单一与复合乳酸菌发酵龙眼果汁理化特性及挥发性化合物的比较

韦秋霞，尹泽禧，李垄清，李玉婷，余祥英*

（东莞理工学院生命健康与技术学院，中国轻工业健康食品开发与营养调控重点实验室，东莞市特色食品精准设计重点实验室，食品营养健康工程与智能化加工研究中心，广东东莞 523808）

摘要：为比较不同乳酸菌发酵对龙眼果汁品质和风味的影响，采用植物乳植杆菌、保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌进行单菌及复合发酵，以未发酵果汁为对照，测定各组活菌数、pH 值等理化指标，采用气相色谱－质谱（Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS）和气相色谱－离子迁移谱（Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS）分析挥发性化合物组成。结果表明，植物乳植杆菌单菌及复合发酵组显著降低 pH 值（由 6.98 降至 3.60~3.63）并提升总酸含量（由 1.96 g·L^{-1} 增至 6.78~6.87 g·L^{-1}），可溶性固形物（由 10.00% 降至 9.13%~9.33%）和还原糖（由 36.69 mg·mL^{-1} 降至 24.88 mg·mL^{-1}）降解最明显；三元复合菌组活菌数（8.80 log CFU/mL）和总酚保留率（91.71%）最高。挥发性组分分析显示，发酵使单萜烯类主导（占总量的 90.74%）的香气谱系转变为酮、醛、醇、酯等风味物质协同构成的复杂体系（GC-MS），并降低 2-己烯醛和反式-2-庚烯醛等异味成分（GC-IMS）；二元复合菌组新增种类最多、总量最高。综上，三元复合菌发酵（1:1:1）可协同提升龙眼果汁活菌数、酸度、总酚保留；二元复合菌发酵则在风味物质合成方面更具优势。该研究结果为提升发酵龙眼果汁的品质和风味提供了参考。

关键词：龙眼；乳酸菌；发酵果汁；理化特性；挥发性化合物

文章编号：1673-9078(2026)10-179-189 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1157

Comparison of the Physicochemical Properties and Volatile Profiles of Longan Juice Fermented with Single and Mixed Lactic Acid Bacteria

WEI Qiuxia, YIN Zexi, LI Longqing, LI Yuting, YU Xiangying*

(Engineering Research Center of Health Food Design & Nutrition Regulation, Dongguan Key Laboratory of Typical Food Precision Design, China National Light Industry Key Laboratory of Healthy Food Development and Nutrition Regulation, School of Life and Health Technology, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: To compare the effects of different lactic acid bacteria fermentation on the quality and flavor of longan juice, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactobacillus bulgaricus*, and *Streptococcus thermophilus* were used for single and mixed fermentation. Using the unfermented juice as control, the viable bacterial counts, pH value, and other physicochemical parameters of each group were determined, and the composition of volatile compounds was analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC–IMS). The results showed that the single and mixed fermentation groups containing *L. plantarum* significantly decreased the pH value (from 6.98 to 3.60~3.63), and significantly increased the total acid content (from 1.96 g·L^{-1} to 6.78~6.87 g·L^{-1}), while also showing the most pronounced degradation of soluble solids (from 10.00% to 9.13%~9.33%) and reducing sugars (from 36.69 to 24.88 mg·mL^{-1}). The ternary mixed group (1:1:1) showed the highest viable bacterial count (8.80 log CFU/mL) and retention rate of total phenols (91.71%). Analysis of volatile components showed

收稿日期：2025-08-14；修回日期：2025-10-29；接受日期：2025-11-04

基金项目：国家自然科学基金项目（32202011）；广东省创新强校创新团队项目（2021KCXTD035）

作者简介：韦秋霞（2000-），女，硕士研究生，研究方向：食品工程，E-mail：15767695923@163.com

通讯作者：余祥英（1986-），女，博士，讲师，研究方向：食品质量与安全，E-mail：yuxy@dgut.edu.cn

that fermentation transformed the monoterpene-dominated (90.74% of total) aroma lineage into a complex system composed of ketones, aldehydes, alcohols, esters, and other flavor compounds (GC-MS), with reduced off-flavor components, such as 2-hexenal and trans-2-heptenal (GC-IMS); the binary mixed group exhibited the greatest increase in both variety and total concentration of volatile components. In conclusion, ternary mixed fermentation (1:1:1) demonstrated synergistic effects in enhancing the viable bacterial counts, acidity, and total phenolic retention of longan juice, while binary mixed fermentation offered more advantages in the synthesis of flavor compounds. These findings provide a theoretical foundation for improving the quality and flavor of fermented longan juice.

Key words: longan; lactic acid bacteria; fermented juice; physicochemical properties; volatile compounds

引文格式：

韦秋霞,尹泽禧,李垄清,等.单一与复合乳酸菌发酵龙眼果汁理化特性及挥发性化合物的比较[J].现代食品科技,2026,42(10): 179-189.

WEI Qiuxia, YIN Zexi, LI Longqing, et al. Comparison of the physicochemical properties and volatile profiles of longan juice fermented with single and mixed lactic acid bacteria [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 179-189.

龙眼（*Dimocarpus longan* Lour.）作为无患子科植物，是我国南方特色药食同源珍果，其果肉富含碳水化合物、蛋白质、维生素 C、氨基酸和矿物质等基础营养成分，同时含有多酚等功能性成分及丰富的挥发性化合物，具有养血安神、延年益寿等保健功效，对推动乡村振兴具有重要意义[1]。然而，龙眼成熟于高温高湿的季节，其高糖、高水分及弱酸性的特点使其易腐烂变质[1]。并且，目前龙眼以鲜销为主，这在很大程度上制约了产业效益提升。因此，亟需发展精深加工技术以实现产业提质增效。

近年来，乳酸菌发酵技术已成为果蔬汁精深加工的研究热点，并已成功应用于多种发酵果蔬汁的生产，该技术协同代谢途径优化产品的感官、营养与贮藏稳定性，为功能性果蔬饮品的开发提供了重要的技术路径[2]。此外，多项研究表明，复合菌种发酵较单一菌种具有更显著的品质提升效果[3]。Hashemi 等[4]发现，2 种不同的植物乳植杆菌复合发酵佛手柑汁的糖消耗、有机酸含量及抗氧化活性均显著优于单一菌种发酵。Lizardo 等[5]报道，植物乳植杆菌和干酪乳杆菌复合发酵的樱桃接骨木果实中总酚、总黄酮及五种多酚单体含量高于单菌和未发酵组。张璐等[6]指出，植物乳植杆菌 115 与副干酪乳杆菌复合菌发酵使猕猴桃汁风味物质（醇类、酯类）显著增加（$P<0.05$），花香果香更突出，效果优于单菌发酵。

然而，果蔬汁的最终品质在很大程度上取决于所采用的菌种及其组合方式[7]。不同的菌种组合可能产生差异化的代谢产物谱，进而影响产品的风味、营养和功能特性。这一现象在龙眼果汁发酵研究中已得到初步验证，如保加利亚乳杆菌 - 嗜热链球菌复合发酵可降低还原糖并提高总黄酮含量[8]；植物乳植杆菌和乳酸芽孢杆菌 DU-106 复合发酵能显著改善风味[9]；植物乳植杆菌和嗜酸乳杆菌共培养则能促进 γ-氨基丁酸的积累[10]。尽管取得一定进展，但现有研究都集中在单一或二元复合乳酸菌发酵，缺乏对单一与复合菌发酵差异的系统比较，且鲜有将采用气相色谱－质谱（Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS）和气相色谱－离子迁移谱（Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS）相结合全面分析发酵龙眼果汁的香气成分的研究。

本研究以茂名储良龙眼为原料，选用前述报道在龙眼果汁的营养及风味成分上已展现初步优良结果的植物乳植杆菌、保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌及其不同组合进行发酵，测定不同乳酸菌发酵龙眼果汁的活菌数、pH 值、总酸、可溶性固形物、还原糖和总酚含量，评估其发酵特性；并运用 GC-MS 结合 GC-IMS 技术分析其挥发性成分，旨在为改善乳酸菌发酵龙眼果汁的品质和风味提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

