

乳杆菌发酵前后荔枝功能成分与升糖指数的变化

王骥栋^{1,2}, 董丽红², 张名位², 张瑞芬^{1,2}, 贾棚超^{1,2}, 张镇标³, 黄菲^{2*}, 杜欣军¹

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (3. 广东省农业科学院茶叶研究所, 广东省茶树资源创新利用重点实验室, 广东广州 510640)

摘要: 荔枝营养丰富且糖含量高。为探究乳杆菌发酵对荔枝功能成分与升糖指数的影响, 本研究采用植物乳植杆菌、发酵粘液乳杆菌和鼠李糖乳杆菌发酵荔枝果浆。通过跟踪活菌数、小分子糖与有机酸组成、粗多糖与总酚含量、抗氧化活性变化, 明确发酵时间并制备发酵果粉, 探究不同果粉升糖指数差异。结果表明, 发酵 0 至 96 h, 三种乳杆菌发酵果浆活菌数先增加后降低; 葡萄糖含量从 58.32 mg·g⁻¹ 分别降至 20.98、23.26 和 34.07 mg·g⁻¹, 乳酸含量从 1.86 mg·mL⁻¹ 分别上升至 17.49、10.98 和 6.77 mg·mL⁻¹; 粗多糖含量从 0.12 g/100 g 分别增加至 0.34、0.31 和 0.28 g/100 g, 总酚含量从 260.16 mg GAE·L⁻¹ 分别增加至 340.79、326.51 和 318.57 mg GAE·L⁻¹; ABTS⁺ 自由基清除能力从 2.86 mmol TEAC·L⁻¹ 分别提升至 3.28、3.11、3.09 mmol TEAC·L⁻¹。制备未发酵与三种菌发酵 72 h 果粉, 未发酵与鼠李糖乳杆菌发酵果粉预估血糖生成指数 (Expected Glycemic Index, eGI) 分别为 64.51 和 56.75, 是中 GI 食物; 植物乳植杆菌与发酵粘液乳杆菌发酵果粉 eGI 值分别为 54.12 和 53.07, 是低 GI 食物。该研究解析了不同菌种对荔枝功能成分影响, 为开发低 GI 荔枝功能制品提供理论依据。

关键词: 荔枝果浆; 乳杆菌发酵; 粗多糖含量; 糖酸组成; 低血糖生成指数

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.5.0432

Changes in Functional Ingredients and Glycemic Index of Litchi before and after *Lactobacillus* Fermentation

WANG Jidongtian^{1,2}, DONG Lihong², ZHANG Mingwei², ZHANG Ruifen^{1,2}, JIA Xuchao^{1,2}, ZHANG Zhenbiao³, HUANG Fei^{2*}, DU Xinjun¹

(1.College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

(2.Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory Processing, Guangzhou 510610, China)

(3.Tea Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Guangdong Provincial Key Laboratory of Tea Plant Resources Innovation & Utilization, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Litchi was rich in nutrients and high in sugar. To investigate the effects of *Lactobacillus* fermentation on the functional ingredients and glycemic index of litchi, this study employed *Lactiplantibacillus plantarum* subsp. *plantarum*, *Limosilactobacillus fermentum*, and *Lactobacillus rhamnosus* to ferment litchi pulp. By tracking changes in the viable counts, composition of small-molecule sugars and organic acids, crude polysaccharide and total phenolic contents, and antioxidant activity, the optimal fermentation time was determined; and fermented powder was then prepared to investigate differences in the glycemic index among various powders. The results indicated that, from 0 to 96 h of fermentation, the viable contents of pulp fermented by three *Lactobacillus* strains increased early and then decreased; the glucose contents decreased from 58.32 mg·g⁻¹ to 20.98, 23.26, and 34.07 mg·g⁻¹, while lactic acid contents increased from 1.86 mg·mL⁻¹ to 17.49, 10.98, and 6.77 mg·mL⁻¹, respectively; the crude polysaccharide contents increased from 0.12 g/100 g to 0.34, 0.31, and 0.28 g/100 g, while total phenolic contents increased from 260.16 mg GAE·L⁻¹ to 340.79, 326.51, and 318.57 mg GAE·L⁻¹, respectively; ABTS⁺ radical scavenging capacity increased from 2.86 mmol TEAC·L⁻¹ to 3.28, 3.11, 3.09 mmol TEAC·L⁻¹, respectively. Unfermented and fermented powders by three types of strains for 72 h were prepared. The values of expected glycemic index (eGI) of unfermented and fermented powders by *L. rhamnosus* were

收稿日期: 2026-03-20; 修回日期: 2026-05-19; 接受日期: 2026-05-20

基金项目: 广东省农业科学院杰出青年基金 (XT202506); 广东省重点研发计划项目 (2025B0202110004); “广东 TZ 计划” 青年拔尖人才项目 (NYQN2025013)

作者简介: 王骥栋 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能食品, E-mail: 3212355760@qq.com

通讯作者: 黄菲 (1987-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 功能食品, E-mail: hf1311@163.com

64.51 and 56.75, respectively, classified as medium-GI food; while eGI values of fermented powder by *L. plantarum* and *L. fermentum* were 54.12 and 53.07, respectively, classified as low-GI food. This study analyzed the effects of different *Lactobacillus* strains on the functional ingredients of litchi, providing a theoretical basis for the development of low-GI functional litchi products.

Key words: litchi pulp; *Lactobacillus* fermentation; crude polysaccharide content; sugar and acid composition; low glycemic index

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 在我国亚热带地区被广泛种植, 其果肉风味鲜美, 深受消费者喜爱, 被誉为“岭南果王”^[1]。现代营养研究表明, 荔枝富含多糖、多酚等活性成分, 具有抗肿瘤、免疫调节等健康功效^[2]。荔枝的糖含量较高, 导致其具有较高 GI 值, 在一定程度上限制了高血糖、高血脂等亚健康人群的食用^[3,4]。发酵技术能够将荔枝中可利用糖转化为乳酸等有益物质, 可制备富含功能成分的荔枝产品^[5]。乳酸菌是发酵食品中的天然益生菌, 具有抗肿瘤、降糖和抗氧化等特性^[6]。因其具备耐酸、产酸等能力, 已被用于果汁等食品发酵^[7]。有研究报道, 乳酸菌发酵通过消耗果蔬原料中葡萄糖、果糖等可快速吸收糖, 生成的乳酸、乙酸等有机酸能够抑制消化道中 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶活性, 减缓食物消化速率, 延缓葡萄糖释放与吸收^[8]。所以, 乳酸菌发酵逐渐成为降低食品 GI 值的有效手段, 例如将乳酸菌应用于酸面团发酵可以降低谷物类面包的 GI 值^[9]。然而, 目前针对乳酸菌发酵对荔枝主要功能成分的影响研究仍较为有限, 缺乏对发酵过程中各指标变化规律与不同菌种作用影响的系统阐述, 同时对于利用乳酸菌发酵制备低 GI 荔枝功能制品的研究仍未见报道。

