

基于乳酸菌发酵荔枝汁中糖酸组成及抗氧化能力的变化规律

高岚, 王凯, 胡卓炎, 刘旭炜, 赵雷*
(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘要: 为了探究植物乳杆菌 HC1775 发酵对荔枝汁糖酸组成及抗氧化活性的影响机制, 该研究通过分析发酵过程中糖酸组分、总酚含量及抗氧化活性变化, 并对荔枝汁酶活性分析和果渣的结构表征, 阐明多酚释放的潜在机理。结果表明, 发酵 0~48 h, 荔枝汁总糖含量从 164.73 mg·mL⁻¹ 下降至 87.81 mg·mL⁻¹, 主要由蔗糖含量的变化导致, 其含量从 95.38 mg·g⁻¹ 降低至 44.98 mg·g⁻¹, 还原糖含量从 55.99 mg·mL⁻¹ 下降至 40.51 mg·mL⁻¹; 发酵产生的主要酸类物质乳酸的含量从 0.17 mg·mL⁻¹ 显著提升至 12.10 mg·mL⁻¹, 酒石酸含量从 1.62 mg·mL⁻¹ 上升至 2.05 mg·mL⁻¹, 但是, 柠檬酸含量从 2.18 mg·mL⁻¹ 下降至 0.13 mg·mL⁻¹, 抗坏血酸含量从 21.20 mg/100 g 下降至 11.71 mg/100 g。另外, 荔枝汁的总酚含量显著提升, 最高达到 293.4 mg·L⁻¹, 抗氧化活性的变化与其类似, DPPH 自由基清除率最高提高 19.64%, FRAP 值最高提升 51.11%。这主要是由于细胞壁相关酶活性提升, 破坏了纤维素的氢键和糖苷键, 促进了结合酚类物质释放, 从而提高了荔枝汁的抗氧化活性。因此, 该研究解释了发酵荔枝汁中糖酸组成变化规律和抗氧化活性变化潜在机理, 为发酵荔枝汁产品提供理论依据。

关键词: 荔枝汁; 乳酸菌发酵; 糖酸物质; 抗氧化活性; 酚类释放

文章编号: 1673-9078(2026)07-59-67 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0582

Changes in Sugar and Acid Composition and Antioxidant Activity of Litchi Juice Following Lactic Acid Bacteria Fermentation

GAO Lan, WANG Kai, HU Zhuoyan, LIU Xuwei, ZHAO Lei*

(College of Food Science and Technology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To investigate the mechanisms underlying the effects of *Lactobacillus plantarum* HC1775 fermentation on sugar and acid composition and antioxidant activity in litchi juice, this study analyzed the changes in sugar and acid composition, total phenolic content, and antioxidant activity during the fermentation process. Enzyme activity analysis of the juice and structural characterization of the pomace were also performed to elucidate the potential mechanisms of polyphenol release. During the 0~48 h fermentation period, the total sugar content of litchi juice decreased from 164.73 to 87.81 mg·mL⁻¹, which was mainly caused by changes in sucrose content, with its level decreasing from 95.38 to 44.98 mg·g⁻¹, while reducing sugar content decreased from 55.99 to 40.51 mg·mL⁻¹. The content of lactic acid, which was the main acid produced by the fermentation, increased significantly from 0.17 to 12.10 mg·mL⁻¹. Tartaric acid content increased from 1.62 to 2.05 mg·mL⁻¹, whereas citric acid content decreased from 2.18 to 0.13 mg·mL⁻¹, and ascorbic acid content decreased from 21.20 to 11.71 mg/100 g. In addition, the total phenolic content of litchi juice increased significantly, reaching

引文格式:

高岚,王凯,胡卓炎,等.基于乳酸菌发酵荔枝汁中糖酸组成及抗氧化能力的变化规律[J].现代食品科技,2026,42(7):59-67.

GAO Lan, WANG Kai, HU Zhuoyan, et al. Changes in sugar and acid composition and antioxidant activity of litchi juice following lactic acid bacteria fermentation [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 59-67.

收稿日期: 2025-04-25 ; 修回日期: 2025-07-20 ; 接受日期: 2025-07-27
基金项目: 广东省现代农业产业技术体系创新团队 (2024CXTD19); 广州市科技计划项目 (2023B01J2004); 广州市重点研发计划项目 (2024B03J1307)
作者简介: 高岚 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工, E-mail: gao2685648494@163.com
通讯作者: 赵雷 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: scauzl@scau.edu.cn

a maximum of 293.4 mg·L⁻¹. The changes in antioxidant activity followed a similar trend, with the DPPH radical scavenging rate increasing by 19.64% and the FRAP value increasing by 51.11%. This was mainly owing to elevated activities of cell wall-related enzymes, which disrupted hydrogen and glycosidic bonds in cellulose and promoted the release of bound phenolics, thereby enhancing the antioxidant activity of litchi juice. Therefore, this study explains changes in sugar and acid composition and the potential mechanisms underlying changes in antioxidant activity in fermented litchi juice, thereby providing a theoretical basis for fermented litchi juice products.

Key words: litchi juice; lactic acid bacteria fermentation; sugar and acid composition; antioxidant activity; phenolic release

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.), 无患子科, 是一种在亚热带至热带地区广泛种植的重要水果作物^[1]。荔枝因其甘甜、汁多和营养价值高的特点深受全球消费者的喜爱, 其果肉含水量高, 富含多种糖类、维生素、矿物质、膳食纤维以及调味成分, 具有抗氧化活性、降血糖活性、免疫调节活性、潜在的抗癌活性和保肝作用等健康益处, 特别是荔枝果肉中的天然多酚类物质, 展现出强大的抗氧化能力^[2,3]。

荔枝的采收和供应期集中, 时间跨度较短, 且在贮藏过程中易出现腐烂、变质和褐变等问题, 保鲜难度较大^[4]。荔枝主要被用作鲜食, 但荔枝糖分丰富, 过多食用会导致餐后血糖升高, 不符合健康饮食需求^[5]。因此, 采用合适的加工方法降低荔枝产品的糖含量是有必要的。乳酸菌常用于发酵食品生产、食品保鲜、功能食品开发等, 果蔬发酵后其酚类物质、有机酸和糖类可通过乳酸菌菌株的代谢发生变化, 不仅可以提升产品的感官、营养和功能质量, 还可以延长发酵产品的保质期^[6]。Wang 等^[7]通过乳酸菌发酵荔枝汁增强了特有的香气并产生一些新的化合物, 使其具有强烈的果香和柑橘味。而且, 发酵荔枝汁可以作为一种功能性食品, Wen 等^[8]使用干酪乳杆菌发酵荔枝汁, 在动物实验中, 发酵荔枝汁能够增强小鼠的免疫器官和增强宿主的免疫调节功能。另外, 荔枝汁经过乳酸菌发酵后, 消耗了糖类物质, 主要产生乳酸并伴随其他有机酸的变化, 增强了荔枝的营养特性并改善风味, 而且发酵荔枝汁的酚类物质含量以及抗氧化活性得到增强^[9,10]。然而, 发酵过程中糖酸物质的变化规律以及抗氧化活性增强的机理需要深入研究。