龙眼，品种为储良，于 2024 年 8 月 14 日采自茂名高州。

MRS 肉汤培养基、琼脂，广东环凯微生物科技有限公司；C7-C40 正构烷烃标准品、正酮 C4~C9（纯度≥98%），上海安谱实验科技股份有限公司；3,5-二硝基水杨酸（分析纯），广州和为医药科技有限公司；福林酚试剂（分析纯），索莱宝生物科技有限公司；没食子酸、氢氧化钠、无水葡萄糖、环己酮（均为分析纯），上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器设备

Aglient 8890-7000D 气相色谱串联质谱仪、HP-5MS 石英毛细管色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）、萃取头（50/30 μm DVB/CAR/PDMS），美国 Agilent 公司；GAS FlavourSpec® 气相色谱离子迁移谱风味分析联用仪，德国 GAS 公司；FS-SE-54-CB-1 色谱柱（15 m×0.53 mm, 1 μm），美国 Restek 公司；HSP-80B 恒温恒湿培养箱，上海精宏实验设备有限公司；TGL-16GB 高速离心机，上海安亭科学仪器厂；Spark 10M 多功能酶标仪，瑞士帝肯仪器有限公司；PHSJ-3FpH 计，上海雷磁仪器有限公司；HX-PB832A 榨汁机，奥克斯有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 菌株的制备

植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum* GIM1.380, LP），保加利亚乳杆菌（*Lactobacillus bulgaricus* GIM1.155, LB），嗜热链球菌（*Streptococcus thermophilus* GIM1.540, ST）均购自广东省微生物菌种保藏中心。活化步骤如下：首先取 1 mL 冻存菌液接种至 50 mL MRS 培养基，37 ℃下静置培养 24 h；然后将培养物以 2%（*V/V*）接种量转接至 100 mL MRS 培养基，相同条件下再次培养 24 h。培养结束后，菌液经 4 ℃、5 000 r·min^{-1} 离心 10 min，收集菌体，用生理盐水重悬并调整浓度至 10^8 CFU/mL 左右，即为用于龙眼果汁发酵的菌液。

1.3.2 龙眼果汁的制备与发酵

新鲜龙眼去皮取果肉，匀浆后破碎、过滤（100 目），滤液等体积稀释，巴氏杀菌（80 ℃，20 min）后冷却备用。发酵体系采用 1%（*m/V*）接种量，分别设置植物乳植杆菌（LP）、保加利亚乳杆菌（LB）、嗜热链球菌（ST）单菌发酵组，LP+LB、LP+ST、LB+ST 双菌等体积混合组，以及 LP+LB+ST 三菌等体积混合组，37 ℃静置发酵 24 h；以未接种的巴氏杀菌龙眼果汁作为对照组。

1.3.3 理化指标的测定

活菌数：采用稀释涂布平板法[11]；pH 值：采用数字 pH 计在 25 ℃下测定；总酸：参照国家标准 GB 12456-2021《食品中总酸的测定》中的第一法《酸碱指示剂滴定法》，以乳酸计[12]；可溶性固形物：采用高精度数显糖度计测定；还原糖：采用 3,5-二硝基水杨酸比色法[13]测定；总酚：采用福林酚法测定，以没食子酸标准曲线计算总酚含量，结果以每 100 mL 样品相当于没食子酸的量（mg GAE/100 mL）表示[11]。

1.3.4 SPME-GC-MS分析

SPME 条件：参考肖海辉等[9]的方法并稍作修改，采用顶空固相微萃取法。具体操作如下：在首次使用及每次进样前，将 SPME 萃取头（50/30 μm DVB/CAR/PDMS）置于气相色谱进样口于 250 ℃下老化 30 min，以去除残留。取 6 mL 样品置于 20 mL 顶空瓶中，加入 2 g NaCl 与 50 μL 0.1 mg·mL^{-1} 的环己酮（内标），50 ℃孵育 30 min。插入萃取头，250 ℃解析 5 min。为排除系统背景干扰，确保分析信号完全来源于样品，在每组样品分析间隙，将经活化的洁净纤维头插入空白样品瓶中，在与样品完全相同的条件下进行 GC-MS 采集，所得色谱图作为背景参考用于后续数据校正。

GC-MS 条件：HP-5MS 色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）；程序升温条件：40 ℃（保持 3 min）→150 ℃（5 ℃·min^{-1}，保持 1 min）→230 ℃（10 ℃·min^{-1}，保持 1 min）；载气为高纯 N_2（99.999%），流量 1.0 mL·min^{-1}，不分流进样；电离方式为 EI，电子能量 70 eV，离子源温度为 230 ℃，四级杆温度 150 ℃，扫描范围 *m/z*：30~450。

化合物定性：根据 C7~C40 正构烷烃的保留时间计算各化合物的保留指数（Retention Index，RI）。通过比较化合物在本实验中的质谱图和 NIST 17 谱库数据，以及比较化合物在本实验和在文献中报道的 RI 值来对化合物进行定性。

化合物定量：通过比较化合物和内标物质的峰面积之比来对化合物进行半定量分析，同时假定所有化合物与内标物有相同的响应因子。

1.3.5 GC-IMS分析

参考田真等[14]的方法并稍作修改。取 1 mL 样品于顶空瓶中，55 ℃下孵育 20 min；采用顶空进样，进样量为 600 μL，进样针温度 85 ℃；色谱柱为 FS-SE-54-CB-1（15 m×0.53 mm，1 μm），色谱柱温 55 ℃；载气为高纯 N_2（99.999%），流速程序：2 mL·min^{-1}（保持 2 min）→8 min 内升至 10 mL·min^{-1}→10 min 内升至 100 mL·min^{-1}→5 min 内升至 150 mL·min^{-1}（保持 20 min）。待分析组分经过色谱柱洗脱分离后，送入 IMS 检测器（采用 ^{3}H 电离源，漂移管长度 98 mm，漂移管温度 45 ℃，漂移管电压 5 kV）。

化合物定性：根据正酮 C4~C9 的保留时间计算每种检出化合物的 RI 值，通过 RI 值和漂移时间与 NIST 14 及 IMS 数据库比较来进行鉴定。

1.3.6 统计学分析

每组实验均进行三次平行试验，结果用平均值±标准差表示。使用 SPSS Statistics 21.0 进行 Duncan 多重检验分析显著性差异。GC-MS 数据通过 Qualitative Analysis 10.0 和 NIST 17 数据库处理，GC-IMS 数据采用 LAV 2.2.1 软件和 NIST 14 数据库分析。采用 Origin 2021 进行主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）和聚类热图绘制。采用 MetaboA'nalyst 进行正交偏最小二乘判别分析（Partial Least Squares-Discriminant Analysis, PLS-DA）并计算变量变量重要性投影（Variable Importance Projections, VIP）。