植物乳植杆菌、发酵粘液乳杆菌和鼠李糖乳杆菌均是被广泛应用在食品发酵领域的益生菌, 具有较强的碳水化合物代谢能力, 可改变食物风味并提升营养价值^[10]; 且发酵产物以乳酸、乙酸等有机酸为主, 有助于抑制杂菌的生长^[11]。此外, 三种菌株均已被列入我国《可用于食品的菌种名单》, 应用于食品发酵研究较为适合。因此, 本研究以荔枝果浆为原料, 选用植物乳植杆菌、发酵粘液乳杆菌和鼠李糖乳杆菌进行发酵, 并探究发酵过程中活菌数、小分子糖、有机酸、多糖和多酚以及抗氧化活性的变化规律。在此基础上测定其 eGI 值, 筛选最佳发酵时间制备不同果浆冻干粉, 对比发酵前后冻干粉 eGI 值差异并明确制备最低 eGI 值冻干粉的工艺参数, 为兼具低 GI 值和较高功能活性的荔枝制品的开发提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料与试剂

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.), 产地广东省广州市, 品种为怀枝。菌种: 植物乳植杆菌 GDMCC 1.380 (*Lactiplantibacillus plantarum* subsp. *plantarum*)、发酵粘液乳杆菌 GDMCC 1.1796 (*Limosilactobacillus fermentum*)、鼠李糖乳杆菌 GDMCC 1.2223 (*Lacticaseibacillus rhamnosus*), 均购自广东省微生物菌种保藏中心。白面包, 购自成都市桃李食品有限公司。

各单糖、双糖标准品 (葡萄糖、果糖, 蔗糖), 各有机酸标准品 (酒石酸、苹果酸、乳酸、柠檬酸), 没食子酸标准品, 碱性蛋白酶 (200 U mg^{-1})、糖化酶 (10^6 U g^{-1}), 猪胆盐购自上海源叶生物科技有限公司; α -淀粉酶 ($\geq 5 \text{ units} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ solid}$)、胃蛋白酶 ($\geq 400 \text{ units} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ protein}$)、脂肪酶 ($30 \sim 90 \text{ units mg}^{-1} \text{ protein}$), 购自 Sigma-Aldrich 公司; ABTS 试剂盒、FRAP 试剂盒, 购自南京建成生物工程研究所有限公司; MRS 肉汤培养基, 购自广东环凯生物科技有限公司; 色谱级甲醇, 购自美国 Thermo Fisher 公司; 其他试剂均为分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

BS124S 电子分析天平, 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司; HHWS-II-250 恒温恒湿培养箱, 上海跃进医疗器械有限公司; Sorvall BIOFUGE Stratos 高速冷冻离心机, 美国 Thermo Fisher 公司; EYELA FDU-2110 冷冻干燥机, 东京理化器械株式会社; LC-2030 Plus 高效液相色谱仪, 岛津 (Shimadzu) 公司; CIC-D200E 离子色谱仪, 青岛盛瀚色谱技术有限公司; BioTek Gen5 酶标仪, 美国 BioTek 公司; T25 digital 分散机, 德国 IKA 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发酵荔枝果浆及其冻干粉的制备

选择无损伤鲜果,剥皮去核后,使用预先灭菌的高速分散机对其进行打浆(5 min, 8 000 r·min⁻¹),之后转移至无菌发酵罐中(各 500 mL),进行巴氏杀菌(72 °C, 30 min)后冷却至室温,在无菌环境中按照 2% (V/V) 分别接种处于生长对数期的植物乳植杆菌、发酵粘液乳杆菌、鼠李糖乳杆菌(OD₆₀₀ 值分别为 0.723、0.726、0.720),连同未接种的荔枝鲜果浆置于培养箱中控制温度 37 °C,分别命名为 P-Lp(植物乳植杆菌发酵荔枝果浆)、F-Lp(发酵粘液乳杆菌发酵荔枝果浆)、R-Lp(鼠李糖乳杆菌发酵荔枝果浆)和 UF-Lp(未发酵荔枝果浆),分别于 6、12、24、48、72、96 h 时间点收集发酵样液以及未发酵的鲜果浆(各 50 mL),并测定不同发酵时间的荔枝鲜果浆的主要成分。

最后选择三种乳杆菌分别发酵 72 h 的荔枝果浆以及未发酵的鲜果浆,利用旋转蒸发仪在 45 r·min⁻¹、30 °C 条件下浓缩至原体积的 1/5,进行真空冷冻干燥,获得不同的荔枝果粉,分别命名为 p-Lp72(植物乳植杆菌发酵 72 h 荔枝果粉)、f-Lp72(发酵粘液乳杆菌发酵 72 h 荔枝果粉)、r-Lp72(鼠李糖乳杆菌发酵 72 h 荔枝果粉)和 uf-Lp0(未发酵荔枝果粉)。

1.3.2 发酵荔枝果浆细菌总数的测定

参考 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》中的“平板计数法”,测定发酵荔枝果浆中菌落总数,选取菌落数在 30 至 300 CFU 范围内的平板进行计数。

1.3.3 发酵荔枝果浆粗多糖含量的测定

参考 SN/T 4260—2015《出口植物源食品中粗多糖的测定 苯酚-硫酸法》中的“苯酚-硫酸法”进行样液制备与测定。准确移取 5 mL 发酵荔枝果浆,缓慢加入 20 mL 无水乙醇,涡旋摇匀后超声提取 30 min,再于 8 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,弃去上清液。沉淀用 10 mL 80% (V/V) 乙醇洗涤、离心后加入 50 mL 水,于 120 W 超声提取 30 min,重复 2 次。冷却至室温后将上清液连同残渣洗涤液一并转移至容量瓶中,加水定容后即作为样品待测液。参考本实验室现有方法^[12],于 490 nm 测定样液吸光度。以葡萄糖标准品质量浓度为横坐标建立标准曲线($y=8.591x+0.0595$, $R^2=0.9998$),蒸馏水作为空白对照。

1.3.4 发酵荔枝果浆总酚含量的测定

将发酵荔枝果浆在 4 000 r·min⁻¹ 条件下离心 5 min,移取上清液置于 4 °C 冰箱,备用。参照 Chen 等^[13]的“福林-酚法”进行部分修改,准确移取 125 μ L 适当稀释后样品,依次加入 0.5 mL 水、125 μ L 福林酚,暗处反应 6 min 后加入 1.25 mL 7.0 wt.% Na₂CO₃ 溶液,再次暗处反应 90 min,于 760 nm 测定样液吸光度。以没食子酸标准品质量浓度为横坐标建立标准曲线($y=0.0021x+0.0635$, $R^2=0.9997$),蒸馏水作为空白对照。

1.3.5 发酵荔枝果浆小分子糖含量的测定

参考 GB 5009.8—2023《食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》中的“离子色谱法”,测定发酵荔枝果浆小分子糖含量。离子色谱条件:色谱柱 SH-CAC-20(200 mm×4.0 mm)、SH-GP-20(50 mm×4.0 mm);流动相 A:去离子水、B:500 mmol/L NaOH+100 mmol/L 乙酸钠;流速:0.3 mL/min;柱温:20 °C;自动进样:20 μ L;检测方式:脉冲安培。

1.3.6 发酵荔枝果浆有机酸含量的测定

参考 GB 5009.157—2016《食品安全国家标准 食品中有机酸的测定》中的“高效液相色谱法”,测定发酵荔枝果浆有机酸含量。液相色谱条件:色谱柱 C18(250 mm×4.6 mm, 5 μ m);流动相 A:0.1% (V/V) 磷酸、B:甲醇;流速:1.0 mL/min;柱温:40 °C;自动进样:20 μ L;检测方式:UV 210 nm。

