郑家英, 李语诺, 梁高泽, 等. 不同乳酸菌发酵对白桦树汁营养成分及挥发性化合物的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 301−314. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030035

ZHENG Jiaying, LI Yunuo, LIANG Gaoze, et al. Effects of Different Lactic Acid Bacteria Fermentation on Nutritional Composition and Volatile Components of Birch Sap[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 301−314. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030035

· 分析检测 ·

不同乳酸菌发酵对白桦树汁营养成分及挥发性化合物的影响

郑家英[1,2], 李语诺[1,2], 梁高泽[1,2], 文　慧[2], 张卫东[3], 赵宏远[3], 许延伸[3], 王晓楠[1,2], 付玉杰[1,2], 朱保庆[1,2,*]

（1.林业食品加工与安全北京市重点实验室, 北京 100083;
2.北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083;
3.黑龙江省大兴安岭加格达奇林业局, 黑龙江加格达奇区 165002）

摘　要: 本研究旨在系统评估乳酸菌发酵对白桦树汁营养成分和挥发性化合物的影响，以期为开发白桦树汁发酵产品的菌株选择提供科学依据。选取 8 株不同乳酸菌，分别对不同时期采集的白桦树汁进行发酵处理，系统分析发酵前后白桦树汁的理化指标、抗氧化性、氨基酸组成以及挥发性化合物的变化情况。结果表明，不同时期采集的白桦树汁存在化学成分差异，前期白桦树汁具有更高的糖和酸，以及更为丰富的挥发性化合物，而后期白桦树汁拥有较高含量的风味氨基酸。8 种乳酸菌在白桦树汁中表现出良好的生长代谢能力。经菌株发酵后，白桦树汁 pH、还原糖含量减少，总酸含量增加，抗氧化能力提高。通过高效液相色谱分析氨基酸组成，白桦树汁发酵后共检测到 21 种氨基酸，前期白桦树汁发酵后甜味、苦味氨基酸含量都有增加，而后期发酵后甜味氨基酸减少，苦味氨基酸无明显变化。使用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术分析挥发性化合物组成，白桦树汁发酵后共检测到 46 种挥发性化合物，其种类和含量显著增加。不同时期采集的白桦树汁在发酵后的品质变化存在显著差异。前期采集的白桦树汁发酵后总酸含量、还原糖含量、氨基酸和挥发性化合物组成变化都更为显著。主成分分析显示，发酵前后的白桦树汁具有显著的品质差异。综上，乳酸菌发酵能够提升白桦树汁风味品质，且植物乳植杆菌 BB16 被认为是最佳发酵菌株。

关键词: 白桦树汁, 乳酸菌, 抗氧化活性, 氨基酸, 挥发性化合物

中图分类号: TS201.3; TS275.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0301−14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030035

本文网刊:

Effects of Different Lactic Acid Bacteria Fermentation on Nutritional Composition and Volatile Components of Birch Sap

ZHENG Jiaying[1,2], LI Yunuo[1,2], LIANG Gaoze[1,2], WEN Hui[2], ZHANG Weidong[3], ZHAO Hongyuan[3], XU Yanshen[3], WANG Xiaonan[1,2], FU Yujie[1,2], ZHU Baoqing[1,2,*]

（1.Beijing Key Laboratory of Forestry Food Processing and Safety, Beijing 100083, China;
2.College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3.Heilongjiang Da Hinggan Ling Jiagedaqi Forestry Bureau, Jiagedaqi District 165002, China）

Abstract: This study aimed to systematically evaluate the impact of lactic acid bacteria fermentation on the nutritional composition and flavor quality of birch sap, providing a scientific basis for the selection of strains for fermented birch sap. Eight distinct strains of lactic acid bacteria were selected to ferment birch sap collected at various intervals. The study comprehensively analyzed alterations in physicochemical properties, antioxidant activity, amino acid composition, and

收稿日期: 2025−03−05

基金项目: 北京林业大学“5.5 工程”科研创新团队项目（BLRC2023A01）。

作者简介: 郑家英（2002−）, 女, 本科, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 554968948@qq.com。

*** 通信作者:** 朱保庆（1982−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: zhubaoqing@bjfu.edu.cn。

volatile compounds of birch sap before and after fermentation. Results indicated chemical composition disparities in birch sap collected at different times, with early sap exhibiting higher sugar and acid levels, a more diverse array of volatile compounds, yet lower content of flavor amino acids compared to the late birch sap. The eight strains had good growth and metabolism in birch sap. After fermentation by the strains, the pH and reducing sugar content of birch sap decreased, while the total acid content increased. The antioxidant capacity of birch sap was enhanced. Through analysis using high-performance liquid chromatography, a total of 21 amino acids were detected in fermented birch sap. After fermentation, both sweet and bitter amino acid levels rose in early birch sap, contrasting with a decline in sweet amino acids and relatively stable bitter amino acid levels in late birch sap. The composition of volatile compounds was analyzed using headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry. A total of 46 volatile compounds were detected in birch sap, with both the variety and quantity of volatile compounds experiencing significant enhancement post-fermentation. Notable variations in quality transformations were observed in birch sap collected at different time points following fermentation. The changes in total acid content, reducing sugar content, amino acid composition, and volatile compounds of fermented birch sap collected in early sap were more significant. Principal component analysis revealed distinct quality differences between fermented and unfermented birch sap. A comprehensive review shows that lactic acid bacteria fermentation can enhance the flavor quality of birch sap, and *Lactiplantibacillus plantarum* BB16 is considered the optimal fermentation strain.