本研究以荔枝为原料, 通过植物乳杆菌发酵荔枝汁, 探究不同发酵时间的荔枝汁的营养成分的变化, 测定发酵过程中的可滴定酸度、pH 值、可溶性固形物含量、总糖含量以及还原糖含量, 并结合高效液相色谱法检测荔枝汁中果糖、葡萄糖、蔗糖的含量和有机酸含量的变化, 揭示糖酸变化规律。此外, 利用 DPPH 自由基清除率和 FRAP 值来评估发酵对荔枝汁抗氧化能力的影响, 并阐述酚类含量与抗氧化活性的关系。最后通过对发酵荔枝汁的酶活性分析和荔枝汁

果渣的结构表征, 解析多酚释放的潜在机理, 为发酵荔枝汁提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.), 品种为白糖罂, 产地广东省茂名市。植物乳杆菌, 购买于沐凡生物科技有限公司, 直投式发酵剂, 菌种号: HC1775, 泡菜中分离, 菌落总数 7.61 lg CFU/g。

试剂: 果糖、蔗糖、葡萄糖、酒石酸、苹果酸、乳酸和柠檬酸为色谱纯, 福林酚、DNS 试剂、刚果红、氢氧化钠、碳酸钠、2,2-联苯基-1-苦基肼基 (DPPH)、2,4,6-三吡啶基三嗪 (TPTZ)、乙酸锌和亚铁氰化氢为分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司; 溴化钾、乙酸乙酯、无水乙醇、抗坏血酸、2,6-二氯酚和硫酸为分析纯, 广州化学试剂厂; β -葡萄糖苷酶试剂盒、多聚半乳糖醛酸酶试剂盒和纤维素酶试剂盒, 苏州格锐思生物科技有限公司; 磷酸、乙腈为色谱纯, 美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

UVmini-1240 型紫外可见分光光度计, 日本 SHIMADZU 公司; NR60CP 型色差仪, 深圳市三恩时科技有限公司; JTM-LB50C 型胶体磨, 温州昊星机械设备制造有限公司; Vertex 70 型傅里叶变换红外光谱仪, 德国 Bruker 公司; 1260 InfinityII 型高效液相色谱仪, 安捷伦科技有限公司; STED 3X 型激光共聚焦显微镜, 德国 Leica 仪器有限公司; LHS-HC-250 型恒温恒湿培养箱, 广州市深华生物技术有限公司; PR-32- α 型数字式折射仪, 日本 Atago 公司; DELTA320x 型 pH 计, 上海精密科学仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 发酵荔枝汁

选取无损伤的荔枝, 去皮去核后使用胶体磨打浆后, 将荔枝浆用 100 目滤布过滤得荔枝汁, 将荔枝汁

杀菌 (85 °C, 15 min) 后冷却至室温, 加入植物乳杆菌 HC1775 进行发酵, 控制发酵温度 32.6 °C、接种量 0.1 g/100 g, 累计发酵 48 h, 以 12 h 为时间间隔对不同发酵时间的荔枝发酵液的成分检测。

1.3.2 发酵荔枝汁理化指标测定

1.3.2.1 pH值测定

使用 pH 计测定不同发酵时间荔枝汁的 pH 值。

1.3.2.2 可滴定酸含量测定

参考国标 (GB 12456-2021) 中的 pH 计电位滴定法, 测定不同发酵时间荔枝汁可滴定酸含量, 以柠檬酸计。

1.3.2.3 可溶性糖含量测定

参考国标 (GB 5009.8-2016) 中的高效液相色谱法测定, 可溶性糖含量以果糖、葡萄糖、蔗糖的含量总和计算。

1.3.2.4 总糖含量测定

总糖含量的测定方法采用苯酚-硫酸法^[11]。取 2 mL 稀释后的荔枝汁, 然后加入体积分数为 6% 的苯酚 1.0 mL 和浓硫酸 5.0 mL, 摇匀冷却至室温后放置 30 min 以后于 490 nm 测吸光值。取 2.0 mL 三级水按同样显色操作为空白对照, 每个样品重复三次, 以标准曲线计算。以葡萄糖为标准溶液, 葡萄糖质量浓度为横坐标绘制标准曲线, 标准曲线公式如下: $y=16.47x-0.1506$, $R^2=0.9988$ 。

1.3.2.5 还原糖含量测定

参考国标 (GB 5009.7-2016) 中水杨酸比色法测定。取 1 mL 稀释后的荔枝汁, 加入 2 mL DNS 试剂, 混合后, 沸水浴 5 min, 迅速冷却至室温, 然后加入 9 mL 的三级水进行稀释, 在 540 nm 处测吸光值, 以 1.0 mL 三级水按同样显色操作为空白对照, 每个样品重复三次, 以标准曲线计算。以葡萄糖为标准溶液, 葡萄糖质量浓度为横坐标绘制标准曲线, 标准曲线公式如下: $y=1.297x-0.0408$, $R^2=0.9987$ 。

1.3.2.6 可溶性固形物含量

可溶性固形物含量测定使用数字折光仪测定。

1.3.2.7 抗坏血酸含量测定

抗坏血酸含量的测定采用 2,6-二氯酚法测定。根据 Mu 等^[12]的方法进行并做了一些修改。将 5 g 荔枝汁与预冷的 20 mL 草酸 (20 g·L⁻¹) 避光匀浆, 浸提 10 min, 在 10 000 r·min⁻¹、4 °C 的条件下离心 10 min 后, 取上清液 10 mL, 用 2,6-二氯酚滴定至粉红色, 并保持 30 s 不褪色。结果表示为 mg/100 g。

1.3.2.8 有机酸含量测定

参考国标 (GB 5009.157-2016) 方法, 采用高效液相色谱法测定荔枝汁和发酵荔枝汁有机酸的含量。

1.3.2.9 总酚含量测定

总酚含量的测定方法采用福林-酚法^[13]。取一定量的发酵荔枝汁 10 000 r·min⁻¹, 离心 5 min, 取上清液 0.1 mL 于 10 mL 容量瓶, 先后加入三级水和福林酚各 0.5 mL 溶液摇晃均匀, 反应 5 min 立即加入 1.5 mL 的质量分数 20% Na₂CO₃ 溶液, 用三级水定容后, 25 °C 环境下避光反应 2 h。在 765 nm 下测定其吸光值, 每个样品测定 3 次平行对照。以没食子酸为标准溶液, 没食子酸质量浓度为横坐标绘制标准曲线, 标准曲线公式如下: $y=0.0011x+0.0052$, $R^2=0.9991$ 。