1.3.7 发酵荔枝果浆抗氧化活性的测定

准确移取 5 mL 发酵荔枝果浆于 8 000 r·min⁻¹ 离心 5 min 后,使用总抗氧化能力(T-AOC)检测试剂盒(ABTS、FRAP)分别测定发酵荔枝果浆 ABTS⁺自由基清除能力、铁离子还原抗氧化能力。测定结果分别以每升发酵液中所含 Trolox 当量抗氧化能力(Trolox Equivalent Antioxidant Capacity; mmol TEAC·L⁻¹)、每升发酵液中所含 FeSO₄·7H₂O 当量抗氧化能力(FeSO₄·7H₂O Equivalent Antioxidant Capacity; mmol FeEAC·L⁻¹)表示。Trolox、FeSO₄·7H₂O 标准品标准曲线分别为: $y=-1.499x+1.7135$, $R^2=0.9997$; $y=0.3323x+0.0039$, $R^2=0.9997$,蒸馏水作为空白对照。

1.3.8 血糖生成指数的测定

为较准确测定不同乳杆菌发酵前后荔枝果浆预估血糖生成指数,根据较低的可利用糖含量与较高的功能成分含量,筛选最佳发酵时间制备不同的荔枝果浆冻干粉。综合上述指标变化情况,选用未发酵和发酵 72 h 的荔枝果

浆制备冻干粉,对比未发酵和不同乳杆菌发酵果粉的血糖生成指数。

1.3.8.1 体外消化模拟试验

参考嵇海华^[14]的方法并做出部分修改,配制各消化阶段电解质溶液(模拟唾液、胃液、肠液均为无酶的无机盐缓冲液),依次对未发酵和发酵荔枝果浆的冻干粉以及参考食品(白面包)进行口腔、胃和小肠消化模拟。

白面包预处理:剖去面包表皮(结构致密、消化速率慢),仅保留面包内部柔软部分,并将其研磨成粉,过100目筛(约150 μm),确保颗粒均匀性^[15]。若筛上残留物超过25%,需重新研磨至过筛率≥75%,合并筛上筛下物混合均匀,备用。

口腔阶段:准确称取0.20 g未发酵和发酵荔枝果浆的冻干粉以及白面包粉于锥形瓶中,加入5 mL 37 °C预热的模拟唾液(pH值7.0)、25 μL 0.3 mol·L⁻¹ CaCl₂·2H₂O溶液摇匀后,使用1 mol·L⁻¹盐酸或氢氧化钠调节体系pH值至7.0,再加入0.5 mL α-淀粉酶溶液(1 500 U·mL⁻¹)并添加无菌水使得终体积为10 mL。将锥形瓶迅速转移至37 °C恒温摇床中,避光孵育5 min。

胃阶段:模拟口腔消化结束后,立即加入8 mL 37 °C预热的模拟胃液(pH值3.0)和5 μL 0.3 mol·L⁻¹ CaCl₂·2H₂O溶液摇匀后,使用1 mol·L⁻¹盐酸调节体系pH值至3.0,再加入0.5 mL胃消化酶溶液(胃蛋白酶8 000 U·mL⁻¹、胃脂肪酶1 000 U·mL⁻¹)并添加无菌水使得终体积为20 mL。将锥形瓶迅速转移至37 °C恒温摇床中,避光孵育2 h。

小肠阶段:模拟胃消化结束后,立即加入8.5 mL 37 °C预热的模拟肠液(pH值7.0)、40 μL 0.3 mol·L⁻¹ CaCl₂·2H₂O溶液摇匀后,使用1 mol·L⁻¹氢氧化钠调节体系pH值至7.0,再加入2.5 mL猪胆盐(3.84 mg·mL⁻¹,模拟肠液配制)、5 mL胰酶溶液(胰蛋白酶1 000 U·mL⁻¹)、48 mg糖化酶(10⁶ U·g⁻¹),并添加无菌水使得终体积为40 mL。将锥形瓶迅速转移至37 °C恒温摇床中,避光孵育3 h。

1.3.8.2 模拟小肠阶段消化液的还原糖含量的测定

参考段惠敏等^[16]的方法并做出部分调整,分别于模拟小肠阶段消化0、10、20、30、60、90、120、180 min时取500 μL消化液,立即加入2 mL无水乙醇终止反应,沸水浴5 min灭酶后4 500 r·min⁻¹离心5 min后获得上清液为样液。还原糖含量采用3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定,准确移取1 mL样液,加入0.75 mL DNS试剂,涡旋振荡均匀,沸水浴加热5 min后,迅速转移至冰水浴中冷却至室温,再加入10.75 mL蒸馏水,涡旋振荡均匀,于540 nm测定样液吸光度。以葡萄糖标准品质量浓度为横坐标建立标准曲线($y=0.4495x+0.0379$, $R^2=0.9996$),蒸馏水作为空白对照,依据标准曲线计算获得相应的还原糖含量,每组设定3次技术重复。

1.3.8.3 预估血糖生成指数的计算

使用样液中还原糖含量(酶解过程中葡萄糖释放量)计算样品与参考食品(ref-F)的可利用糖释放率,绘制出可利用糖释放率和时间关系图并利用“线性梯形法”计算出曲线下覆盖总面积(Area Under Curve, AUC),再根据下列公式计算出样品的水解指数(Hydrolysis Index, HI)^[17]。

$$HI = \frac{AUC_s}{AUC_r} \times 100 \quad (1)$$

式中:

HI——水解指数, %;

AUC_s ——样品曲线下覆盖总面积, min mg mL⁻¹;

AUC_r ——参考食品(白面包)曲线下覆盖总面积, min mg mL⁻¹。

最后按照下列公式计算出预估血糖生成指数(Estimate Glycemic Index, eGI)^[18]。

$$eGI = 39.71 + 0.549 \times HI \quad (2)$$

式中:

eGI——预估血糖生成指数;

HI——水解指数, %。

1.3.9 数据统计与分析

每组样本重复测定三次,结果以“平均值±标准差(SD)”表示。使用SPSS 26.0软件对所有统计数据进行单因素方差分析,Origin 2024b软件绘制图表。

2 结果与讨论

2.1 不同乳杆菌发酵对荔枝果浆主要成分与抗氧化活性变化的影响

2.1.1 不同乳杆菌发酵对荔枝果浆的活菌数变化的影响

发酵过程中的活菌数不仅直接决定了发酵的速度,而且能够一定程度地反映微生物代谢产物积累的动态变化。图 1 是不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆的活菌数变化。三种乳杆菌在发酵 6 h 前已进入生长对数期,增殖与代谢活力显著提升。发酵 12 h 后, *L. plantarum* 活菌数显著高于 *L. rhamnosus* ($P<0.05$)。不同菌种因其发酵性能的差异,导致在发酵过程中细菌总数也表现出较大差异^[19]。随着微生物对果浆的可利用碳水化合物消耗, *L. plantarum*、*L. fermentum*、*L. rhamnosus* 活菌数在发酵 24 h 后达到峰值,分别为 5.25×10^8 、 4.98×10^8 、 4.70×10^8 CFU/mL。此时果浆的细菌总数进入稳定期,乳杆菌主要产生的酸性代谢物的积累将会逐渐抑制包括其自身在内的微生物活动,从而导致活菌数量逐渐减少,这也标志着发酵主体阶段的完成^[20]。在发酵 96 h 后,三种乳杆菌的细菌总数相较于 72 h 时显著降低 ($P<0.05$),可能由于发酵体系中存在大量酸性代谢物等成分所导致。