Key words: birch sap; lactic acid bacteria; antioxidant activity; amino acids; volatile compounds

白桦树汁是白桦树干中流出的汁液，透明无色或略带微黄，具有淡淡的桦树清香。它含有多种对人体有益的营养成分，如矿物质、维生素、氨基酸等，以及多种生物活性物质，如菸酸、香精油、桦芽酸、皂角甙化合物、赤霉素和细胞分裂素等，被誉为“人类健康的守护神”“森林滴露”[1]。白桦树汁不仅具有营养价值，还具有治疗胃肠道、缓解痛风、抗菌消炎、增强免疫功能等多种功能活性[2]。然而其风味偏淡，保存期短，极大限制了白桦树汁产品的市场拓展[3]。

乳酸菌是一类可以代谢糖类产生乳酸的微生物，拥有改善肠道功能、调节免疫力和减轻炎症等多种功能，可以为人类提供健康益处[4]，在功能食品饮料中发挥着重要作用。乳酸菌发酵产生的有机酸、过氧化氢酶、抗真菌化合物等能够有效抑制腐败微生物，从而延长发酵产品的保质期[5]。此外，乳酸菌发酵还能改善或增强产品的风味，提高营养物质的生物利用度和增加生物活性化合物的含量[6−8]。已有研究表明乳酸菌发酵可以延长白桦树汁的贮藏期和改善其适口性[9]，但目前关于乳酸菌发酵对白桦树汁营养成分及挥发性化合物组成的影响研究仍较少。特别是对于发酵前后白桦树汁的品质变化，以及如何通过发酵技术提升其市场竞争力，尚缺乏系统的研究和分析。

大量研究表明，白桦树汁原料的化学成分受采集时间影响[10−11]。因此，本研究以前期、后期两个不同采集时期的白桦树汁为原料，选用 8 株不同乳酸菌进行发酵。通过系统比较不同处理下的理化指标、抗氧化性、氨基酸组成以及挥发性化合物组成，探究乳酸菌发酵对白桦树汁营养成分及挥发性化合物的影响，并筛选出发酵性能优良且能够提质增香的菌株。这一研究可为开发具有更高营养价值和风味品质的白桦树汁产品提供科学依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

白桦树汁　从大兴安岭桦树林采集而来，前期白桦树汁采集时间为 4 月 25 日至 5 月 1 日，后期白桦树汁采集时间为 5 月 8 日至 5 月 12 日；实验所用菌株植物乳植杆菌 BB16（*L. plantarum* BB16）、植物乳植杆菌 C10（*L. plantarum* C10）、植物乳植杆菌 B4（*L. plantarum* B4）、植物乳植杆菌 LB64（*L. plantarum* LB64）　来自实验室自主分离；干酪乳酪杆菌 MKS1（*L. casei*）、嗜酸乳杆菌 MKS2（*L. acidophilus*）　河北麦克斯工厂；类干酪乳酪杆菌 CI25（*L. paracasei* CICC24825）、鼠李糖乳酪杆菌 CI72（*L. rhamnosus* CICC21772）　中国工业微生物菌种保藏管理中心；葡萄糖标准品、酚酞、氢氧化钠、酒石酸钾钠、3,5 -二硝基水杨酸、苯酚、亚硫酸钠　上海麦克林生化科技有限公司；乙酸钠、三乙胺、异硫氰酸苯酯、正己烷　均为色谱级，上海麦克林生化科技有限公司；乙腈、甲醇　均为色谱级，上海霍尼韦尔贸易有限公司；ABTS 试剂盒、DPPH 试剂盒　苏州科铭生物技术有限公司；20 种天然氨基酸标准品　上海吉至生化科技有限公司；赖氨酸标准品　上海源叶生物科技有限公司；C_6~C_{24} 正构烷烃标准品、4-甲基-2-戊醇（内标）　美国 Sigma-Aldrich 公司。