1.3.3 发酵荔枝汁抗氧化活性测定

1.3.3.1 DPPH自由基清除能力的测定

参考 Wang 等^[14]的方法进行部分修改: 取一定量的不同发酵时间的荔枝汁及未发酵荔枝汁 10 000 r·min⁻¹ 离心 5 min, 取 0.1 mL 上清液加入 10 mL 避光离心管中, 再加入 3.9 mL、0.1 mol·L⁻¹ 的 DPPH 溶液, 涡旋均匀, 在 25 °C 环境下避光静置 30 min, 使用体积分数 75% 乙醇调零, 在 517 nm 处测定吸光值, 每个样品测定 3 次平行对照, 计算公式如下。

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

式中:

Y ——DPPH 自由基清除率, %;

A_1 ——有 DPPH 的样品的吸光值;

A_0 ——无样品的 DPPH 的吸光值。

1.3.3.2 铁还原抗氧化能力 (FRAP) 测定

参考 Wang 等^[14]的方法进行部分修改: 将 20 mmol·L⁻¹ 的 FeCl₃·6H₂O、10 mmol·L⁻¹ 的 TPTZ 和醋酸缓冲液混合均匀 (1:1:10, V/V/V), 放置于 37 °C 水浴锅避光预热 10 min 后, 得到 FRAP 溶液备用, 现配现用。取一定量的不同发酵时间的荔枝汁及未发酵荔枝汁, 10 000 r·min⁻¹, 离心 5 min, 取 0.1 mL 上清液加入 10 mL 避光离心管中, 取 3.9 mL FRAP 溶液与上清液混匀, 避光 37 °C 下反应 30 min 后在 593 nm 处测定吸光值, 每个样品测定 3 次平行对照。将测量结果与 Trolox 标准曲线比较, 来表示其抗氧化活性 (FRAP 值)。Trolox 标准品标准曲线公式如下: $y=0.0008x+0.0117$, $R^2=0.9994$ 。

1.3.4 发酵荔枝汁酶活性测定

取一定量的不同发酵时间的荔枝汁及未发酵荔枝汁, 在 4 °C, 10 000 r·min⁻¹ 条件下离心 10 min, 取上清液使用 β -葡萄糖苷酶试剂盒、多聚半乳糖醛酸酶试剂盒和纤维素酶试剂盒测定 β -葡萄糖苷酶、多聚半乳糖醛酸酶和纤维素酶活性。

表 1 不同发酵时间荔枝汁总糖、还原糖、果糖、葡萄糖、蔗糖和可溶性固形物含量的变化

Table 1 Changes in the content of total sugar, reducing sugar, fructose, glucose, sucrose and soluble solids in litchi juice at different fermentation times

时间	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h
总糖含量/(mg·mL ⁻¹)	164.73 ± 0.28 ^a	148.20 ± 11.52 ^b	124.44 ± 4.67 ^c	102.54 ± 6.09 ^d	87.81 ± 3.13 ^e
还原糖含量/(mg·mL ⁻¹)	55.99 ± 0.89 ^b	63.62 ± 1.02 ^a	55.13 ± 1.05 ^b	46.36 ± 0.95 ^c	40.51 ± 1.20 ^d
果糖含量/(mg·g ⁻¹)	25.28 ± 0.28 ^b	28.99 ± 2.36 ^a	19.41 ± 1.94 ^c	19.66 ± 0.46 ^c	18.93 ± 1.15 ^c
葡萄糖含量/(mg·g ⁻¹)	24.37 ± 3.56 ^{ab}	26.50 ± 2.77 ^a	20.16 ± 2.69 ^b	18.50 ± 0.33 ^c	19.06 ± 0.20 ^{bc}
蔗糖含量/(mg·g ⁻¹)	95.38 ± 11.31 ^a	81.59 ± 7.75 ^b	69.63 ± 3.74 ^c	48.13 ± 0.18 ^d	28.38 ± 0.90 ^e
可溶性固形物含量/%	16.50 ± 0.10 ^a	15.90 ± 0.10 ^b	15.73 ± 0.15 ^b	15.43 ± 0.15 ^c	14.76 ± 0.06 ^d

注：同行右肩不同的小写字母表示具有显著差异（ $P<0.05$ ）。下表同。

1.3.5 发酵荔枝汁果渣红外光谱（FT-IR）分析

将 10 g 不同发酵时间的荔枝汁及未发酵荔枝汁与 20 mL 乙酸乙酯混合，然后在 4 ℃ 下在黑暗条件下超声萃取 20 min。然后离心去除上相有机相，并对残留物进行第二次乙酸乙酯提取。后将下相依此用 20 mL 无水乙醇、20 mL 丙酮、20 mL 水洗涤至游离多酚完全除去^[15]，离心后将沉淀冷冻干燥得到发酵和未发酵荔枝汁果渣。将 1 mg 的果渣与 100 mg 溴化钾充分研磨并使用压片机压片，使用 FT-IR 光谱仪在 4 000~400 cm⁻¹ 的范围内读取光谱，扫描 64 次，分辨率为 4 cm⁻¹^[16]。

1.3.6 发酵荔枝汁果渣荧光特性（CLSM）分析

将上述发酵和未发酵荔枝汁果渣用 1.0 mg·mL⁻¹ 刚果红荧光染料染色 30 min，后离心保留沉淀，将沉淀用三级水反复洗涤三次，除去多余染料。涂玻片后，使用带有 10 倍物镜的激光共聚焦显微镜观察，在 488 nm 氩激光源下，将发射波长设置为 600~700 nm，纤维素发出红色荧光，在 405 nm 氩激光源下，将发射波长设置为 440~470 nm，多酚自发荧光（绿色）^[15]。采用软件 LAS X 处理图片。

1.3.7 数据处理

实验采用完全随机设计进行，每个实验重复三次。采用 SPSS 26.0 单因素方差分析分析所有统计数据，采用 Duncan 检验（ $P<0.05$ ）确定差异显著性，结果以均值 ± 标准差（SD）表示。

2 结果与分析

2.1 荔枝汁发酵过程中糖类物质的变化

总糖含量是荔枝汁中所有可溶性糖的含量，这包括单糖、双糖和多糖，这些糖类物质是植物乳杆菌发酵的主要底物，可以通过植物乳杆菌的代谢活动被转化为乳酸等物质，荔枝果肉中的糖类成分主要由蔗糖、果