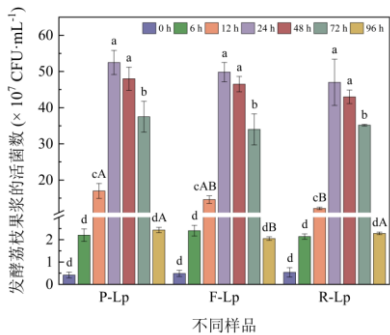


图 1 不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆的活菌数变化

Fig.1 Changes in viable counts in litchi pulps fermented by different *Lactobacillus* strains at different fermentation times

注: 不同小写字母表示不同发酵时间点同一乳杆菌果浆的活菌数差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示同一发酵时间点不同乳杆菌果浆的活菌数差异显著 ($P<0.05$), 其他未标注 (大写字母) 时间点表示同一发酵时间点不同乳杆菌果浆的活菌数无显著性差异。

2.1.2 不同乳杆菌发酵对荔枝果浆的小分子糖种类和含量变化的影响

表 1 不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆的葡萄糖、果糖和蔗糖含量变化

Table 1 Changes in contents of glucose, fructose, and sucrose in litchi pulps fermented by different <i>Lactobacillus</i> strains at different fermentation times				
fermentation times				
组别	葡萄糖/(mg·g ⁻¹)	果糖/(mg·g ⁻¹)	蔗糖/(mg·g ⁻¹)	
UF-Lp	0 h	58.32 ±1.29 ^a	133.92 ±2.15 ^a	31.94 ±1.16 ^{ab}
	6 h	58.83 ±0.60 ^{aA}	134.35 ±1.89 ^{aA}	33.74 ±0.63 ^{abA}
	12 h	52.74 ±0.40 ^{cA}	129.75 ±1.37 ^{abA}	39.26 ±0.79 ^{abA}
	24 h	54.54 ±0.25 ^{bA}	112.83 ±6.28 ^{bcA}	31.18 ±7.06 ^{bA}
	48 h	54.40 ±0.40 ^{bA}	108.97 ±10.95 ^{cA}	38.08 ±9.07 ^{abA}
	72 h	50.90 ±0.25 ^{dA}	101.01 ±11.33 ^{cA}	38.22 ±4.53 ^{ab}
	96 h	51.06 ±0.04 ^{dA}	103.23 ±8.74 ^{cA}	44.01 ±2.96 ^a
P-Lp	6 h	34.70 ±3.22 ^{aB}	78.43 ±9.30 ^{aB}	18.79 ±1.73 ^{aC}
	12 h	29.63 ±3.14 ^{abB}	40.65 ±5.55 ^{bB}	10.42 ±1.25 ^{bC}
	24 h	30.24 ±2.98 ^{abC}	22.15 ±3.15 ^{cB}	4.26 ±0.41 ^{cB}
	48 h	26.74 ±1.93 ^{bc}	20.03 ±1.01 ^{cB}	1.45 ±0.13 ^{dB}
	72 h	20.45 ±1.38 ^{cC}	17.65 ±0.74 ^{cBC}	ND
	96 h	20.98 ±1.29 ^{cC}	18.05 ±0.70 ^{cBC}	ND
F-Lp	6 h	34.79 ±1.37 ^{aB}	58.78 ±3.08 ^{aC}	25.11 ±1.28 ^{aB}
	12 h	30.05 ±1.40 ^{bB}	20.13 ±1.46 ^{bc}	23.74 ±1.39 ^{aB}
	24 h	30.66 ±1.48 ^{bc}	20.86 ±1.56 ^{bb}	7.86 ±0.43 ^{bb}

-----	R-Lp	48 h	23.96±1.65 ^{cC}	17.90±0.46 ^{bB}	ND
		72 h	22.85±0.95 ^{cC}	9.40±0.51 ^{cC}	ND
		96 h	23.26±0.94 ^{cC}	8.08±0.34 ^{cC}	ND
		6 h	36.57±0.68 ^{bB}	84.67±3.43 ^{aB}	28.56±4.21 ^{aAB}
		12 h	31.56±0.62 ^{bB}	43.63±1.20 ^{bB}	25.84±0.70 ^{aB}
		24 h	48.26±2.71 ^{aB}	24.01±3.37 ^{cB}	10.29±0.64 ^{bB}
		48 h	43.07±3.10 ^{aB}	23.75±3.10 ^{cB}	9.39±0.70 ^{bB}
		72 h	34.28±3.20 ^{bB}	19.79±0.92 ^{cB}	ND
		96 h	34.07±3.21 ^{bB}	19.44±1.59 ^{cB}	ND

注：不同小写字母表示不同发酵时间点同一乳杆菌果浆的小分子糖含量差异显著（ $P<0.05$ ），不同大写字母表示同一发酵时间点不同乳杆菌果浆的小分子糖含量差异显著（ $P<0.05$ ）；ND，未检出，表示该物质含量低于检测方法的检出限。

荔枝果浆中葡萄糖、果糖、蔗糖是其主要的可溶性小分子糖^[21]，作为微生物利用的首要碳源。发酵初期果浆的果糖和葡萄糖浓度也决定了菌种能否快速增殖代谢。不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆中葡萄糖、果糖、蔗糖含量差异显著（表 1）。首先，不同乳杆菌发酵荔枝果浆三种可发酵糖含量相较于 UF-Lp 均显著降低（ $P<0.05$ ）。值得注意的是，P-Lp、R-Lp 葡萄糖含量均在发酵 48 至 72 h 过程中降幅显著，F-Lp 葡萄糖含量则在发酵 24 至 48 h 阶段显著降低（ $P<0.05$ ）。然而，R-Lp 葡萄糖含量在发酵 12 至 24 h 阶段显著增加（ $P<0.05$ ）。另外，三种乳杆菌发酵果浆的果糖含量均在发酵 6 至 12 h 过程中显著降低（ $P<0.05$ ），P-Lp、R-Lp 果糖含量在发酵 24 h 后降幅较小且相同组别的果糖含量在 24 至 96 h 无显著性差异，而 F-Lp 果糖含量在发酵 24 h 后逐渐降低且在 48 至 72 h 之间降幅最大。此外，F-Lp 蔗糖在发酵 48 h 后几乎全部被菌群消耗利用，P-Lp、R-Lp 蔗糖均在发酵 72 h 后被消耗完全（未检出）。

果浆中可发酵糖作为乳杆菌发酵主要底物，其含量变化能够反映乳杆菌生长与代谢活力。发酵 12 至 24 h 阶段，三种乳杆菌发酵果浆中果糖、蔗糖含量降幅显著，这可能是导致其细菌总数增幅显著且达到峰值的直接原因。此外，R-Lp 葡萄糖含量在发酵 12 至 24 h 阶段显著增加的原因，可能是发酵过程中，*L. rhamnosus* 分泌的胞外纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶等催化裂解了细胞壁上 β -1, 4-糖苷键，导致细胞壁多糖被水解释放，进而被水解成葡萄糖，使葡萄糖的含量增加^[22]。最后，在发酵 72 至 96 h 阶段，由于酸性产物的累积，乳杆菌进入生长衰退期且菌群代谢缓慢甚至停滞，发酵果浆中的糖含量也基本稳定。