2 结果与讨论

2.1 不同乳酸菌发酵龙眼果汁的理化性质分析

表 1 显示了龙眼果汁经不同乳酸菌发酵后的活菌数、pH 值等理化性质。由表 1 可知，乳酸菌发酵处理对龙眼果汁的理化性质产生了显著影响（$P<0.05$）：（1）发酵后，各组活菌数快速增殖，达 8.22~8.80 log CFU/mL，说明龙眼果汁是乳酸菌生长的良好基质，其中 LP 组活菌数为 8.66 log CFU/mL，LB 组为 8.39 log CFU/mL，ST 组为 8.22 log CFU/mL，而 LP+LB+ST 组增殖最显著，为 8.80 log CFU/mL。这一现象与 Urcan 等[15]的研究结果（蜜蜂益生菌三菌体系（植物乳植杆菌、嗜酸乳杆菌和昆克氏乳杆菌）共培养 24 h 后活菌数显著高于单菌）相吻合。需说明的是，虽然对照组在发酵后活菌数为 5.87 log CFU/mL，但由于所有实验组均在与对照组相同的果汁基质、杀菌条件及发酵环境下接种特定乳酸菌，因此对照组中的背景菌群可视为各实验组共同的“初始环境”。基于此，本研究后续的所有分析，均是在此背景菌群存在的条件下，比较单一与复合乳酸菌发酵对龙眼果汁理化性质及挥发性化合物的变化。（2）pH 值（由 6.98 降至 3.60~4.07）、可溶性固形物（由 10.00% 降至 9.13%~9.63%）在发酵后显著下降，总酸（由 1.96 增至 3.56~6.87 $g·L^{-1}$）显著增加。总酸与 pH 值呈现较强的负相关性（R^2=0.626 5），此变化规律与黄豪等[11]的研究结果相符。其中，LP 相关组（包括单菌及复合菌）pH 值（由 6.98 降至 3.60~3.63）和可溶性固形物（由 10.00% 降至 9.13%~9.33%）降幅最大，总酸（由 1.96 增至 6.78~6.87 $g·L^{-1}$）增幅最大，而 ST 组 pH 值降幅最小（为 4.07），总酸含量增加最少（为 3.56 $g·L^{-1}$）。类似地，肖海辉等[9]观察到植物乳植杆菌－乳酸芽孢杆菌 DU-106 复合发酵使体系 pH 值由 5.4 下降至 3.60，总酸含量从 1.00 $g·kg^{-1}$ 升高至 10.39 $g·kg^{-1}$。pH 值降低与总酸含量上升可能与果汁本身有机酸的溶出及乳酸菌在代谢过程中产生有机酸有关[9]。（3）还原糖含量显著降低（由 36.69 $mg·mL^{-1}$ 降至 24.88~32.94 $mg·mL^{-1}$），其中 LP+ST 组降幅最大（降低了 32.19%），其次为 LP 组，该研究与冉玉兵等[8]报道保加利亚乳杆菌－嗜热链球菌复合发酵使龙眼果浆还原糖含量降低 38.42%（$P<0.05$）一致，还原糖含量的降低可能与乳酸菌发酵过程中对葡萄糖、多糖等碳源的利用有关[9]。（4）总酚含量均显著下降，以三元复合菌组保留率最高（91.71%），其次是 LP+LB 组（81.06%），而 ST 组含量下降最多。前人研究也有类似报道，如 Jaiswal 等[16]发现乳酸菌发酵会导致甘蓝汁总酚含量降低 15%~24%，这可能与菌株产生的 β-葡萄糖苷酶和脱羧酶等酶系对酚类物质的降解有关。从代谢机制角度分析，单菌发酵可能导致总酚含量因微生物降解或酚类聚合沉淀而降低[17]，而混菌发酵则可能通过菌株互作抑制降解途径或将其导向生物转化，从而更有利于总酚的保留[18]。

表 1 不同乳酸菌发酵龙眼果汁的理化指标

Table 1 Physical and chemical indexes of longan juice fermented by different lactic acid bacteria

组别	活菌数/(log CFU/mL)	pH 值	总酸/($g·L^{-1}$)	可溶性固形物/%	还原糖 /($mg·mL^{-1}$)	总酚 /(mg GAE/100 mL)
Control	5.87 ± 0.05^{e}	6.98 ± 0.02^{a}	1.96 ± 0.10^{f}	10.00 ± 0.10^{a}	36.69 ± 0.34^{a}	23.65 ± 0.15^{a}
LP	8.66 ± 0.10^{b}	3.60 ± 0.01^{d}	6.87 ± 0.05^{a}	9.33 ± 0.06^{c}	26.23 ± 0.37^{e}	18.27 ± 0.47^{e}
LB	8.39 ± 0.05^{c}	3.92 ± 0.01^{c}	4.68 ± 0.08^{c}	9.63 ± 0.06^{b}	27.60 ± 0.23^{d}	17.20 ± 0.13^{f}
ST	8.22 ± 0.12^{d}	4.07 ± 0.03^{b}	3.56 ± 0.10^{e}	9.37 ± 0.06^{c}	32.94 ± 0.23^{b}	16.28 ± 0.18^{g}
LP+LB	8.65 ± 0.03^{b}	3.62 ± 0.02^{d}	6.78 ± 0.09^{a}	9.17 ± 0.06^{d}	28.37 ± 0.08^{d}	19.17 ± 0.18^{d}
LP+ST	8.46 ± 0.10^{c}	3.63 ± 0.01^{d}	6.53 ± 0.03^{b}	9.17 ± 0.06^{d}	24.88 ± 0.27^{f}	21.05 ± 0.15^{c}
LB+ST	8.43 ± 0.07^{c}	4.04 ± 0.01^{b}	3.75 ± 0.11^{d}	9.37 ± 0.06^{c}	28.72 ± 0.48^{d}	18.85 ± 0.24^{d}
LP+LB+ST	8.80 ± 0.07^{a}	3.61 ± 0.04^{d}	6.82 ± 0.03^{a}	9.13 ± 0.06^{d}	30.86 ± 0.31^{c}	21.69 ± 0.42^{b}

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（$P<0.05$）。

值得注意的是，不同于乳基质里观察到的经典“ST 与乳杆菌”的互惠现象，龙眼汁中无乳糖，碳源主要是蔗糖、葡萄糖和果糖，缺少“ST 与乳杆菌”的互惠机制中所需要的高浓度乳糖[19]，因此本研究中 ST 与乳杆菌复合发酵在基础代谢指标上（包括活菌数和总酸积累、pH 值降低及还原糖消耗）均未显现协同增效效应。在总酚保留率和可溶性固形物利用上，复合菌组（尤其是三元菌组）显著优于任何单一菌。该结果提示，菌株间在利用酚类、多糖等复杂底物时，存在着不同于基础生长的竞争关系。复合菌群可能通过酶系的互补与协同来更高效地转化酚类、多糖等复杂底物[20]。刘晓翠等[21]在石榴汁发酵中也发现，乳酸菌复配不仅能更有效地降低可溶性固形物，还能协同保留并富集总酚等。综上所述，植物乳植杆菌是糖代谢和产酸的关键菌种，特定菌种组合（尤其是含 LP 的复合菌组）能有效减少酚类物质的降解。

2.2 不同乳酸菌发酵龙眼果汁中挥发性化合物的GC-MS分析

图 1 为不同乳酸菌发酵龙眼果汁挥发性化合物的总离子流图，表 2 为不同乳酸菌发酵龙眼果汁中 GC-MS 分析鉴定出的挥发性成分。由图 1 和表 2 可知，共检出 26 种化合物，包括 6 种单萜烯类、7 种酯类、4 种芳香烃类、3 种醇类、2 种酮类、2 种醛类、1 种酚类及 1 种含硫化合物。与未发酵组相比，经乳酸菌发酵后的龙眼果汁中新检出 15 种挥发性化合物，这些新增化合物主要包含酯类（4 种）、醇类（2 种）、芳香烃类（4 种）、醛类（2 种）以及酚类（1 种）。其中二元共培养体系表现出超越单菌及三元体系的代谢优势，尤其是 LP+LB 组，新增 15 种挥发性化合物。为深入解析不同乳酸菌发酵对龙眼果汁风味物质的影响，图 2 显示了各组挥发性化合物的组成特征及相对含量。由图 2 可知，乳酸菌发酵显著改变了龙眼果汁的挥发性成分特征。与未发酵组相比，除 LB+ST 组（4 168.34 μg·L^{-1}）外，其余处理组均显著下降（由 3 884.29 μg·L^{-1} 降至 2 112.92~3 121.11 μg·L^{-1}）。成分分析显示，单萜烯类在各组均占主导地位，并以反式-*β*-罗勒烯为主（978.00~3 156.44 μg·L^{-1}），还含少量的别罗勒烯（35.49~139.05 μg·L^{-1}）、*β*-罗勒烯（20.82~81.82 μg·L^{-1}）、（E,E）-2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯（16.65~73.94 μg·L^{-1}）及 *γ*-松油烯（6.10~29.60 μg·L^{-1}），但其绝对含量和相对含量（对照组：90.74%，LP 组：62.59%，LB+ST 组：61.57%，LP+LB+ST 组：56.78%，ST 组：54.60%，LP+LB 组：51.00%，LB 组：50.62%，LP+ST 组：42.45%）经发酵后显著下降（$P < 0.05$）。该结果与汪浩[22]的发现一致，其研究亦表明龙眼果浆经 LB+ST 发酵后以反式-*β*-罗勒烯为主，且萜烯类物质总量呈下降趋势。上述结果表明不同菌种组合通过其独特的代谢网络，差异化地调控着风味物质的合成路径[23]。值得注意的是，具有典型柑橘香气的 *D*-柠檬烯（43.71 μg·L^{-1}）仅在未发酵组中检出，且前述所检出的 5 种单萜烯类化合物经发酵后含量均显著降低。该现象可能与单萜烯的氧化转化有关[24]。