糖和葡萄糖组成^[1]。表 1 是不同发酵时间荔枝汁总糖、还原糖、果糖、葡萄糖、蔗糖和可溶性固形物含量的变化。发酵荔枝汁的总糖含量随着发酵时间的延长显著降低，从 164.73 mg·mL⁻¹ 降低到 87.81 mg·mL⁻¹；荔枝发酵液的还原糖含量随着发酵时间的延长，在 0~12 h，还原糖含量从 55.99 mg·mL⁻¹ 逐渐上升到 63.62 mg·mL⁻¹，在 12~48 h 时逐渐降低至 40.51 mg·mL⁻¹。不同发酵时间下荔枝汁中果糖、葡萄糖和蔗糖含量的变化情况如下，在发酵初期（0~12 h），发酵荔枝汁中果糖含量和葡萄糖含量均逐渐上升。具体来看，果糖含量从 25.28 mg·g⁻¹ 增加至 28.99 mg·g⁻¹，而葡萄糖含量则从 24.37 mg·g⁻¹ 上升至 26.50 mg·g⁻¹。随着发酵的继续进行（12~48 h），发酵荔枝汁中果糖含量和葡萄糖含量逐渐下降，其中果糖含量从 28.99 mg·g⁻¹ 降低到 18.93 mg·g⁻¹，葡萄糖含量从 26.50 mg·g⁻¹ 降低到 19.06 mg·g⁻¹。蔗糖含量在 0~48 h 逐渐下降，荔枝汁未发酵时的 95.38 mg·g⁻¹ 降低到 28.38 mg·g⁻¹。发酵荔枝汁的可溶性固形物含量随着发酵时间的延长逐渐下降，可溶性固形物含量从 16.50% 降低到 14.77%。

植物乳杆菌在生长繁殖的过程中利用葡萄糖和蔗糖通过糖降解途径转化为丙酮酸，并在乳酸脱氢酶的作用下被进一步还原为乳酸，此外该过程还会产生其他有机酸^[17]，在发酵的过程中，蔗糖含量的降低是总糖含量降低的主要原因。进一步分析荔枝汁发酵过程中可溶性糖的变化发现，发酵 0~12 h 时，荔枝汁果糖和葡萄糖含量增加，这可以归因于植物乳杆菌在发酵过程中产生的 β -葡萄糖苷酶、多聚半乳糖醛酸酶和纤维素酶的作用，这些酶破坏了细胞壁上的 β -1,4-糖苷键和其他糖苷键，导致细胞壁中的多糖被水解，释放出果糖和葡萄糖，进而使果糖和葡萄糖的含量增加^[15]，此外一部分的蔗糖也会被水解导致葡萄糖和果糖含量上升，而葡萄糖和果糖是荔枝中主要的还原糖，导致还原糖含量上升^[18,19]，然而在发酵 12~48 h 期间，果

糖、葡萄糖和蔗糖含量的降低主要是由于植物乳杆菌在生长和发育过程中需要摄取碳源来维持细胞的代谢和能量的消耗, 这些变化促使总糖含量和还原糖含量的降低, 在 Duan 等^[20]使用乳酸菌发酵后的枸杞汁总糖含量最高降低 34.26 g·L⁻¹、果糖含量最高降低 8.88 g·L⁻¹、葡萄糖含量最高降低 9.99 g·L⁻¹; Wang 等^[19]使用植物乳杆菌 HNU082 发酵后的仙人掌汁的还原糖含量下降了 30.77%。可溶性固形物含量是衡量荔枝汁中溶解性固体物质的一个综合性指标, 涵盖有机酸、维生素、矿物质、糖类以及部分氨基酸等多种成分, 由于荔枝汁的可溶性固形物主要是果糖、葡萄糖和蔗糖^[1], 发酵过程中通过糖酵解对这些糖类物质的持续消耗导致发酵过程中荔枝汁可溶性固形物含量逐渐降低。

2.2 荔枝汁发酵过程中酸类物质的变化

表 2 是不同发酵时间荔枝汁可滴定酸含量、pH 值、有机酸含量和糖酸比的变化。结果表明, 随着发酵时间的增加, 发酵液的可滴定酸含量逐渐上升, 在 0~48 h 内从 0.09% 升高至 1.06%; 可滴定酸含量会影响荔枝汁的 pH 值, 从而影响植物乳杆菌的生长和代谢, pH 值的变化趋势与可滴定酸含量相反, pH 值随发酵时间的增加逐渐下降, 在 0~48 h 内从 5.47 降低到 3.72。进一步分析发酵荔枝汁中主要的有机酸, 包括苹果酸、柠檬酸、酒石酸和抗坏血酸含量变化, 以及植物乳杆菌发酵主要产生的乳酸含量变化^[21]。发酵后酒石酸和乳酸含量逐渐上升, 在发酵 48 h 时, 酒石酸含量从未发酵时的 1.62 mg·mL⁻¹ 增加到 2.05 mg·mL⁻¹; 乳酸含量从 0.17 mg·mL⁻¹ 升至 12.10 mg·mL⁻¹。然而, 抗坏血酸和柠檬酸含量显著下降, 在 0~48 h 内, 柠檬酸含量从 2.18 mg·mL⁻¹ 降至 0.13 mg·mL⁻¹; 抗坏血酸

含量从 21.20 mg/100 g 显著降低至 11.71 mg/100 g。另外, 苹果酸含量在发酵初期 (0~12 h) 从 2.75 mg·mL⁻¹ 降至 0.42 mg·mL⁻¹, 在发酵 12~48 h 逐渐上升, 最终在 48 h 时达到 0.74 mg·mL⁻¹; 另外, 糖酸比在未发酵时为 155.24:1, 在发酵 48 h 时显著降低至 6.80:1。