2.1.3 不同乳杆菌发酵对荔枝果浆的有机酸种类和含量变化的影响

表 2 不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆的酒石酸、苹果酸、乳酸和柠檬酸含量变化

Table 2 Changes in contents of tartaric acid, malic acid, lactic acid, and citric acid in litchi pulps fermented by different *Lactobacillus* strains at different fermentation times

组别		酒石酸/(mg·mL ⁻¹)	苹果酸/(mg·mL ⁻¹)	乳酸/(mg·mL ⁻¹)	柠檬酸/(mg·mL ⁻¹)
UF-Lp	0 h	1.13±0.09 ^a	6.46±0.52 ^a	1.86±0.16 ^e	0.38±0.05 ^a
	6 h	1.04±0.02 ^b	5.61±0.02 ^{bA}	2.13±0.04 ^{dC}	0.31±0.02 ^{abcB}
	12 h	1.03±0.00 ^{bC}	5.55±0.06 ^{bcA}	2.17±0.04 ^{dD}	0.33±0.03 ^{abcB}
	24 h	1.04±0.01 ^{bB}	5.50±0.07 ^{bcA}	2.25±0.03 ^{dD}	0.35±0.04 ^{abB}
	48 h	1.03±0.01 ^{bC}	5.28±0.11 ^{bcdA}	2.52±0.03 ^{cD}	0.32±0.01 ^{abcB}
	72 h	1.02±0.01 ^{bC}	5.15±0.08 ^{cdA}	2.75±0.06 ^{bD}	0.29±0.02 ^{bcB}
	96 h	1.02±0.00 ^{bB}	5.04±0.09 ^{dA}	2.95±0.04 ^{aD}	0.26±0.06 ^{cB}
P-Lp	6 h	1.12±0.08	1.54±0.35 ^{aB}	9.40±1.19 ^{dA}	0.12±0.01 ^{eC}
	12 h	1.15±0.06 ^{AB}	1.31±0.27 ^{abC}	12.52±0.41 ^{cA}	0.13±0.02 ^{deC}
	24 h	1.13±0.04 ^A	1.09±0.14 ^{abC}	14.24±0.88 ^{bA}	0.15±0.01 ^{cdC}
	48 h	1.13±0.04 ^B	0.95±0.07 ^{bcC}	16.77±0.02 ^{aA}	0.16±0.00 ^{bcC}
	72 h	1.17±0.04 ^{AB}	1.08±0.22 ^{abC}	17.93±0.95 ^{aA}	0.19±0.01 ^{aC}
	96 h	1.14±0.05 ^A	0.87±0.13 ^{bcC}	17.49±0.13 ^{aA}	0.17±0.00 ^{abC}
F-Lp	6 h	1.16±0.06 ^b	1.82±0.05 ^{aB}	4.90±0.12 ^{dB}	0.52±0.03 ^{cA}

	12 h	1.23±0.05 ^{abA}	1.71±0.05 ^{abB}	6.08±0.16 ^{cB}	0.52±0.02 ^{cA}
	24 h	1.21±0.04 ^{baA}	1.68±0.04 ^{abB}	6.46±0.17 ^{cB}	0.53±0.00 ^{bcA}
	48 h	1.30±0.04 ^{aaA}	1.54±0.04 ^{bcB}	8.21±0.22 ^{bB}	0.56±0.03 ^{abA}
	72 h	1.24±0.02 ^{abA}	1.39±0.06 ^{cdB}	10.87±0.21 ^{aB}	0.61±0.02 ^{aaA}
	96 h	1.20±0.02 ^{baA}	1.37±0.15 ^{dB}	10.98±0.75 ^{aB}	0.60±0.02 ^{aaA}
R-Lp	6 h	1.12±0.04	1.83±0.03 ^{aB}	3.18±0.05 ^{cC}	0.14±0.01 ^{dC}
	12 h	1.12±0.03 ^{BC}	1.70±0.03 ^{abB}	3.88±0.08 ^{cC}	0.15±0.01 ^{cdC}
	24 h	1.15±0.04 ^A	1.65±0.02 ^{abB}	4.59±0.20 ^{dC}	0.16±0.01 ^{cC}
	48 h	1.12±0.04 ^B	1.57±0.09 ^{bcB}	5.74±0.10 ^{cC}	0.19±0.01 ^{bc}
	72 h	1.14±0.03 ^B	1.45±0.09 ^{cdB}	6.26±0.07 ^{bc}	0.23±0.01 ^{aC}
	96 h	1.15±0.03 ^A	1.35±0.16 ^{dB}	6.77±0.06 ^{aC}	0.24±0.00 ^{ab}

注：不同小写字母表示不同发酵时间点同一乳杆菌果浆的有机酸含量差异显著（ $P<0.05$ ），不同大写字母表示同一发酵时间点不同乳杆菌果浆的有机酸含量差异显著（ $P<0.05$ ）。

作为糖代谢直接产物，果浆中有机酸种类和含量变化能够反映微生物的生长阶段和代谢活力，并为准确控制发酵终点提供客观依据^[23]。不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆的有机酸种类和含量差异显著（表2）。首先，不同乳杆菌发酵果浆苹果酸含量相较于 UF-Lp 均显著降低（ $P<0.05$ ）。发酵 96 h 后，P-Lp 苹果酸含量显著低于 F-Lp、R-Lp。其次，不同乳杆菌发酵果浆乳酸含量相较于 UF-Lp 均显著升高，且三种乳杆菌发酵果浆乳酸含量差异显著（ $P<0.05$ ）。P-Lp 在发酵终点时具有最高乳酸含量，F-Lp 次之。最后，F-Lp 柠檬酸含量在发酵过程中逐渐上升且显著高于 UF-Lp、P-Lp、R-Lp（ $P<0.05$ ）。最后，不同乳杆菌发酵果浆酒石酸含量相较于 UF-Lp 并无显著变化。

L. plantarum、*L. rhamnosus* 同属于兼性异型发酵菌，主要利用糖酵解途径转化消耗果浆中葡萄糖和蔗糖进而产生丙酮酸，再利用乳酸脱氢酶还原生成乳酸^[24]。由于两种乳杆菌的糖跨膜转运效率与糖酵解途径代谢活力的差异^[25]，导致二者乳酸终产量差异显著。然而，*L. fermentum* 作为专性异型发酵菌利用葡萄糖时，必须通过磷酸酮醇酶途径。所以，F-Lp 乳酸含量显著低于 P-Lp 根本原因在于专性异型发酵磷酸酮醇酶代谢通路：1 分子葡萄糖仅生成 1 分子乳酸，同时副产乙酸；乙酸的积累进一步抑制了微生物的增殖与代谢活力，最终导致乳酸生成量进一步降低^[26]。发酵 48 至 96 h 过程中的细菌总数表现出相同趋势。此外，特定的有机酸含量变化能够反映微生物不同代谢过程。柠檬酸含量变化在不同乳杆菌发酵过程中呈现不同趋势，这可能是由于 *L. plantarum*、*L. rhamnosus* 在发酵 0 至 6 h 过程中自身分泌的柠檬酸裂解酶可将柠檬酸转化为乳酸^[27]。另外，三种乳杆菌发酵果浆苹果酸含量整体呈现下降趋势，相反地，乳酸含量持续上升。这可能标志着三种乳杆菌进行“苹果酸-乳酸发酵”，即在乳杆菌作用下将 L-苹果酸脱羧生成 L-乳酸^[28]。