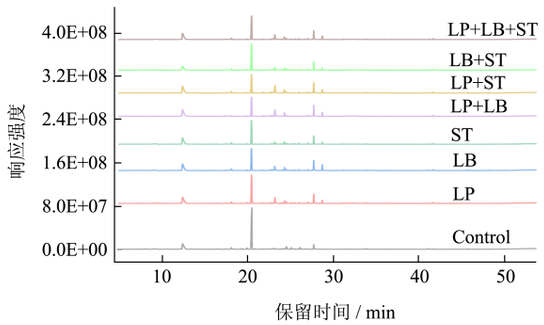


图 1 不同乳酸菌发酵龙眼果汁挥发性化合物的总离子流图

Fig.1 Total ion flow diagram of volatile compounds in longan juice fermented by different lactic acid bacteria

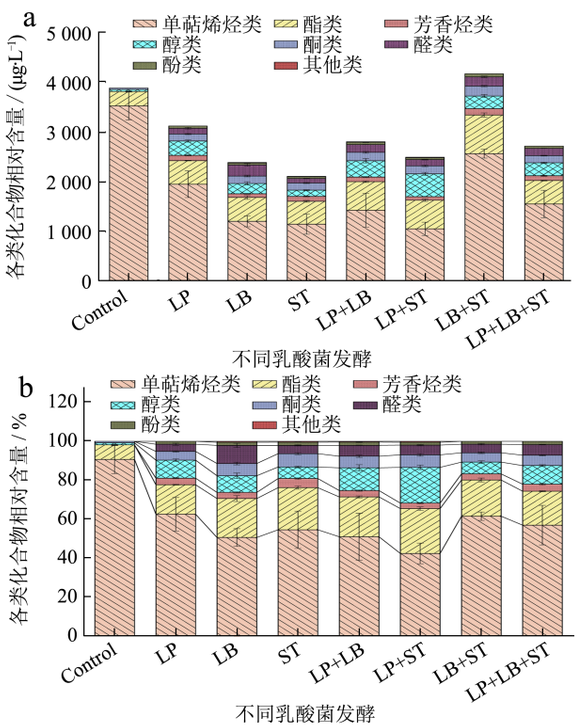


图 2 不同乳酸菌发酵龙眼果汁中挥发性化合物的含量对比

Fig. 2 Comparison of volatile compound content in longan juice fermented by different lactic acid bacteria

注：（a）绝对含量；（b）相对含量。

表 2 不同乳酸菌发酵龙眼果汁的挥发性化合物

Table 2 Volatile compounds in longan juice fermented by different lactic acid bacteria

序号	保留时间/min	化合物	CAS 号	RI1/RI2	分子式	气味描述 *	含量/(μg·L^{-1})							
							Control	LP	LB	ST	LP+LB	LP+ST	LB+ST	LP+LB+ST
1	19.334	*D*-柠檬烯	5989-27-5	—	$C_{10}H_{16}$	柑橘	43.71 ± 2.46^{a}	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
2	19.937	*β*-罗勒烯	13877-91-3	1 037/1 037	$C_{10}H_{16}$	花香	81.82 ± 8.68^{a}	48.83 ± 7.87^{c}	27.78 ± 3.18^{def}	23.17 ± 3.81^{ef}	33.88 ± 8.72^{de}	20.82 ± 2.27^{f}	63.01 ± 1.57^{b}	36.93 ± 8.05^{d}
3	20.479	反式-*β*-罗勒烯	3779-61-1	1 047/1 049	$C_{10}H_{16}$	花香	3 156.44 ± 253.11^{a}	1 786.37 ± 245.50^{c}	1 108.03 ± 103.50^{de}	1 068.98 ± 187.88^{de}	1 314.68 ± 310.86^{de}	978.00 ± 123.43^{e}	2 352.55 ± 83.43^{b}	1 417.38 ± 252.63^{d}
4	20.915	*γ*-松油烯	99-85-4	1 056/1 060	$C_{10}H_{16}$	柑橘	29.60 ± 2.17^{a}	11.93 ± 1.20^{c}	6.72 ± 0.12^{ef}	7.63 ± 0.84^{def}	8.61 ± 1.44^{de}	6.10 ± 0.24^{f}	14.35 ± 0.22^{b}	8.87 ± 0.79^{d}
5	24.567	别罗勒烯	7216-56-0	1 126/1 131	$C_{10}H_{16}$		139.05 ± 11.17^{a}	73.08 ± 11.28^{c}	46.58 ± 2.25^{d}	35.49 ± 6.74^{d}	50.47 ± 11.33^{d}	37.78 ± 4.57^{d}	93.58 ± 4.66^{b}	51.65 ± 9.95^{d}
6	25.143	(E,E)-2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	3016-19-1	1 138/1 144	$C_{10}H_{16}$		73.94 ± 6.53^{a}	33.38 ± 2.42^{c}	20.82 ± 1.98^{de}	18.32 ± 2.88^{de}	23.57 ± 6.09^{de}	16.65 ± 2.08^{e}	42.78 ± 1.91^{b}	24.20 ± 3.60^{d}
合计		单萜烯类（6）					3 524.57 ± 283.78^{a}	1 953.58 ± 268.00^{c}	1 209.92 ± 108.98^{de}	1 153.59 ± 201.93^{de}	1 431.21 ± 338.11^{de}	1 099.35 ± 132.39^{e}	2 566.26 ± 89.30^{b}	1 539.02 ± 274.83^{d}
7	16.358	2-己烯酸甲酯	2396-77-2	969/966	$C_7H_{12}O_2$	果香	29.75 ± 2.81^{b}	25.55 ± 0.44^{c}	21.11 ± 1.19^{e}	21.91 ± 0.80^{de}	24.33 ± 1.10^{cd}	23.03 ± 1.46^{cde}	37.60 ± 1.74^{a}	23.18 ± 1.09^{cde}
8	22.896	苯甲酸甲酯	93-58-3	1 093/1 094	$C_8H_8O_2$	紫罗兰	33.64 ± 1.94^{d}	44.29 ± 2.14^{bc}	44.44 ± 3.81^{bc}	43.18 ± 0.90^{bc}	46.22 ± 1.42^{b}	43.73 ± 0.53^{bc}	81.38 ± 6.36^{a}	39.98 ± 2.05^{cde}
9	26.671	苯甲酸乙酯	93-89-0	1 168/1 171	$C_9H_{10}O_2$	花香、果香	nd	nd	14.28 ± 1.25^{d}	14.28 ± 0.42^{d}	24.46 ± 2.32^{b}	24.38 ± 1.46^{b}	27.42 ± 1.50^{a}	20.90 ± 2.25^{c}
10	27.748	水杨酸甲酯	119-36-8	1 190/1 192	$C_8H_8O_3$	薄荷	224.75 ± 7.57^{e}	402.51 ± 8.03^{c}	385.40 ± 30.92^{cd}	354.28 ± 16.05^{d}	439.54 ± 12.52^{b}	445.78 ± 25.19^{b}	610.43 ± 30.73^{a}	374.77 ± 3.52^{cd}
11	31.229	甲基-4-氯苯甲酸甲酯	1126-46-1	1 264/1 250	$C_8H_7ClO_2$		nd	nd	13.25 ± 1.60^{cd}	13.64 ± 1.20^{c}	16.61 ± 1.57^{ab}	15.74 ± 1.28^{b}	18.33 ± 1.46^{a}	11.55 ± 0.09^{d}
12	33.792	香叶酸甲酯	1189-09-9	1 320/1 324	$C_{11}H_{18}O_2$	花香、绿、果香	nd	nd	nd	9.66 ± 0.87^{b}	11.63 ± 1.54^{a}	9.56 ± 1.65^{b}	nd	nd
13	36.848	紫苏酸甲酯	26460-67-3	1 390/1 398	$C_{11}H_{16}O_2$		nd	nd	nd	nd	10.96 ± 1.95^{a}	12.20 ± 1.35^{a}	nd	nd
合计		酯类（7）					288.14 ± 11.58^{d}	472.35 ± 6.22^{c}	478.48 ± 37.24^{c}	456.95 ± 17.41^{c}	573.74 ± 15.14^{b}	574.42 ± 22.72^{b}	775.15 ± 41.64^{a}	470.38 ± 7.42^{c}
14	24.009	1,2,4,5-四甲基苯	95-93-2	1 115/1 116	$C_{10}H_{14}$	腐臭的、甜的	nd	26.62 ± 2.14^{b}	15.37 ± 3.08^{de}	21.11 ± 3.04^{c}	18.29 ± 3.73^{cd}	12.51 ± 1.97^{e}	32.30 ± 1.28^{a}	21.10 ± 4.08^{c}
15	25.575	1,2,3,4-四甲基苯	488-23-3	1 146/1 145	$C_{10}H_{14}$		nd	23.41 ± 4.01^{a}	12.82 ± 1.98^{c}	18.31 ± 3.08^{b}	15.17 ± 2.95^{bc}	11.77 ± 2.92^{c}	27.76 ± 2.03^{a}	18.36 ± 2.49^{b}
16	27.058	萘	91-20-3	1 176/1 182	$C_{10}H_8$		nd	55.08 ± 3.10^{b}	37.92 ± 2.88^{e}	49.59 ± 2.36^{c}	45.94 ± 4.00^{cd}	36.36 ± 1.19^{e}	69.07 ± 1.06^{a}	44.65 ± 2.44^{d}
17	32.234	2-甲基萘	91-57-6	1 285/1 298	$C_{11}H_{10}$		nd	nd	8.90 ± 0.29^{b}	9.56 ± 0.55^{b}	12.64 ± 0.40^{a}	9.29 ± 0.48^{b}	nd	12.83 ± 2.09^{a}
合计		芳香烃类（4）					nd	105.11 ± 9.24^{b}	75.01 ± 7.40^{c}	98.57 ± 8.33^{b}	92.04 ± 10.24^{b}	69.92 ± 6.04^{c}	129.13 ± 2.51^{a}	96.93 ± 9.79^{b}
18	22.679	反式芳樟醇氧化物	34995-77-2	1 089/1 086	$C_{10}H_{18}O_2$	花香	nd	nd	18.01 ± 3.90^{bc}	13.28 ± 2.30^{c}	20.44 ± 5.77^{abc}	27.07 ± 6.77^{a}	20.96 ± 4.66^{ab}	14.64 ± 2.60^{b}
19	21.871	顺芳樟醇氧化物	5989-33-3	1 074/1 074	$C_{10}H_{18}O_2$	花香	nd	12.71 ± 1.07^{b}	12.43 ± 3.69^{b}	6.39 ± 0.31^{bc}	23.17 ± 10.60^{a}	29.90 ± 5.11^{a}	13.27 ± 2.67^{b}	11.24 ± 1.40^{b}