pH 值和可滴定酸含量的变化可以监控发酵过程中微生物的活动和代谢产物的积累。随着发酵的进行, 植物乳杆菌的生长会导致乳酸不断积累, 从而使可滴定酸含量上升, 进而引起 pH 值的下降^[22]。水果中的有机酸含量对其风味有着显著影响。植物乳杆菌通过发酵分解代谢糖分, 生成有机酸, 这些有机酸在食品发酵中成为许多微生物生长的次级碳源^[23]。乳酸含量的增加是由于植物乳杆菌在发酵过程中利用蔗糖和葡萄糖, 通过糖酵解途径转化为丙酮酸, 后在乳酸脱氢酶的作用下还原为乳酸^[24]。此外, 植物乳杆菌分泌的柠檬酸裂解酶和苹果酸羧化酶也能将柠檬酸和苹果酸转化为乳酸, 苹果酸在发酵后期增加的可能原因是天冬氨酸被植物乳杆菌分解为延胡索酸, 进而还原为苹果酸^[17]。酒石酸含量的上升的可能是由于植物乳杆菌产生的酶破坏了荔枝汁中的细胞壁, 释放出细胞内的酒石酸。此外, 酒石酸的生成也有助于提升抗氧化能力^[24]。抗坏血酸是果蔬中重要的营养物质, 对人体健康具有多种生理功能, 值得注意的是, 发酵后抗坏血酸的含量逐渐降低, 这可能与发酵过程中微生物产生的抗坏血酸氧化酶活性增加, 导致抗坏血酸氧化有关, Hashemi 等^[25]在使用植物乳杆菌发酵番石榴汁后, 抗坏血酸含量也出现下降现象。这些结果表明, 植物乳杆菌发酵荔枝汁改变了有机酸的含量, 调节了糖酸比例, 有助于风味的提升和口感的变化, 这些变化揭示了发酵进程, 对优化发酵条件和确保最终产品质量具有重要意义, 符合现代消费者对低糖产品的需求。

表 2 不同发酵时间荔枝汁可滴定酸含量、pH 值、有机酸含量和糖酸比变化

Table 2 Changes in titratable acid content, pH value, organic acid content and sugar-acid ratio in litchi juice at different fermentation times

时间	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h
pH 值	5.47 ± 0.06 ^a	4.29 ± 0.02 ^b	3.98 ± 0.03 ^c	3.85 ± 0.01 ^d	3.72 ± 0.01 ^e
可滴定酸/%	0.09 ± 0.01 ^a	0.44 ± 0.01 ^a	0.75 ± 0.01 ^a	0.91 ± 0.02 ^a	1.06 ± 0.01 ^a
酒石酸含量/(mg·mL ⁻¹)	1.62 ± 0.01 ^a	1.90 ± 0.01 ^a	1.93 ± 0.06 ^a	1.97 ± 0.05 ^a	2.05 ± 0.02 ^a
乳酸含量/(mg·mL ⁻¹)	0.17 ± 0.01 ^c	6.61 ± 0.05 ^d	9.14 ± 0.20 ^c	10.75 ± 0.38 ^b	12.10 ± 0.23 ^a
柠檬酸含量/(mg·mL ⁻¹)	2.18 ± 0.01 ^a	0.61 ± 0.01 ^b	0.38 ± 0.01 ^c	0.18 ± 0.01 ^d	0.13 ± 0.01 ^e
抗坏血酸含量/(mg/100 g)	21.20 ± 0.39 ^a	14.49 ± 0.13 ^b	14.06 ± 0.27 ^c	12.56 ± 0.13 ^d	11.71 ± 0.27 ^e
苹果酸含量/(mg·mL ⁻¹)	2.75 ± 0.01 ^a	0.42 ± 0.01 ^e	0.57 ± 0.02 ^d	0.62 ± 0.01 ^c	0.74 ± 0.02 ^d
糖酸比	155.24:1 ^a	31.31:1 ^b	14.59:1 ^c	10.44:1 ^d	6.80:1 ^e

2.3 荔枝汁发酵过程中总酚含量变化

酚类化合物是植物性食品的重要成分,已被证明是荔枝发挥健康益处的特征成分。如图1所示,不同发酵时间的荔枝汁中总酚含量的变化。结果表明,发酵过程中荔枝汁的总酚含量逐渐上升,从未发酵时的 $224.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至最高点的 $294.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。结合态酚类物质主要通过酯键、醚键和氢键等紧密地结合在植物细胞壁上,因此不易释放。然而,在发酵过程中,植物乳杆菌能够分泌葡萄糖苷酶、酯酶、纤维素酶等水解酶,这些酶能有效分解植物细胞壁基质,从而释放出可溶性共轭酚类化合物及不溶性结合酚类化合物,Liu 等^[15]通过发酵处理枸杞汁 48 h 后总酚含量提升了 $140.48 \mu\text{g GAE} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

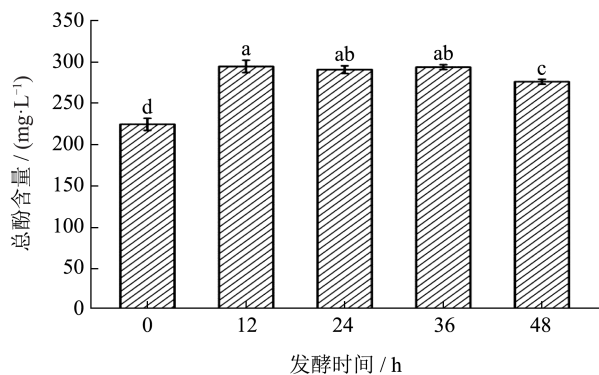


图1 不同发酵时间荔枝汁总酚含量的变化

Fig.1 Changes in total phenol content of litchi juice at different fermentation times

注:小写字母不同表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

2.4 荔枝汁发酵过程中抗氧化活性变化

酚类物质可以将氢原子或电子转移给自由基,这是具有抗氧化活性的主要原因^[19]。采用 DPPH 自由基清除率和 FRAP 值 ($\mu\text{mol Trolox} \cdot \text{L}^{-1}$) 来评估不同发酵时间荔枝汁抗氧化能力。结果如图2所示,可以看出发酵后荔枝汁的 DPPH 自由基清除率(图2a)显著提升,未发酵时 DPPH 自由基清除率为 74.48%,在发酵 24 h 时 DPPH 自由基清除率达到最高 94.12%,在未发酵的基础上提升 19.64%。未发酵时 FRAP 值(图2b)为 $26.2 \mu\text{mol Trolox} \cdot \text{L}^{-1}$,发酵后最高可达 $39.59 \mu\text{mol Trolox} \cdot \text{L}^{-1}$,显著提升 51.11%。结果表明,植物乳杆菌发酵可以使荔枝汁的抗氧化能力提升,这可能是由于发酵过程中微生物转化促进了游离酚类代谢物的积累。有研究表明,植物乳杆菌发酵的荔枝汁可以使水不溶性多糖中的一种主要特征性结合酚类物质槲皮素 3-O- 芸香糖苷在细胞壁中被释放迁移到水溶性多糖,可以把荔枝汁抗氧化活性的增强归因于微

生物生物转化促进的游离酚类代谢物的积累^[9]。另外,Kessy 等^[26]研究表明 FRAP 值与酚类化合物含量之间存在正相关。因此,后续实验深入探究导致酚类化合物含量及抗氧化活性提升的机制。