2.1.4 不同乳杆菌发酵对荔枝果浆的粗多糖含量变化的影响

粗多糖含量变化可反映微生物对果浆细胞壁结构的降解程度。荔枝中多糖类型主要包括果胶、纤维素、半纤维素等水不溶性多糖，以及部分水溶性多糖^[29]。不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆粗多糖含量具有显著差异（图 2a）。相较于 UF-Lp，不同乳杆菌发酵果浆粗多糖含量整体显著上升（ $P<0.05$ ），随着发酵时间增加，不同乳杆菌发酵果浆粗多糖含量均呈现出先上升后逐渐稳定的动态趋势。发酵 48 h 后，P-Lp 粗多糖含量达到峰值为 0.34 g/100 g，而 F-Lp 粗多糖含量在发酵结束时（96 h）达到峰值为 0.31 g/100 g，R-Lp 粗多糖含量在发酵 72 h 后达到峰值为 0.28 g/100 g。产生此现象的原因可能是微生物产生的胞外酶使得纤维素等水不溶性成分转化为可溶性的多糖^[30]。有研究发现，植物乳杆菌发酵能够降解荔枝水不溶性多糖，同时其部分被转化为水溶性多糖，从而提高水溶性多糖得率^[29]。此外，乳酸菌胞外多糖的合成也可能是导致粗多糖含量增加的重要机制^[31,32]。

2.1.5 不同乳杆菌发酵对荔枝果浆的总酚含量变化的影响

不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆总酚含量具有显著差异（图 2b）。相较于 UF-Lp，不同乳杆菌发酵果浆总酚含量显著上升（ $P<0.05$ ），随着发酵时间增加，不同乳杆菌发酵果浆总酚含量均呈现出先上升后下降的动态趋势。P-Lp 在发酵 24 h 总酚含量达到峰值为 340.79 mg GAE·L⁻¹，显著高于 F-Lp、R-Lp（ $P<0.05$ ）。R-Lp 总酚含量同样在发酵 24 h 达到最大值，即 318.57 mg GAE·L⁻¹，而 F-Lp 总酚含量则在发酵 48 h 达到峰值为 326.51 mg GAE·L⁻¹。乔强等^[33]发现不同乳酸菌发酵的松花粉总酚含量均显著高于未发酵的松花粉，且发酵过程中总酚含量呈现先上升后下降变化趋势。复合乳酸菌发酵的蓝莓黑莓混合果汁总酚含量在发酵前期缓慢增加且后期逐渐降低^[34]。上述研

究结果与本研究的变化趋势一致。产生此现象的原因可能是发酵 12 至 24 h 阶段,乳杆菌处在生长对数期,其分泌的糖苷酶导致与细胞壁多糖结合的酚类物质释放,所以导致可检测到的多酚含量增加^[35];而在发酵后期(72 至 96 h),可释放的酚类物质含量降低、酚类物质自身也会氧化或降解,导致其检测到的含量降低。

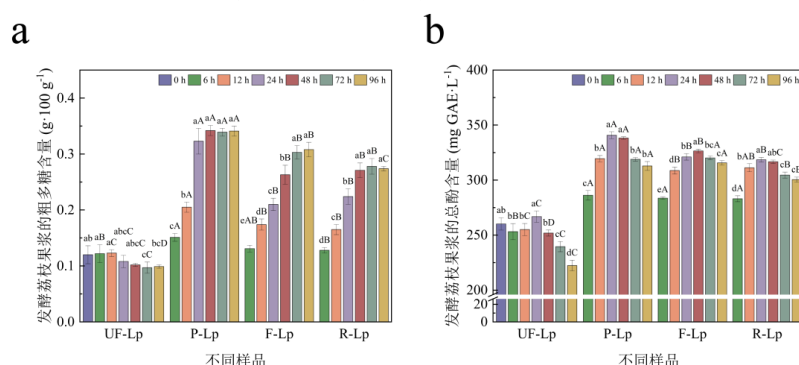


图2 不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆的功能成分含量的变化 (a) 粗多糖; (b) 总酚

Fig.2 Changes in contents of functional ingredients in litchi pulps fermented by different *Lactobacillus* strains at different fermentation times (a) crude polysaccharides; (b) total phenolics

注: 图中不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 的水平下, 不同发酵时间点同一乳杆菌果浆的粗多糖含量、总酚含量存在显著差异; 不同大写字母表示在 $P < 0.05$ 的水平下, 同一发酵时间点不同乳杆菌果浆的粗多糖含量、总酚含量存在显著差。

2.1.6 不同乳杆菌发酵对荔枝果浆的抗氧化活性变化的影响

不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆的总抗氧化能力差异显著(图3)。“ABTS⁺自由基清除率”反映样品清除自由基的能力,“FRAP 值”反映样品的总还原能力,二者共同评估不同发酵果浆的总抗氧化能力。由图 3a 可知,发酵 12 至 96 h 过程中,不同乳杆菌发酵果浆 ABTS⁺自由基清除能力显著强于 UF-Lp ($P < 0.05$)。发酵 48 h 后, P-Lp ABTS⁺自由基清除能力达到峰值为 $3.28 \text{ mmol TEAC} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著强于 F-Lp、R-Lp ($P < 0.05$)。而 F-Lp、R-Lp ABTS⁺自由基清除能力均在发酵 24 h 后达到峰值, 分别为 3.11 、 $3.09 \text{ mmol TEAC} \cdot \text{L}^{-1}$ 。再者, 不同乳杆菌发酵果浆总还原能力显著强于 UF-Lp ($P < 0.05$, 图 3b)。发酵 48 h 后, P-Lp 总还原能力达到峰值为 $3.29 \text{ mmol FeEAC} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著强于 F-Lp、R-Lp ($P < 0.05$)。而 F-Lp、R-Lp 分别在发酵 72 h 和 24 h 后具有最强总还原能力, 分别为 3.13 、 $3.02 \text{ mmol FeEAC} \cdot \text{L}^{-1}$ 。综上, 三种乳杆菌发酵果浆 ABTS⁺自由基清除能力和总还原能力整体上呈现出先增强后减弱的变化趋势。三种乳杆菌发酵果浆抗氧化活性差异可能与其果浆中的多酚和有机酸含量不同有关。Zhou 等^[36]发现植物乳杆菌发酵能够增强猕猴桃果肉抗氧化能力, 同时增加其酚类物质含量。本研究 P-Lp、R-Lp 分别在发酵 24、48 h 总酚含量达到最大值, F-Lp 在 24 h 达到最大值, 这与其 ABTS⁺自由基清除能力达到最大值的时间一致, 由此推测果浆中的多酚是其呈现抗氧化活性的主要因素。此外, Tkacz 等^[37]发现采用植物乳杆菌发酵沙棘-苹果汁时, 乳酸含量大幅增加的同时, 果浆的抗氧化活性也明显增加。在本研究中, P-Lp 产生乳酸含量最多, 其多酚含量也最多, 其抗氧化活性也最强, 与前人研究结果一致。