续表2

序号	保留时间/min	化合物	CAS 号	RI1/RI2	分子式	气味描述 *	含量/(μg·L^{-1})							
							Control	LP	LB	ST	LP+LB	LP+ST	LB+ST	LP+LB+ST
20	23.202	芳樟醇	78-70-6	1 099/1 099	$C_{10}H_{18}O$	柑橘	41.50 ± 2.81^{f}	275.43 ± 20.71^{b}	174.27 ± 27.17^{d}	106.07 ± 6.99^{e}	283.96 ± 28.96^{b}	401.22 ± 17.7^{3}a	218.47 ± 22.56^{c}	232.45 ± 8.63^{c}
合计		醇类（3）					41.50 ± 2.81^{f}	288.14 ± 21.58^{c}	204.71 ± 33.97^{d}	125.73 ± 8.85^{e}	327.57 ± 44.75^{b}	458.19 ± 29.12^{a}	252.70 ± 29.27^{c}	258.33 ± 12.52^{c}
21	17.475	6-甲基-5-庚烯-2-酮	110-93-0	990/986	$C_8H_{14}O$	柠檬	nd	25.57 ± 0.98^{c}	19.79 ± 1.42^{d}	25.96 ± 0.32^{c}	30.33 ± 3.31^{ab}	27.30 ± 4.01^{bc}	33.41 ± 1.24^{a}	29.81 ± 3.06^{abc}
22	24.352	异佛尔酮	78-59-1	1 122/1 124	$C_9H_{14}O$	樟脑、薄荷	30.08 ± 1.69^{c}	114.78 ± 9.44^{b}	130.38 ± 17.74^{b}	118.28 ± 10.66^{b}	137.13 ± 17.36^{b}	133.29 ± 13.87^{b}	165.65 ± 14.97^{a}	114.51 ± 6.34^{b}
合计		酮类（2）					30.08 ± 1.69^{d}	140.35 ± 9.96^{c}	150.17 ± 17.37^{bc}	144.23 ± 10.76^{bc}	167.46 ± 17.24^{b}	160.60 ± 16.65^{bc}	199.06 ± 14.75^{a}	144.32 ± 7.55^{bc}
23	23.399	壬醛	124-19-6	1 103/1 104	$C_9H_{18}O$	脂肪、花香	nd	3.96 ± 0.11^{d}	9.34 ± 0.72^{b}	6.52 ± 1.59^{c}	6.46 ± 0.51^{c}	nd	16.81 ± 3.35^{a}	5.44 ± 0.30^{cd}
24	28.742	2,5-二甲基苯甲醛	5779-94-2	1 210/1 208	$C_9H_{10}O$		nd	111.49 ± 16.77^{e}	213.23 ± 25.42^{ae}	83.71 ± 3.92^{f}	150.49 ± 3.69^{bc}	124.72 ± 8.27^{de}	166.97 ± 13.21^{b}	141.21 ± 3.76^{cd}
合计		醛类（2）					nd	115.45 ± 16.75^{e}	222.57 ± 25.94^{a}	90.23 ± 5.48^{f}	156.94 ± 3.18^{c}	124.72 ± 8.27^{de}	183.78 ± 15.76^{b}	146.65 ± 3.75^{cd}
25	41.683	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	1 511/ 1 519	$C_{14}H_{22}O$		nd	46.13 ± 1.37^{b}	38.86 ± 1.61^{c}	35.66 ± 1.41^{c}	47.30 ± 6.58^{b}	36.72 ± 0.53^{c}	62.25 ± 2.21^{a}	45.24 ± 1.87^{b}
合计		酚类（1）					nd	46.13 ± 1.3^{7}b	38.86 ± 1.61^{c}	35.66 ± 1.41^{c}	47.30 ± 6.58^{b}	36.72 ± 0.53^{c}	62.25 ± 2.21^{a}	45.24 ± 1.87^{b}
26	36.196	S-甲基-N,N-二乙基二硫代氨基甲酸	686-07-7	1 375/1 357	$C_6H_{13}NS_2$		nd	nd	10.50 ± 0.70^{ab}	7.96 ± 0.53^{c}	9.78 ± 0.31^{b}	11.42 ± 1.20^{a}	nd	nd
合计		其他（1）					nd	nd	10.50 ± 0.70^{ab}	7.96 ± 0.53^{c}	9.78 ± 0.31^{b}	11.42 ± 1.20^{a}	nd	nd

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（$P<0.05$）；RI1 为实验检测计算值；RI2 为文献报道值，来源于 NIST 17 库；“nd”表示未检出；* 所有物质的气味描述来自“The Good Scents Company”和“Flavor Ingredient Library”。

芳樟醇是未发酵龙眼果汁中唯一的醇类物质，呈现典型柑橘香。发酵后其含量显著提升，其中 LP+ST 组含量最大（401.22 μg·L^{-1}），LP+LB 组（283.96 μg·L^{-1}）次之，LP+LB+ST 组（232.45 μg·L^{-1}）居中，ST 组（106.07 μg·L^{-1}）最小。芳樟醇含量的增加可能源于以下双重代谢途径[2]：（1）糖苷水解：乳酸菌通过增强 *β*-葡萄糖苷酶活性，促进结合态芳樟醇糖苷的水解释放游离芳樟醇；（2）单萜烯转化：发酵过程促进了单萜烯向芳樟醇的转化，这与单萜烯含量减少趋势一致。此外，发酵还新检出少量的呋喃型芳樟醇氧化物异构体：反式 / 顺式芳樟醇氧化物，两者均具特征性花香。乳酸菌发酵对芳樟醇及其氧化物的促进作用在佛手瓜发酵中已有报道[25]。在茶叶加工领域的研究表明，芳樟醇可通过 6,7-环氧芳樟醇中间体的重排反应生成芳樟醇氧化物，且酸性条件有助于 6,7-环氧芳樟醇向呋喃型芳樟醇氧化物的转化[26]，这与乳酸菌发酵的产酸特性相符。

