171.]
[34] 魏涛涛, 左云洋, 王令, 等. 不同乳酸菌发酵对刺梨汁品质及风味影响[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(4): 90−97. [WEI Taotao, ZUO Yunyang, WANG Ling, et al. Effects of fermentation with different lactic acid bacteria on quality and fragrance of *Rosa roxburghii* Tratt juice[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(4): 90−97.]
[35] LUO You, TANG Ruling, QIU Han, et al. Widely targeted metabolomics-based analysis of the impact of *L. plantarum* and *L. paracasei* fermentation on *Rosa roxburghii* Tratt juice[J]. International Journal of Food Microbiology, 2024, 417: 110686.
[36] YIN Xin, HUANG Siyun, XIONG Tao, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* NCU1546 fermentation on active components, *in vitro* uric acid lowering activity and flavor of *Lilium*[J]. Food Bioscience, 2025, 65: 106112.
[37] WU Qi, ZOU Sibo, YAN Xu, et al. *Lactiplantibacillus plantarum* A72 inoculation enhances *Citrus* juice quality: A systematic analysis of the strain's fermentation properties, antioxidant capacities, and transcriptome pathways[J]. Food Bioscience, 2025, 64: 105878.
[38] 向进乐, 李志西, 甘峰, 等. 枳椇果梗不同类型酚酸含量及抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(8): 106−111. [XIANG Jinle, LI Zhixi, GAN Feng, et al. Determination of four different phenolic acids of *Hovenia acerba* fruit and their antioxidant activities[J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(8): 106−111.]
[39] 谢宁轩, 张文刚, 党斌, 等. 冠突散囊菌发酵对青稞多酚组成及其体外抗氧化及糖脂代谢酶抑制活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(23): 87−94. [XIE Ningxuan, ZHANG Wengang, DANG Bin, et al. Effect of *Eurotium cristatum* fermentation on the composition of polyphenols in highland barley and their inhibitory activities on antioxidant and glycolipid metabolic enzymes *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(23): 87−94.]
[40] FILANNINO P, Di CAGNO R, GOBBETTI M. Metabolic and functional paths of lactic acid bacteria in plant foods: Get out of the labyrinth[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2018, 49: 64−72.
[41] ZHOU Yan, WANG Ruimin, ZHANG Yefang, et al. Biotransformation of phenolics and metabolites and the change in antioxidant activity in kiwifruit induced by *Lactobacillus plantarum* fermentation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(8): 3283−3290.
[42] ADETUYI F O, IBRAHIM T A. Effect of fermentation time on the phenolic, flavonoid and vitamin C contents and antioxidant activities of okra (*Abelmoschus esculentus*) seeds[J]. Nigerian Food Journal, 2014, 32(2): 128−137.
[43] BARTKIENE E, VIDMANTTIENE D, JUODEIKIENE G, et al. Lactic acid fermentation of tomato: Effects on cis/trans lycopene isomer ratio, beta-carotene mass fraction and formation of L(+)- and D(-)-lactic acid[J]. Food Technology and Biotechnology, 2013, 51(4): 471−478.
[44] MHLANGA P, MIANDA S M, SIVAKUMAR D. Impact of fermentation of pumpkin leaves and melon varieties with *Lactobacillus* strains on physicochemical properties, antioxidant activity, and carotenoid compounds[J]. Foods, 2024, 13(22): 3562.
[45] XU Y, HLAING M M, GLAGOVSKAIA O, et al. Fermentation by probiotic *Lactobacillus gasseri* strains enhances the carotenoid and fibre contents of carrot juice[J]. Foods, 2020, 9(12): 1803.
[46] 李苛祎. 乳酸菌发酵枸杞子工艺及性能评价[D]. 天津: 天津科技大学, 2023. [LI Keyi. Process and performance evaluation of fermented *Lycium barbarum* by lactic acid bacteria[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2023.]
[47] TAKAYAMA S, KAWANISHI M, YAMAUCHI K, et al. Ellagitannins from *Rosa roxburghii* suppress poly(I: C)-induced IL-8 production in human keratinocytes[J]. Journal of Natural Medicines, 2021, 75(3): 623−632.
[48] KANAUCHI M. Assay analysis of tannase from *Lactobacillus plantarum*[M]. Lactic Acid Bacteria. New York, NY: Springer US, 2024: 87-95.
[49] PHAM H H T, KIM D H, NGUYEN T L. Wide-genome selection of lactic acid bacteria harboring genes that promote the elimination of antinutritional factors[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1145041.
[50] HAN Yudi, LI Xusheng, ZHANG Qing, et al. *Lactobacillus* fermentation accelerated biotransformation of cranberry anthocyanins towards phenol-pyranoanthocyanins and their stability and antioxidant property[J]. Food Chemistry, 2024, 461: 140793.
[51] HASHEMI S M B, JAFARPOUR D, JOUKI M. Improving bioactive properties of peach juice using *Lactobacillus* strains fermentation: Antagonistic and anti-adhesion effects, anti-inflammatory and antioxidant properties, and Maillard reaction inhibition[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130501.
[52] GHIASI F, HASHEMI S M B, ABEDI E. Effective enhancement of food oxidative stability induced by *Lactobacillus* strains: *In vitro* activity[J]. Food Control, 2023, 153: 109912.
[53] GARZÓN G A, MANNS D C, RIEDL K, et al. Identification of phenolic compounds in petals of *Nasturtium* flowers (*Tropaeolum majus*) by high-performance liquid chromatography coupled to mass spectrometry and determination of oxygen radical absorbance capacity (ORAC)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(6): 1803−1811.
[54] GERARDI C, TRISTEZZA M, GIORDANO L, et al. Exploitation of *Prunus mahaleb* fruit by fermentation with selected strains of *Lactobacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Microbiology, 2019, 84: 103262.
[55] 盛小芳. 刺梨中关键香气物质的鉴定[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023. [SHENG Xiaofang. Identification of key aroma components in *Rosa roxburghii*[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.]
[56] 莫梅清, 江梓仪, 胡梦迪, 等. 刺梨汁冷冻贮藏过程中风味的动态变化规律[J]. 食品工业科技, 2024, 45(20): 320−331. [MO Meiqing, JIANG Ziyi, HU Mengdi, et al. Dynamic flavor changes of *Rosa roxburghii* juice during frozen storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(20): 320−331.]
[57] 李婷婷, 黄名正, 唐维媛, 等. 刺梨汁中挥发性成分测定及其呈香贡献分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 237−246. [LI Tingting, HUANG Mingzheng, TANG Weiyuan, et al. Determination of volatile components in *Rosa roxburghii* Tratt juice and the analysis of its contribution for aroma[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(4): 237−246.]
[58] 蒙小玉, 牛歆雨, 栾北辰, 等. 不同苹果品种(系)挥发性物质成分研究[J]. 贵州农业科学, 2024, 52(11): 77−84. [MENG Xiaoyu, NIU Xinyu, LUAN Beichen, et al. Study on volatile substances components in different apple cultivars(lines)[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2024, 52(11): 77−84.]
[59] 韩杨, 黄金凤, 吕天星, 等. 苹果果实香气合成机制和关键基因研究进展[J]. 果树学报, 2026, 43(3): 649−660. [HAN Yang, HUANG Jinfeng, LÜ Tianxing, et al. Research progress on the mechanism of apple aroma formation and the mapping of key genes[J]. Journal of Fruit Science, 2026, 43(3): 649−660.]