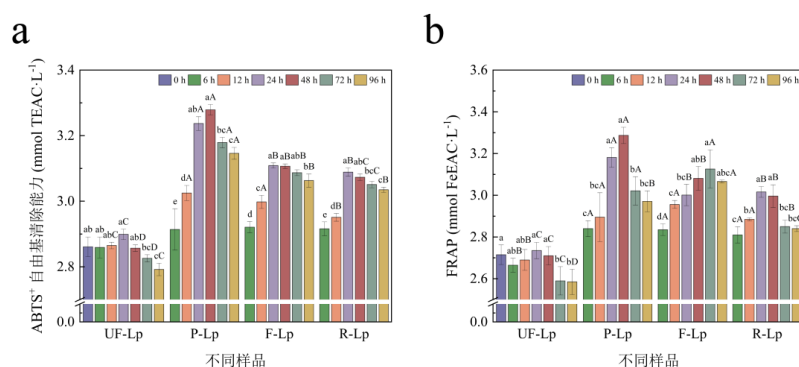


图3 不同乳杆菌发酵不同时间荔枝果浆的总抗氧化能力的变化 (a) ABTS⁺自由基清除能力; (b) FRAP 值

Fig.3 Changes in total antioxidant capacity of litchi pulps fermented by different *Lactobacillus* strains at different fermentation times (a) ABTS⁺ radical scavenging capacity; (b) FRAP values

注: 图中不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 的水平下, 不同发酵时间点同一乳杆菌果浆的总抗氧化能力存在显著差异; 不同大写字母

表示在 $P<0.05$ 的水平下，同一发酵时间点不同乳杆菌果浆的总抗氧化能力存在显著差异。

2.2 不同乳杆菌发酵对荔枝预估血糖生成指数的影响

通过体外模拟人体口腔、胃部以及小肠消化试验，绘制出待测样品在小肠阶段消化过程中葡萄糖释放量随时间变化曲线，如图 4 所示。按照 GI 值的分级标准，一般来说，GI 值高于 70 为高 GI 食物，GI 值介于 55 至 70 为中 GI 食物，GI 值低于 55 为低 GI 食物^[18]。由表 3 可得，不同乳杆菌发酵荔枝果粉 HI 值和 eGI 值均显著低于 uf-Lp0 ($P<0.05$)。uf-Lp0、r-Lp72 均为中 eGI 食物，而 p-Lp72、f-Lp72 均为低 eGI 食物，同时 f-Lp72 具有最低 eGI 值为 53.07。因此，乳杆菌发酵降低了荔枝果粉的 eGI 值，不同的菌种发酵导致果粉的 eGI 值不同程度降低。

不同乳杆菌发酵果粉 eGI 值具有差异可能与其含有的小分子糖、多糖、有机酸等含量差异有关。首先，葡萄糖作为参照标准，其 GI 值为 100，然而，果糖的 GI 值为 23，仅为葡萄糖的五分之一左右，其原因在于果糖主要在肝脏中进行代谢，不直接进入血液循环刺激胰岛素分泌，因此对血糖的直接影响较小^[38]。而蔗糖 (GI 值为 65) 进入小肠后将被迅速分解为葡萄糖和果糖，葡萄糖可迅速升高血糖并刺激胰岛素分泌，果糖则被运送至肝脏进行代谢^[39]。前面研究结果表明，发酵 72 h 后，三种乳杆菌发酵荔枝果浆中三种小分子糖含量降幅较小，且在 72 与 96 h 时葡萄糖、果糖含量均无显著性差异。另外，P-Lp、F-Lp 葡萄糖含量均低于 R-Lp，且 F-Lp 果糖含量低于 P-Lp、R-Lp。所以较低的小分子糖含量可能是影响发酵后荔枝果粉具有较低 eGI 值的重要原因。其次，食物中可溶性膳食纤维 (例如荔枝多糖) 进入胃和小肠后吸收水分，进而形成凝胶状物质，延缓胃排空速率的同时减缓了胃肠道消化酶与底物的结合速率，从而减缓了糖类的释放和吸收速率^[40]。另外，一项评估食醋中的常见有机酸对消化酶的体外抑制活性研究发现，酒石酸、苹果酸、乳酸、柠檬酸等均具有抑制消化酶活性，同时柠檬酸对 α -葡萄糖苷酶与 α -淀粉酶具有最强的抑制活性^[41]。P-Lp、F-Lp 乳酸含量高于 R-Lp，且 F-Lp 柠檬酸含量高于 P-Lp、R-Lp。所以较高的乳酸、柠檬酸含量可能对发酵后荔枝果粉的 eGI 值降低具有重要影响。综上所述，乳杆菌发酵的荔枝果粉的 eGI 值降低可能受到乳杆菌发酵导致的小分子糖、多糖以及有机酸等含量变化的共同影响。

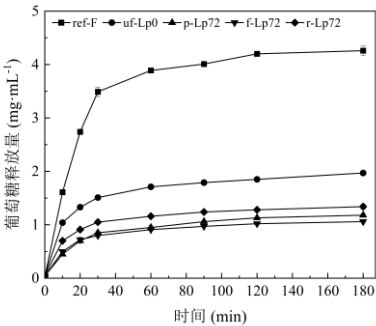


图 4 未发酵和乳杆菌发酵荔枝果粉样品和参考食品的葡萄糖释放量随时间变化曲线

Fig.4 Curves of glucose release over time of samples from unfermented and fermented litchi pulp powders by Lactobacillus and reference food

表 3 未发酵和乳杆菌发酵荔枝果粉样品的 HI 值和 eGI 值的对比

Table 3 Comparison of HI values and eGI values of samples from unfermented and fermented litchi pulp powders by Lactobacillus

样品	HI 值	eGI 值
uf-Lp0	45.17±0.37 ^a	64.51±0.20 ^a
p-Lp72	26.25±0.25 ^c	54.12±0.13 ^c
f-Lp72	24.33±0.11 ^d	53.07±0.06 ^d
r-Lp72	31.05±0.33 ^b	56.75±0.18 ^b

注：不同小写字母表示不同样品间差异显著 ($P<0.05$)。

3 结论

本研究以荔枝鲜果浆为原料，通过植物乳植杆菌、发酵粘液乳杆菌和鼠李糖乳杆菌等三种乳杆菌对荔枝果浆进行发酵，探明荔枝果浆经过不同乳杆菌发酵，其小分子糖与有机酸含量的变化情况，同时阐明了不同乳杆菌发

酵对荔枝中主要功能成分与血糖生成指数的影响。结果表明,发酵过程中,乳杆菌通过消耗小分子糖积累乳酸等有机酸,重塑了荔枝果浆的糖酸组成。其中,发酵粘液乳杆菌发酵荔枝果浆的果糖含量在发酵 96 h 后,从 $133.92 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 降低至 $8.08 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,植物乳杆菌发酵荔枝果浆的乳酸含量在发酵 72 h 后,从 $1.86 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 增加至 $17.93 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。此外,乳杆菌发酵导致荔枝果浆的粗多糖和总酚含量增加,其总抗氧化能力也得到提升。综合比较各发酵时间点果浆的糖酸组成以及多糖、多酚等活性成分含量,选用发酵 72 h 的荔枝果浆制备冻干粉,植物乳杆菌与发酵粘液乳杆菌发酵果粉为低 GI 食物,且发酵粘液乳杆菌发酵果粉具有最低 eGI 值为 53.07。这些发现表明乳杆菌发酵作为提升荔枝营养品质与功能活性的有效手段在制备低血糖生成指数的健康食品方面具有潜在应用价值,为开发低血糖生成指数荔枝产品提供了理论依据。此外,后续可开展动物实验,依托体内试验深入解析乳杆菌发酵影响荔枝血糖生成指数与功能活性的机制。