酯类作为关键风味物质，其低香气阈值对水果风味的形成至关重要[27]。本研究发现，龙眼果汁中酯类成分含量仅次于单萜烯类，共检出 7 种酯类物质，包括 4 种苯型化合物（C6-C1 结构），2 种脂肪酸甲酯（2-己烯酸甲酯、香叶酸甲酯）及 1 种单萜烯酸甲酯（紫苏酸甲酯）。与未发酵组相比，发酵组新增了 4 种酯类：苯甲酸乙酯（花香、果香）、甲基-4-氯苯甲酸甲酯、香叶酸甲酯（花香、绿色植物和果香）和紫苏酸甲酯。其中，苯甲酸乙酯和甲基-4-氯苯甲酸甲酯仅在未发酵组和 LP 组中未检出；香叶酸甲酯仅在 ST、LP+LB 和 LP+ST 组中检出，而紫苏酸甲酯则仅在 LP+LB 和 LP+ST 组中检出，表明复合发酵（LP+LB 和 LP+ST 组）提升了酯类多样性。水杨酸甲酯是各处理组的主要酯类，乳酸菌发酵显著提高了龙眼果汁中酯类含量，尤其是水杨酸甲酯（由 224.75 μg·L^{-1} 增至 354.28~610.43 μg·L^{-1}），其中二元复合菌组（尤其是 LB+ST 组：610.43 μg·L^{-1}）的增幅最大，单菌和三元复合菌组（374.77 μg·L^{-1}）的增幅相当。代谢途径分析表明，这些酯类前体化合物来自三条代谢通路：（1）苯甲酸通过芳香氨基酸苯丙氨酸的莽草酸途径产生[28]；（2）脂肪酸由多不饱和脂肪酸经脂氧合酶途径分解产生[28]；（3）单萜烯酸源自单萜烯类的氧化代谢[29]。此外，氨基酸代谢为各类醇的形成提供底物[28]。由此可见，乳酸菌发酵通过调控氨基酸、脂肪酸和单萜烯的代谢改变了龙眼果汁的酯类组成和风味特征。

酮类化合物作为重要的挥发性风味物质，主要通过氨基酸降解和脂肪酸 *β*-氧化途径形成[30]。此外，单萜烯氧化也可产生酮类[31]。未发酵组仅含异佛尔酮（樟脑、薄荷），发酵后其含量显著增加，并新增了一种酮类物质——6-甲基-5-庚烯-2-酮。该物质在乳酸菌发酵山楂汁中被检出，其具有类似柠檬草的香气，是山楂特征香气物质[11]。在各发酵体系中，除 LB+ST 组的酮类物质含量（199.06 μg·L^{-1}）显著高于其他组外，其余组间差异不大。

醛类（壬醛、2,5-二甲基苯甲醛）、芳香烃类（1,2,4,5-四甲基苯、1,2,3,4-四甲基苯、萘和 2-甲基萘）、酚类（2,4-二叔丁基苯酚）和含硫化合物（S-甲基-N,N-二乙基二硫代氨基甲酸）是发酵龙眼果汁新增的挥发性物质。其中，壬醛（脂肪、花香）、2,5-二甲基苯甲醛、2,4-二叔丁基苯酚和 1,2,3,4-四甲基苯在乳酸菌发酵银杏果仁汁中也有检出，且 2,5-二甲基苯甲醛对其风味有重要影响[32]。关于 2,4-二叔丁基苯酚的来源，已有文献表明乳酸菌可通过非氧化脱羧途径将酚酸转化为 4-乙烯基酚类，并进一步还原为 4-乙基酚类，此类烷基酚类化合物是发酵食品风味的重要组成部分[33]。

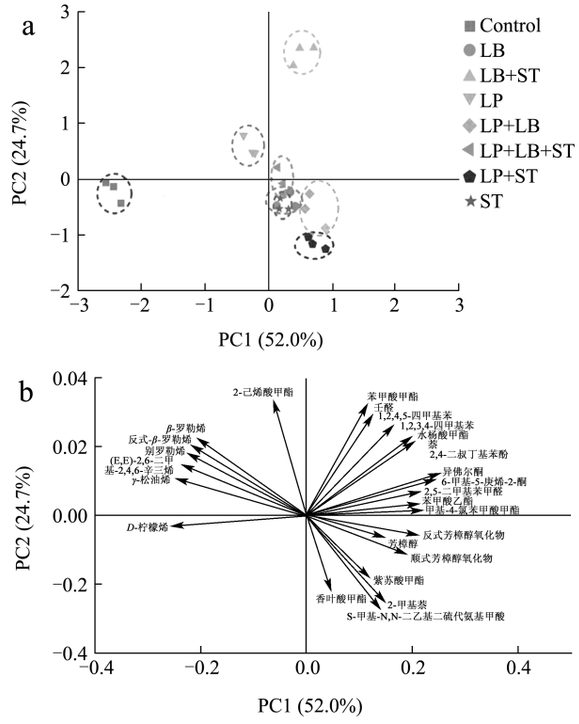


图 3 不同乳酸菌发酵龙眼果汁中挥发性化合物的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of volatile compounds in longan juice fermented by different lactic acid bacteria

注：（a）得分图；（b）载荷图。

为进一步评价不同乳酸菌发酵对龙眼果汁挥发性组分的影响，对 GC-MS 数据（表 2）进行了主成分分析（图 3）和聚类热图（图 4）分析。PCA 结果显示（图 3a），PC1 和 PC2 累计贡献率达 76.7%，可代表挥

发性化合物中的主要信息。各发酵组在图 3a 中呈现明显的区域分布，表明发酵显著改变了龙眼果汁的挥发性成分特征。载荷图（图 3b）显示，PC1 主要贡献物质为 6-甲基-5-庚烯-2-酮、2,5-二甲基苯甲醛、芳樟醇及其氧化物、苯甲酸乙酯和 2,4-二叔丁基苯酚（正载荷）和单萜烯类（负载荷），结合图 3a 可知这些化合物是区分发酵与未发酵果汁的关键组分。具体而言，未发酵组以单萜烯类为主，发酵组则富含酮、醛、醇、酯、酚、芳香烃类等物质，三元复合菌组接近原点，提示各化合物处于相对平衡的水平。PC2 则由苯甲酸甲酯、2-己烯酸甲酯和壬醛（正载荷）和 S-甲基-N,N-二乙基二硫代氨基甲酸、2-甲基萘、香叶酸甲酯和紫苏酸甲酯（负载荷）主导，是区分 LB+ST 和 LP+ST 组的关键化合物。

在聚类热图（图 4）中，红色越深代表化合物相对含量越高，蓝色越深则代表化合物相对含量越低。由图 4 可知，各处理组挥发性物质组成差异显著。与 PCA 结果一致，乳酸菌发酵显著增加了非单萜烯类化合物的种类和含量，尤其是二元复合菌组。其中，LB+ST 组对水杨酸甲酯、苯甲酸甲酯、2-己烯酸甲酯、6-甲基-5-庚烯-2-酮和壬醛等化合物的增幅最为显著；而 LP+LB 和 LP+ST 组则对芳樟醇及其氧化物、紫苏酸甲酯等单萜烯类衍生物的增幅最强。

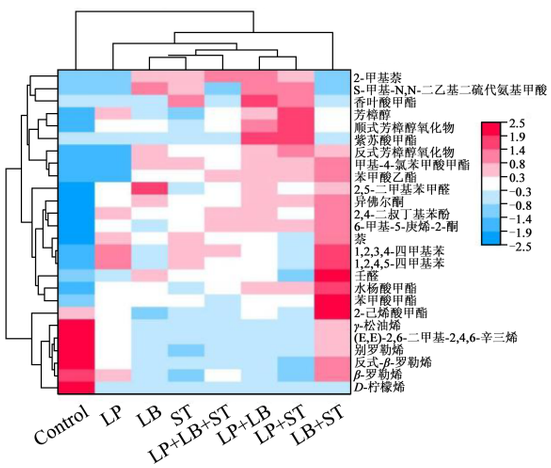


图 4 不同乳酸菌发酵龙眼果汁挥发性化合物的聚类热图

Fig.4 Cluster heatmap of volatile compounds in longan juice fermented by different lactic acid bacteria