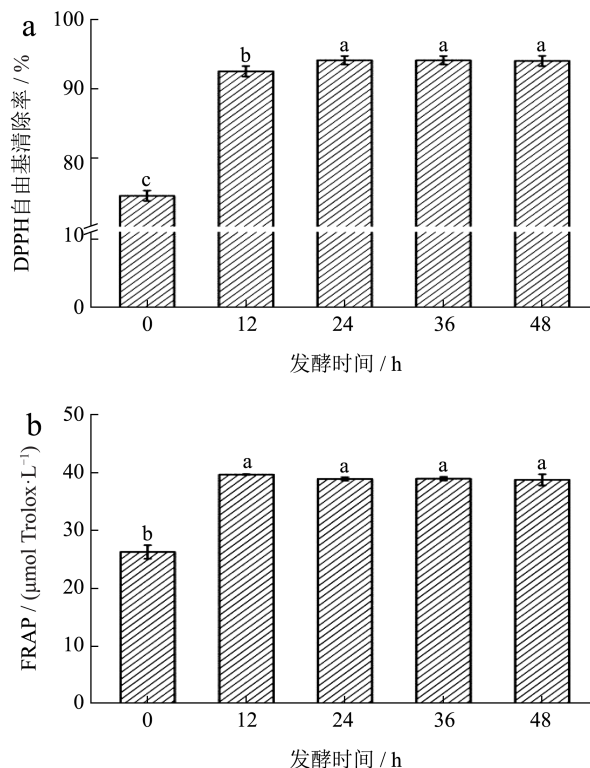


图2 不同发酵时间荔枝汁抗氧化活性的变化

Fig.2 Changes in the antioxidant activity of litchi juice at different fermentation time

注:(a) DPPH 自由基清除率;(b) FRAP 值。

2.5 荔枝汁发酵过程中酶活性变化

图3是不同发酵时间荔枝汁 β -葡萄糖苷酶、多聚半乳糖醛酸酶和纤维素酶活性的变化,可以看出三种酶活性均随着发酵时间的延长显著上升,发酵 0~12 h 时, β -葡萄糖苷酶活性(图3a)由 $0.08 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$ 提升至 $0.09 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$; 多聚半乳糖醛酸酶活性(图3b)由 $1.55 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$ 提升至 $2.07 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$; 纤维素酶活性(图3c)由 $22.48 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$ 提升至 $223.99 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。在发酵 48 h 时, β -葡萄糖苷酶活性最高提升至 $0.1 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$; 多聚半乳糖醛酸酶活性最高提升至 $2.81 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$; 纤维素酶活性最高提升至 $540.67 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。 β -葡萄糖苷酶、多聚半乳糖醛酸酶和纤维素酶是植物乳杆菌发酵过程中常见的酶分泌物,这些酶活性的提升有助于促进 β -1,4-糖苷键和 β -1,6-糖苷键的裂解,使与糖苷键连接的酚类物质得以释放,从而提高发酵产品的整体酚类含量和抗氧化活性^[26,27],同样这些酶活性的提升也会促进细

胞壁中的多糖水解,为植物乳杆菌在生长和发育过程中需要摄取碳源以供能量。酶活性的变化表明植物乳杆菌对细胞壁的降解的作用^[15]。

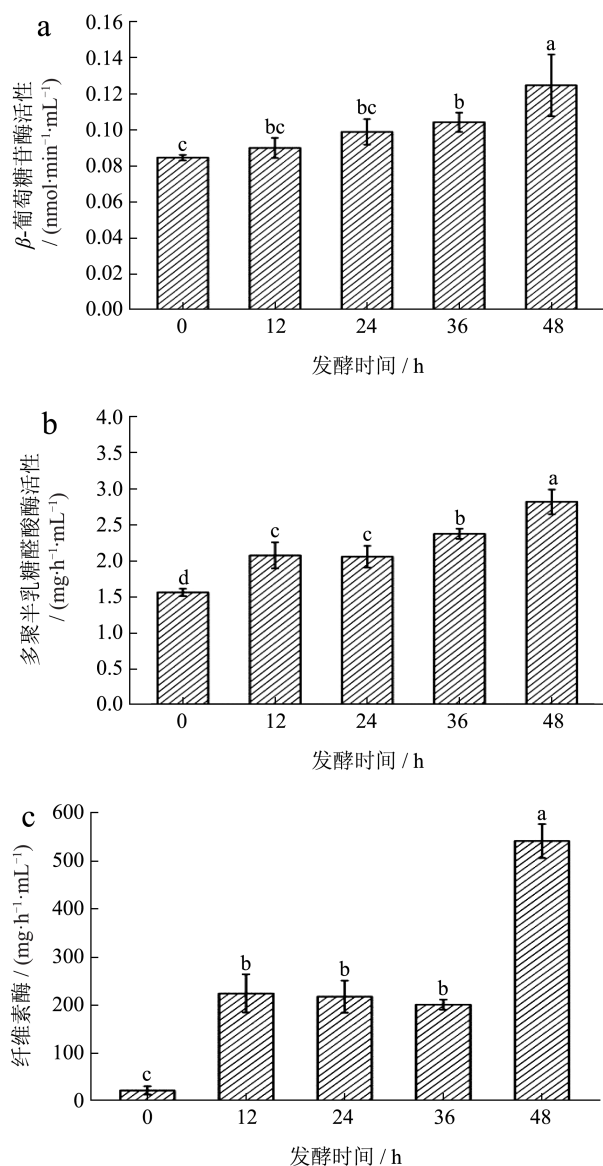


图3 不同发酵时间荔枝汁酶活的变化

Fig.3 Changes in enzyme activity of litchi juice at different fermentation times

注: (a) β -葡萄糖苷酶; (b) 多聚半乳糖醛酸酶; (c) 纤维素酶。

2.6 荔枝汁果渣傅立叶红外光谱 (FT-IR) 分析

图4是不同发酵时间荔枝汁果渣FT-IR图,所有样品在 $3\,340\text{ cm}^{-1}$ 附近均存在宽而强的峰,代表了O-H和N-H官能团的振动,是果渣中的纤维素和半纤维素的特征峰^[16];随着发酵时间的延长(0~48 h),多种化学键发生改变,其中样品中的羧基伸缩振动波峰由