参考文献

- [1] 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.
- [2] WANG D W, YU J H, LI L F, et al. Decoding the interactive effects of litchi pectin and EGCG on immune microenvironment remodeling: A microbiota-metabolic-immune perspective [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(32): 20172-20189.
- [3] LIU X W, LE BOURVELLEC C, YU J H, et al. Trends and challenges on fruit and vegetable processing: Insights into sustainable, traceable, precise, healthy, intelligent, personalized and local innovative food products [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 125: 12-25.
- [4] YIN M, FAN W Q, YU Y, et al. Disparities in diabetes burden in China and globally, with projections to 2050: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021 [J]. Diabetes, Obesity & Metabolism, 2025, 27(8): 4594-4598.
- [5] WANG D W, DENG Y N, 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.
- [6] WANG Z N, FENG Y Z, YANG N 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(PB): 131455.
- [7] LIU Z, HUANG X Z, LIU Q Z, et al. Lactic acid bacteria fermentation improves sensory properties, bioactivity, and metabolic profiles of carrot pulp [J]. Food Bioscience, 2025, 66: 106303.
- [8] DERMENGIU N E, MILEA S A, BURADA B P, et al. A dark purple multifunctional ingredient from blueberry pomace enhanced with lactic acid bacteria for various applications [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(10): 4725-4737.
- [9] 王伟军,方鲁平,窦志霞,等.酸面团的功能特性及其在豆类和碾磨副产品中应用[J].中国食品学报,2023,23(8):450-458.
- [10] XING Z B, FU X Z, HUANG H, et al. Recent advances in *Lactobacillus plantarum* fermentation in modifying fruit-based products: Flavor property, bioactivity, and practical production applications [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(2): e70160.
- [11] ZANG J W, LIN T, XU C, et al. Advances in lactic acid bacteria and their metabolites in fermented foods: Mechanisms of food quality enhancement, gut microbiota modulation, and future prospects [J]. Food Reviews International, 2026, 42(3): 1657-1691.
- [12] JIANG W, HU Y, ZHU Z Y. Structural characteristics of polysaccharide from *Zingiber striolatum* and its effects on gut microbiota composition in obese mice [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1012030.
- [13] CHEN W D, XIE C Y, HE Q 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] 嵇海华.八种杂豆的营养组成及其体外消化酵解特性研究[D].南昌:南昌大学,2021.
- [15] ANDRE B, LOTTI E, MARIE A, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.
- [16] 段惠敏,刘玲玲,夏露露,等.低升糖型马铃薯品种的筛选[J].中国农业科学,2024,57(12):2295-2308.
- [17] GONI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. Nutrition Research, 1997, 17(3): 427-437.
- [18] 王怀斌,彭星光,刘宏生,等.碳水化合物食品血糖生成指数值体外、体内预测方法的研究进展[J].食品科学,2023,44(15):407-417.
- [19] KARAGOEL M A, TARAKCI Z, TEKIN A, et al. Effect of probiotic lactobacilli on protein hydrolysis, volatilomics, texture and sensory

- properties of buffalo yogurt: A comparative study [J]. International Dairy Journal, 2025, 173: 106470.
- [20] SOFIA D M C, WALTER J M B, GUILHERME A D R, et al. The role of microbial dynamics, sensorial compounds, and producing regions in cocoa fermentation [J]. Microbiology Research, 2025, 16(4): 75.
- [21] 纪嘉豪,王凯,胡卓炎,等.喷雾干燥在果粉加工过程中的研究现状及应用前景[J].现代食品科技,2025,41(5):354-363.
- [22] LIU S, HE Y X, HE W 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.
- [23] TIAN T, PENG Y J, CHEN S Y, et al. Screening of a feruloyl esterase-producing lactobacillus strain and its application in citrus whole-fruit pulp fermentation: organic acids, volatile compounds, and sensory evaluation [J]. Food Research International, 2026, 228: 118410.
- [24] MOLINA G E S, RAS G, DA SILVA D F, et al. Metabolic insights of lactic acid bacteria in reducing off-flavors and antinutrients in plant-based fermented dairy alternatives [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(2): e70134.
- [25] 王琪,武雪,段翠翠,等.不同乳酸菌发酵豆乳风味的差异分析[J].中国酿造,2025,44(7):106-113.
- [26] HOSSAIN T J. Functional genomics of the lactic acid bacterium *Limosilactobacillus fermentum* LAB-1: metabolic, probiotic and biotechnological perspectives [J]. Heliyon, 2022, 8(11): e11412.
- [27] 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.
- [28] 胡三三,于可济,朱保庆,等.植物乳杆菌在葡萄酒苹果酸-乳酸发酵阶段的应用[J].中国食品学报,2025,25(10):442-456.
- [29] HUANG G T, SU D X, LEE Y K, et al. Accumulation of water-soluble polysaccharides during lychee pulp fermentation with *Lactiplantibacillus plantarum* involves endoglucanase expression [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(6): 3669-3679.
- [30] XIE Y, XU M W, HAN B X, et al. Barley husk degraded by *Fusarium graminearum* MH1 induced premature yeast flocculation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(33): 10296-10304.
- [31] WEI G Q, WANG D D, WANG T, et al. Probiotic potential and safety properties of *Limosilactobacillus fermentum* A51 with high exopolysaccharide production [J]. Frontiers in Microbiology, 2025, 16: 1498352.
- [32] LI Q Q, FENG L X, YOUSAF M, et al. Structural characterization of exopolysaccharide from *Lacticaseibacillus rhamnosus* and its protective mechanism against dyslipidemia in obese mice [J]. Food Bioscience, 2026, 78: 108480.
- [33] 乔强,邓倩,胡璐曼,等.不同乳酸菌发酵对松花粉抗氧化能力及其酚类组成的影响[J].食品研究与开发,2025,46(23):21-30.
- [34] 张宏志,马艳弘,刘小莉,等.复合乳酸菌发酵蓝莓黑莓混合汁过程中的品质变化[J].现代食品科技,2019,35(10):85-91+212.
- [35] ZHANG L S, LI A P, LIU H M, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation on the release and biotransformation of bound phenolics in Ma bamboos shoots (*Dendrocalamus latiflorus* Munro) [J]. Foods, 2025, 14(15): 2573.
- [36] ZHOU Y, WANG R M, ZHANG Y F, 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.
- [37] TKACZ K, CHMIELEWSKA J, TURKIEWICZ I P, et al. Dynamics of changes in organic acids, sugars and phenolic compounds and antioxidant activity of sea buckthorn and sea buckthorn-apple juices during malolactic fermentation [J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127382.
- [38] TAPPY L. Metabolism of sugars: A window to the regulation of glucose and lipid homeostasis by splanchnic organs [J]. Clinical Nutrition, 2021, 40(4): 1691-1698.
- [39] ZHAO M, LONE J, REGHUPATY S, et al. Progress in understanding the regulation of glucose and fructose metabolism [J]. Annual Review of Nutrition, 2025, 45(1): 93-114.
- [40] 吴晖,何平伟,赖富饶,等.谷物可溶性(1→3)(1→4)- β -D-葡聚糖结构与生理活性的研究进展[J].现代食品科技,2016,32(7):283-294.
- [41] NOH Y H, LEE D B, LEE Y W, et al. *In vitro* inhibitory effects of organic acids identified in commercial vinegars on α -amylase and α -glucosidase [J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2020, 25(3): 319-324.