2.3 不同乳酸菌发酵龙眼果汁中挥发性化合物的GC-IMS分析

本研究还采用 GC-IMS 分析不同乳酸菌发酵龙眼果汁的低分子量挥发性组分，并通过离子迁移指纹图谱（图 5）和聚类热图（图 6）分析各组差异。在图 5 中，每一行代表一个样品，每一列代表一种化合物在不同样品中的相对强度，颜色深浅反映了挥发性物质的含量，红色越深，含量越高。数字代表未鉴定出的化合物。由图 5 可知，不同组共鉴定出 38 种化合物。包括 8 种酮类，9 种醇类，7 种酯类，6 种醛类，3 种单萜烯类，2 种酸类和 3 种其他类。在图 6 中，红色越深代表化合物相对含量越高，蓝色越深则代表化合物相对含量越低。由图 5 和图 6 可知，未发酵龙眼果汁相比不同乳酸菌发酵组含有较高的 2-己烯醛、反式-2-庚烯醛，它们会引起果汁呈现一种脂肪味和变质的风味，这与前人研究的发酵西瓜汁检出更低浓度的 2-己烯醛结果一致[34]。醛类含量直接影响食品风味，进而影响消费者对其接受度[35]。乳酸菌发酵组中酮类风味物质（如 2,3-丁二酮、2,3-戊二酮和 2-庚酮）的相对含量高于未发酵组，尤其是 LB+ST 组，这些化合物分别贡献了典型的奶油香（2,3-丁二酮）、焦糖坚果香（2,3-戊二酮）及清新果香（2-庚酮）。这与李可等[36]的报道相一致，其研究发现经植物乳杆菌发酵的猕猴桃汁中 2-庚酮含量较未发酵果汁显著降低。值得注意的是，ST 组相比其他组存在显著差异，其醇类化合物（2,3-丁二醇、1-戊醇、2-戊醇和 3-甲基-2-丁醇）与单萜烯（α-蒎烯和 β-蒎烯）含量高于其他组，这些挥发性物质在较高浓度时易产生刺激性气味[13]。

为进一步探究不同乳酸菌发酵龙眼果汁中挥发性化合物的差异，采用 PLS-DA 模型进行分析，并以 VIP 值作为筛选标准，评估各化合物是否对龙眼果汁风味的贡献程度。所建立的 PLS-DA 模型的累积 R^2 和 Q^2 分别为 0.91 和 0.88，表明该模型具有良好的预测能力。VIP 值越大，表明该化合物对组间分离的贡献越大[37]。如图 7 所示，共有 12 种挥发性成分的 VIP 值＞1，分别为 2-己烯醛单聚体、2-甲基四氢呋喃-3-酮二聚体、4-甲基-2-戊醇、2-己烯醛二聚体、反式-2-戊烯醛单聚体、1-戊烯 -3- 酮二聚体、β-蒎烯二聚体、乙酸乙酯、水杨酸甲酯、3-戊酮二聚体、2-戊醇二聚体、2-戊醇单聚体和反式-2-戊烯醛二聚体等多种挥发性成分。这些化合物是构成不同乳酸菌发酵条件下龙眼果汁特征风味的关键挥发性化合物。

本研究表明，乳酸菌发酵对果汁风味的影响与菌种密切相关。综上，乳酸菌发酵通过增加酮、醇、单萜烯（α-蒎烯和 β-蒎烯）等物质，降低 2-己烯醛和反式-2-庚烯醛等异味成分，从而改善龙眼果汁的风味，为高品质发酵龙眼果汁的开发提供了参考。

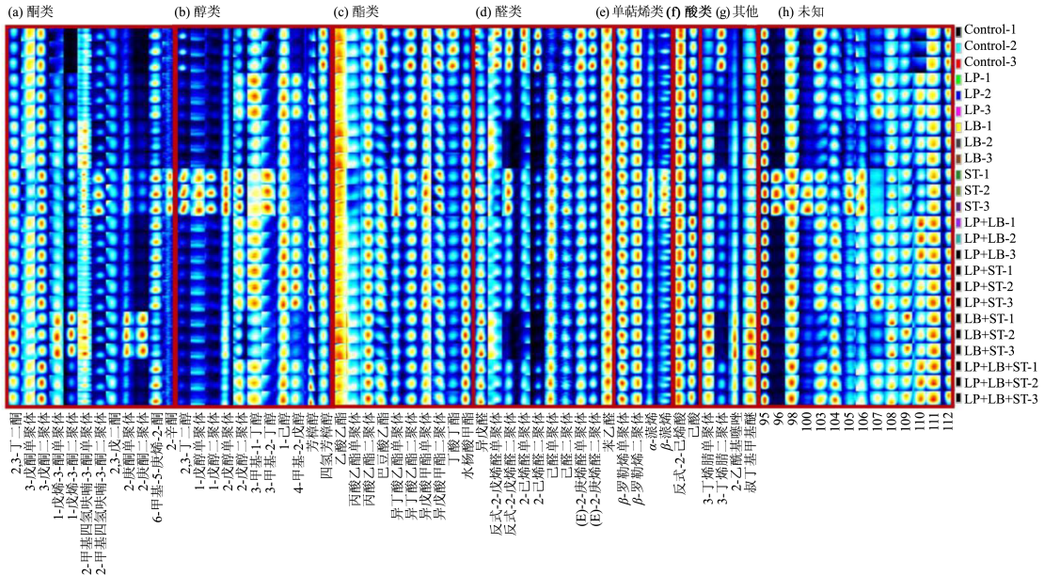


图 5 不同乳酸菌发酵龙眼果汁挥发性化合物的指纹谱图

Fig.5 Fingerprint spectra of volatile compounds in longan juice fermented by different lactic acid bacteria

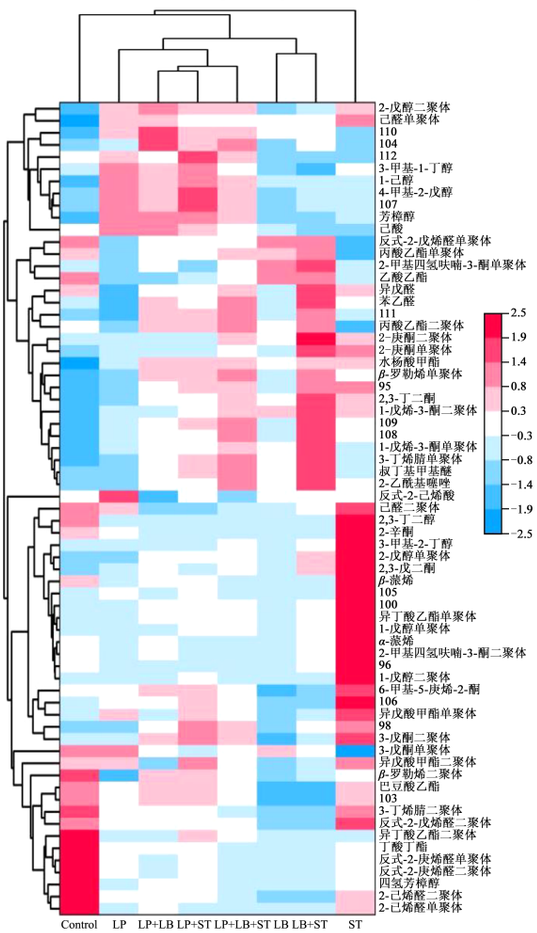


图 6 基于 GC-IMS 不同乳酸菌发酵龙眼果汁挥发性化合物的聚类热图

Fig.6 Cluster heatmap of volatile compounds in longan juice fermented by different lactic acid bacteria based on GC-IMS