$1\,645\text{ cm}^{-1}$ 蓝移到 $1\,642$ 、 $1\,640$ 、 $1\,638\text{ cm}^{-1}$ 波段;纤维素的C-H键伸展振动波峰 $1\,376\text{ cm}^{-1}$ 蓝移到 $1\,375$ 、 $1\,372$ 、 $1\,370\text{ cm}^{-1}$;酚类物质中C-O的伸展振动波峰由 $1\,249\text{ cm}^{-1}$ 蓝移到 $1\,248$ 、 $1\,246$ 、 $1\,244\text{ cm}^{-1}$; β -糖苷键的C-O-C键伸展振动波峰 910 cm^{-1} 蓝移至 890 、 887 、 883 cm^{-1} 波段。其中 $1\,645\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰的蓝移,表明发酵可能导致氢键被破坏,引起部分结合酚类物质的释放^[28];在 $1\,249\text{ cm}^{-1}$ 附近的波段蓝移可能是由于发酵后引起荔枝果渣上结合酚酸含量的减少,Kalinowska等^[29]在使用乳酸菌发酵苹果果渣后果渣的结合酚酸也有一定的减少; $1\,376\text{ cm}^{-1}$ 和 910 cm^{-1} 附近波段的蓝移可能是发酵导致纤维素的降解^[30,31]。

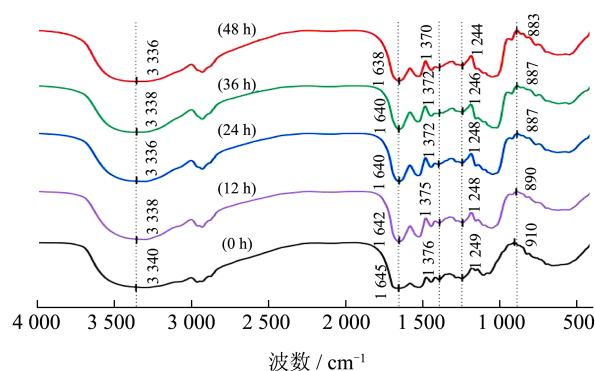


图4 不同发酵时间荔枝汁果渣 FT-IR 谱图

Fig.4 FT-IR spectra of litchi juice pomace at different fermentation times

2.7 荔枝汁果渣激光共聚焦 (CLSM) 观测

图5是不同发酵时间荔枝汁果渣荧光特性观测。多酚类物质能在特定条件下自发荧光,在 405 nm 氩激光光源下,发射波长设置在 $440\sim 470\text{ nm}$,呈现绿色荧光;在 488 nm 氩激光光源下,将发射波长设置为 $600\sim 700\text{ nm}$,经刚果红染色的纤维素部分发红光荧光^[32]。结果显示,在未发酵的荔枝果渣中,经刚果红染色的纤维素呈现大片状红色荧光,同时有绿色荧光的酚类物质附着在纤维素上。在发酵后的荔枝果渣中,经刚果红染色的纤维素红色荧光减弱红色片状物减少,且绿色荧光逐渐减弱,尤其是在发酵 36 h 和 48 h 时,红色荧光变暗,且仅观察到少数绿色荧光附着在纤维素上,这表明发酵会导致结合在纤维素上的结合酚类减少。这一现象可能是因为纤维素结构在发酵过程中被破坏,植物乳杆菌分泌的碳水化合物水解酶作用于纤维素的糖苷键,促进了纤维素基质内部相互连接结构的分解,使得纤维素结构变得更加松散,从而有助于结合在纤维素上的酚类物质的释放^[32,33]。

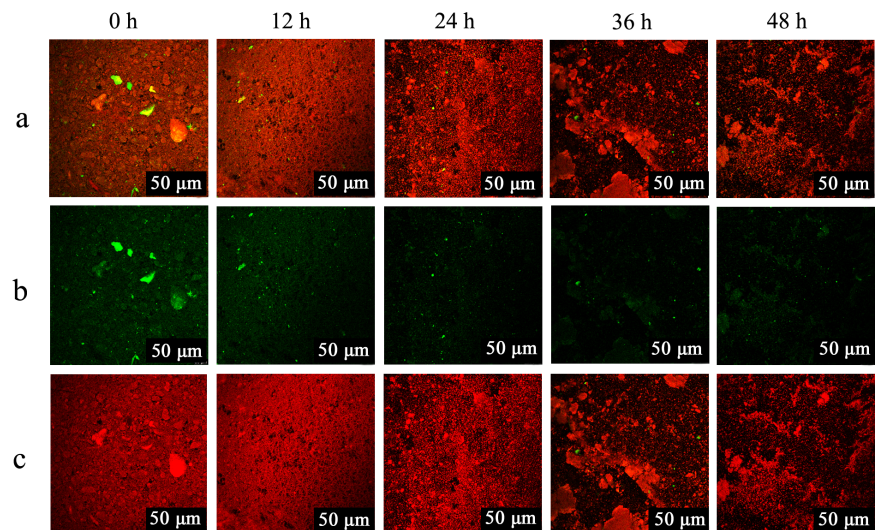


图 5 不同发酵时间荔枝果汁果渣荧光特性

Fig.5 Fluorescence characteristics of litchi juice pomace at different fermentation times

注: a 为叠加; b 为自然荧光; c 为刚果红染色。

3 结论

本研究以荔枝汁为原料，使用植物乳杆菌 HC1775 发酵荔枝汁，研究荔枝汁发酵过程中（0~48 h）糖酸组成及抗氧化活性变化规律。结果显示，荔枝汁中主要糖类物质蔗糖、葡萄糖和果糖被消耗，产生的主要酸类物质乳酸含量显著提升，增强了荔枝汁的酸感特征，糖酸比在未发酵时为 155.24:1，在发酵 48 h 时显著降低至 6.80:1，使荔枝汁的风味由甜腻向酸甜协调转变，揭示了发酵过程的糖酸变化规律。另外，在发酵过程中细胞壁相关酶活性的提升，促进了细胞壁降解，进一步通过荔枝果渣的结构分析，发酵破坏了荔枝果渣纤维素和半纤维素的分子间氢键，导致纤维素-酚类复合结构被破坏，从而促进结合酚类向游离酚类变化，使总酚含量由 224.23 mg·L⁻¹ 最高提升至 293.4 mg·L⁻¹，进而显著提高了荔枝汁的抗氧化活性，表现为 DPPH 自由基清除率和 FRAP 值的提升。该研究对荔枝汁发酵产品的开发提供了理论依据，对促进荔枝产业的加工具有重要意义。

参考文献

[1] ZHAO L, WANG K, WANG K, et al. Nutrient components, health benefits, and safety of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.): A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 2139-2163.

[2] AN K, WU J, XIAO H, et al. Effect of various drying methods on the physicochemical characterizations, antioxidant activities and hypoglycemic activities of lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) pulp polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220: 510-519.

[3] TAN S, ZHANG H, CHEN Q, et al. Physical characterization, nutrient, phenolic profiles and antioxidant activities of 16 litchi cultivars grown in the upper Yangtze River region [J]. Chemistry & Biodiversity, 2022, 19(1): e202100713.