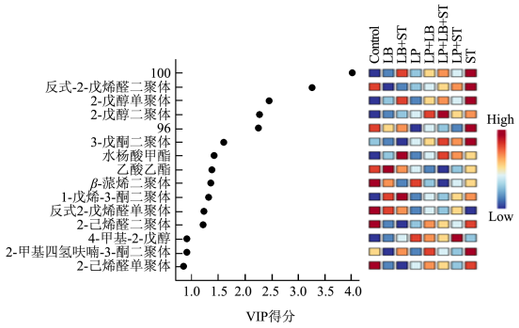


图 7 PLS-DA 分析中 VIP 得分图

Fig.7 VIP score plot of PLS-DA analysis

3 结论

本研究采用植物乳植杆菌、保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌及其不同组合发酵龙眼果汁，以未发酵果汁为对照，测定各组的活菌数、pH 值、总酸、可溶性固形物、还原糖和总酚，并对其挥发性组分进行 GC-MS 和 GC-IMS 分析。研究发现三元复合菌组（LP+LB+ST）活菌数增长最显著（为 8.80 log CFU/mL）和总酚保留率最高（为 91.71%），植物乳植杆菌主导糖类代谢与酸度提升；发酵显著增加酮、醛、醇、酯等挥发性化合物，二元复合菌组新增挥发性成分最丰富（尤其是 LP+LB 组，新增 15 种），并降低单萜烯类化合物（反式-*β*-罗勒烯、别罗勒烯、*β*-罗勒烯、(E,E)-2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯、*γ*-松油烯和 *D*-柠檬烯）以及如 2-己烯醛和反式-2-庚烯醛等异味成分。综上，乳酸菌发酵在一定程度上改善了龙眼果汁的品质与风味，本研究可为乳酸菌在龙眼果汁发酵中的应用提供参考，但其复合发酵体系中的风味形成机制仍需深入探究。

参考文献

[1] ZHANG X, GUO S, HO C T, et al. Phytochemical constituents and biological activities of longan (*Dimocarpus longan* Lour.) Fruit: a review [J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(2): 95-102.

[2] SAUD S, XIAOJUAN T, FAHAD S. The consequences of fermentation metabolism on the qualitative qualities and biological activity of fermented fruit and vegetable juices [J]. Food Chemistry-X, 2024, 21: 101209.

[3] 孙逊,李菲,张雨,等.发酵果蔬汁的发酵方式、生物活性及品质改善研究进展[J].食品工业科技,2023,44(19):471-480.

[4] HASHEMI S M B, JAFARPOUR D. Fermentation of bergamot juice with *Lactobacillus plantarum* strains in pure and mixed fermentations: Chemical composition, antioxidant activity and sensorial properties [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109803.

[5] LIZARDO R C M, CHO H D, WON Y S, et al. Fermentation with mono- and mixed cultures of *Lactobacillus plantarum* and *L. casei* enhances the phytochemical content and biological activities of cherry silverberry (*Elaeagnus multiflora* Thunb.) fruit [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(9): 3687-3696.

[6] 张璐,梁锦,黄天姿,等.单一及混合益生菌发酵猕猴桃果汁的香气成分分析[J].食品科学,2021,42(24):213-220.

[7] ZHAO M N, ZHANG F, ZHANG L, et al. Mixed fermentation of jujube juice (*Ziziphus jujuba* Mill.) with *L.rhamnosus* GG and *L.plantarum*-1: effects on the quality and stability [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(8): 2624-2631.

[8] 冉玉兵,刘磊,张名位,等.乳酸菌发酵对龙眼果浆中糖和酚类物质的影响[J].现代食品科技,2017,33(8):116-122.

[9] 肖海辉,杨淑婷,苏艺,等.龙眼馅料发酵前后营养成分及挥发性风味物质的变化[J].中国食品添加剂,2023,34(8):294-301.

[10] 卢嘉懿,张驰,李汴生,等.乳酸菌发酵对荔枝汁中γ-氨基丁酸含量的影响[J].食品与发酵工业,2018,44(12):97-102.

[11] 黄豪,周义,陈佳慧,等.乳酸菌发酵对山楂汁理化性质、酚类化合物、抗氧化性及风味的影响[J].食品科学,2022,43(10):97-106.

[12] GB 12456-2021,食品安全国家标准 食品中总酸的测定[S].

[13] 刘秋豆.益生菌发酵芒果汁的研制及其理化性质分析[D].武汉:华中农业大学,2019.

[14] 田真,张萌,王银,等.基于顶空气相色谱-离子迁移谱对不同品种猕猴桃果汁的香气指纹表征[J].食品与发酵工业,2023,49(1):279-287.

[15] URCAN A C, CRISTE A D, BOBIS O, et al. Evaluation of functional properties of some lactic acid bacteria strains for probiotic applications in apiculture [J]. Microorganisms, 2024, 12(6): 1249.

[16] JAISWAL A K, ABU-GHANNAM N. Kinetic studies for the preparation of probiotic cabbage juice: Impact on phytochemicals and bioactivity [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 50: 212-218.

[17] 刘倩,袁越,张杰,等.不同菌种发酵对诺丽果酵素的抗氧化性及风味物质的影响[J].食品工业科技,2023,44(4):129-137.

[18] LIAO W, SHEN J, MANICKAM S, et al. Investigation of blueberry juice fermentation by mixed probiotic strains: Regression modeling, machine learning optimization and comparison with fermentation by single strain in the phenolic and volatile profiles [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134982.

[19] ARIOLI S, DELLA SCALA G, REMAGNI M C, et al. *Streptococcus thermophilus* urease activity boosts *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* homolactic fermentation [J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 242: 78-85.

[20] 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.

[21] 刘晓翠,王海鸥,曹永,等.不同乳酸菌复配发酵对石榴汁品质指标的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(15):108-114.

[22] 汪浩.龙眼乳酸菌发酵过程中主要成分分析及其饮料研制[D].福州:福建农林大学,2019.

[23] GAO C, WANG R, ZHANG F, et al. The process monitors of probiotic fermented sour cherry juice based on the HS-GC-IMS [J]. Microchemical Journal, 2022, 180: 107537.

[24] PETASCH J, DISCH E-M, MARKERT S, et al. The oxygen-independent metabolism of cyclic monoterpenes in *Castellaniella defragrans* 65Phen [J]. BMC Microbiology, 2014, 14(1): 164.

[25] SHANG Z, YE Z, LI M, et al. Dynamics of microbial communities, flavor, and physicochemical properties of pickled chayote during an industrial-scale natural fermentation: correlation between microorganisms and metabolites [J]. Food Chemistry, 2022, 377: 132004.

[26] 方仕茂,俞李沙,朱旭君,等.茶叶中芳樟醇代谢及其调控机制研究进展[J].南京农业大学学报,2025,48(3):505-514.

[27] ESMAEILZADEH P, EHSANI M R, MIZANI M, et al. Characterization of a traditional ripened cheese, Kurdish Kope: Lipolysis, lactate metabolism, the release profile of volatile compounds, and correlations with sensory characteristics [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(8): 3303-3321.

[28] MOSTAFA S, WANG Y, ZENG W, et al. Floral scents and fruit aromas: Functions, compositions, biosynthesis, and regulation [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 860157.

[29] DUDAREVA N, KLEMPIEN A, MUHLEMANN J K, et al. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds [J]. New Phytologist, 2013, 198(1): 16-32.

[30] MEI S, CAO Y, ZHANG G, et al. Construction of sensory/mass spectrometry feedback platform for seeking aroma contributors during the aroma enhancement of congou black tea [J]. Plants, 2022, 11(6): 823.

[31] 邵齐.乳酸菌发酵果蔬浆加工及藏期间品质的变化研究[D].南昌:南昌大学,2018.

[32] YANG J, SUN Y, CHEN J, et al. Fermentation of ginkgo biloba kernel juice using *Lactobacillus plantarum* Y2 from the ginkgo peel: Fermentation characteristics and evolution of phenolic profiles, antioxidant activities *in vitro*, and volatile flavor compounds [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1025080.

[33] ADAMU H A, IQBAL S, CHAN KW, et al. Biotransformation of ferulic acid to 4-vinyl guaiacol by *Lactobacillus farciminis* [J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(5): 1177-1184.

[34] MANDHA J, SHUMOY H, DEVAERE J, et al. Effect of lactic acid fermentation of watermelon juice on its sensory acceptability and volatile compounds [J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129809.

[35] WANG J, WEI B C, WANG X, et al. Aroma profiles of sweet cherry juice fermented by different lactic acid bacteria determined through integrated analysis of electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1113594.

[36] 李可,朱永清,邬应龙,等.基于GC-IMS解析植物乳杆菌发酵对猕猴桃果汁挥发性物质的影响[J].现代食品科技,2022,38(5):254-260,182.

[37] LAN X, PAAN X, LUO J, et al. Integrative flavoromics-GC-MS/IMS approach to study the formation mechanism of fishy flavor in skipjack tuna oil induced by oxidation and heat [J]. Food Chemistry: X, 2025, 28: 102577.