[4] 徐晨,罗思玲,张琰,等.荔枝果实的营养成分、生物活性及其综合利用研究进展[J].果树学报,2021,38(11):1995-2005.

[5] HE T, ZHANG X, ZHAO L, et al. Insoluble dietary fiber from wheat bran retards starch digestion by reducing the activity of alpha-amylase [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136624.

[6] SZUTOWSKA J. Functional properties of lactic acid bacteria in fermented fruit and vegetable juices: a systematic literature review [J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(3): 357-372.

[7] WANG D, DENG Y, CHEN X, et al. Elucidating the effects of Lactobacillus plantarum fermentation on the aroma profiles of pasteurized litchi juice using multi-scale molecular sensory science [J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100481.

[8] WEN J, MA L, XU Y, et al. Effects of probiotic litchi juice on immunomodulatory function and gut microbiota in mice [J]. Food Research International, 2020, 137: 109433.

[9] HUANG G, ZHANG M, ZHANG S, et al. Unveiling biotransformation of free flavonoids into phenolic acids and Chromones alongside dynamic migration of bound phenolics in Lactobacillus-fermented lychee pulp [J]. Food Chemistry, 2024, 457: 140115.

[10] 周俊萍,温靖,王聪,等.益生菌发酵对荔枝汁品质及润肠通便功能的影响[J].食品工业科技,2024,45(17): 388-395.

[11] 王东伟.高产γ-氨基丁酸乳酸菌的筛选及其在荔枝汁发酵中的应用[D].广州:华南农业大学,2020.

[12] MU Y, FENG Y, WEI L, et al. Combined effects of ultrasound and aqueous chlorine dioxide treatments on nitrate content during storage and postharvest storage quality of spinach (*Spinacia oleracea* L.) [J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127500.

[13] CHEN W, XIE C, HE Q, et al. Improvement in color expression

- and antioxidant activity of strawberry juice fermented with lactic acid bacteria: A phenolic-based research [J]. Food Chemistry-X, 2023, 17: 100535.
- [14] WANG Z, FENG Y, YANG N, et al. Fermentation of kiwifruit juice from two cultivars by probiotic bacteria: Bioactive phenolics, antioxidant activities and flavor volatiles [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131455.
- [15] LIU S, HE Y, HE W, et al. Exploring the biogenic transformation mechanism of polyphenols by *Lactobacillus plantarum* NCU137 fermentation and its enhancement of antioxidant properties in wolfberry juice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(22): 12752-12761.
- [16] TIAN Y, SHENG Y, WU T, et al. Effect of modified okara insoluble dietary fibre on the quality of yoghurt [J]. Food Chemistry-X, 2024, 21: 101064.
- [17] FONSECA H C, MELO D D S, RAMOS C L, et al. *Lactiplantibacillus plantarum* CCMA 0743 and *Lacticaseibacillus paracasei* subsp. *paracasei* LBC-81 metabolism during the single and mixed fermentation of tropical fruit juices [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2021, 52(4): 2307-2317.
- [18] WU Y, LI S, TAO Y, et al. Fermentation of blueberry and blackberry juices using *Lactobacillus plantarum*, *Streptococcus thermophilus* and *Bifidobacterium bifidum*: Growth of probiotics, metabolism of phenolics, antioxidant capacity *in vitro* and sensory evaluation [J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129083.
- [19] WANG H, HE X, LI J, et al. Lactic acid bacteria fermentation improves physicochemical properties, bioactivity, and metabolic profiles of *Opuntia ficus-indica* fruit juice [J]. Food Chemistry, 2024, 453: 139649.
- [20] DUAN W, GUAN Q, ZHANG H, et al. Improving flavor, bioactivity, and changing metabolic profiles of goji juice by selected lactic acid bacteria fermentation [J]. Food Chemistry, 2023, 408: 135155.
- [21] 董晨,郑雪文,马智玲,等.九份特早熟和早熟荔枝种质资源有机酸组分及含量特征分析[J].南方农业,2023,17(9):23-27.
- [22] 杜晓仪,杨继国,罗文珊,等.植物乳杆菌发酵三华李果汁工艺优化及贮藏期内品质变化[J].现代食品科技,2024,40(3):102-112.
- [23] 邹颖,邹波,余元善,等.酵母菌乳酸菌共发酵对荔枝汁品质的影响[J].现代食品科技,2019,35(10):189-195.
- [24] JI G, LIU G, LI B, et al. Influence on the aroma substances and functional ingredients of apple juice by lactic acid bacteria fermentation [J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102337.
- [25] HASHEMI S M B, JAFARPOUR D. Lactic acid fermentation of guava juice: evaluation of nutritional and bioactive properties, enzyme (α -amylase, α -glucosidase, and angiotensin-converting enzyme) inhibition abilities, and anti-inflammatory activities [J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(12): 7638-7648.
- [26] KESSY H N E, WANG K, ZHAO L, et al. Enrichment and biotransformation of phenolic compounds from litchi pericarps with angiotensin I-converting enzyme (ACE) inhibition activity [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 87: 301-309.
- [27] RIBAS-AGUSTI A, MARTIN-BELLOSO O, SOLIVA-FORTUNY R, et al. Food processing strategies to enhance phenolic compounds bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(15): 2531-2548.
- [28] TANG L, HU M, BAI S, et al. Extraction of insoluble soybean fiber by alternating ultrasonic/alkali and its improved superior physicochemical and functional properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 263: 130505.
- [29] KALINOWSKA M, GOLEBIEWSKA E, ZAWADZKA M, et al. Sustainable extraction of bioactive compound from apple pomace through lactic acid bacteria (LAB) fermentation [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 16.
- [30] XIE J, LIU S, DONG R, et al. Bound polyphenols from insoluble dietary fiber of defatted rice bran by solid-state fermentation with *Trichoderma viride*: profile, activity, and release mechanism [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(17): 5026-5039.
- [31] 谢佳妍.绿色木霉固态发酵释放脱脂米糠不溶性膳食纤维结合多酚及其延缓秀丽隐杆线虫衰老的机制研究[D].南昌:南昌大学,2023.
- [32] YIN W, LIU M, XIE J, et al. Bound polyphenols from insoluble dietary fiber of defatted rice bran by solid-state fermentation with *Trichoderma viride*: profile, activity, and release mechanism [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(17): 5026-5039.
- [33] WANG Y, ZHANG Y, LI S, et al. Mechanism of the release and transformation of polyphenols during germination and fermentation in millets: profile and metabolomics based analysis [J]. Food & Function, 2025, 16(5): 2004-2017.