H12221pH 计　意大利 HANNA 公司；HPX-9082MBE 恒温培养箱　上海博讯实业有限公司医疗设备厂；UV-3300 紫外可见分光光度计　上海美普达仪器有限公司；悟空 k2025 高效液相色谱仪　上海海能未来技术集团股份有限公司；Inertsil ODS-3 5 μm 色谱柱（4.6×250 mm）　日本 GL Sciences 公司；Thermo ISQ QD×TRACE 1300×GERSTEL ODP4 气质嗅闻联用仪（GC-MS-O）　美国 Thermo Fisher Scientific 公司；HP-Innowax 毛细管柱（60 m×0.25 mm×0.25 μm）　美国 J&W Scientific 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 发酵剂的制备　菌株活化参考 Wang 等[12] 的

方法，稍作修改。将−80 ℃ 下冷冻保藏的 8 株菌解冻至室温，分别接种至液体 MRS 培养基中，放置 37 ℃ 培养箱活化，每隔 12 h 传代一次，36 h 后离心除去培养基，用无菌生理盐水洗涤沉淀物 2 次，最后制备菌悬液作为乳酸菌发酵剂。

1.2.2　白桦树汁乳酸菌发酵　白桦树汁采集后将其在−20 ℃ 下冻存，常温化冻后将乳酸菌发酵剂以 6 lgCFU/mL 的接种浓度接种到白桦树汁中，于恒温培养箱中 30 ℃ 下发酵 48 h，发酵结束后离心除菌得到发酵样品，于−20 ℃ 下储存备用。将未接种菌株的白桦树汁分别置于−20 ℃ 冷冻和 30 ℃ 自然发酵 48 h，作为对照组 UFJ 和 NFJ。

1.2.3　活菌数的测定　使用平板计数法对乳酸菌计数。将发酵液用无菌生理盐水进行合适的梯度稀释，取 1 mL 稀释液加入到培养皿中，然后采用倾注法将 MRS 琼脂培养基加入到含有稀释样液的培养皿中，摇匀，凝固后放到 37 ℃ 培养箱中进行培养，48 h 后对菌落进行计数。

1.2.4　理化指标的测定　pH：pH 计测定；总酸：参考 GB/T 12456-2021《食品中总酸的测定》；还原糖：参考 NY/T 2742-2015《水果及制品可溶性糖的测定 3,5-二硝基水杨酸比色法》。

1.2.5　抗氧化能力的测定　采用 ABTS 试剂盒和 DPPH 试剂盒测定。

1.2.6　氨基酸组成的测定　采用高效液相色谱（High-Performance Liquid Chromatography，HPLC）分析氨基酸，参考实验室已建立的方法进行修改[13]。柱前衍生化：分别取氨基酸标品、待测样品、配制的混标 800 μL，加入 1 mol/L 三乙胺乙腈 400 μL，混匀后加入 0.1 mol/L 异硫氰酸苯酯乙腈 400 μL，混匀，密封避光保存 1 h 后加入 3.2 mL 正己烷，混匀，取下层液体经过有机滤头（0.22 μm），过滤至小瓶，待测。色谱条件：色谱柱为 Inertsil ODS-3 5 μm 色谱柱（4.6×250 mm）；柱温 35 ℃；进样量 10 μL；紫外检测器波长 254 nm；流动相 A 为乙酸钠缓冲盐溶液：乙腈（v/v 93∶7），流动相 B 为乙腈∶水（v/v 80∶20）；流速为 1.0 mL/min。洗脱梯度：0~30 min，A 为 100%；30.00~40.00 min，A 100%→85%；40.00~55.00 min，A 85%→84%；55.00~85.00 min，A 84%→66%；85.00~86.00 min，A 66%→0%；86.00~87.00 min，A 0%；87.00~87.10 min，A 0%→100%；87.10~93.00 min，A 100%。

定性定量分析：在相同的色谱条件下，对氨基酸标准品进行分析，将标准品保留时间与样品中氨基酸保留时间相比较，对样品中氨基酸种类进行鉴定。将氨基酸标准品逐步稀释 5~7 个浓度点，测定色谱峰，以峰面积为纵坐标，氨基酸浓度为横坐标，绘制标准曲线，根据标准曲线计算样品中的氨基酸浓度。

1.2.7　挥发性化合物组成分析　使用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry，HS-SPME-GC-MS）技术分析挥发性化合物，参考实验室已建立的方法[14]。在 15 mL 样品瓶中加入 5.0 mL 样品、1.0 g NaCl 和 10 μL 内标（0.20 g/L），用带有聚四氟乙烯隔垫的瓶盖密封后置于自动进样器上。样品瓶在 40 ℃ 振荡平衡 30 min后，将活化好的 2 cm 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头插入样品瓶的顶空部分，萃取顶空的香气物质 30 min。随后将萃取头插入到 GC 进样口，热解吸8 min，进样口温度 250 ℃。GC-MS 条件：色谱柱采用 HP-Innowax 毛细管柱（60 m×0.25 mm×0.25 μm）；载气为高纯氦气（>99.999%），流速 1.0 mL/min，不分流模式；升温程序：在 50 ℃ 保持 1 min，以 3 ℃/min 升温至 220 ℃，保持 5 min；质谱离子源为电子电离源（EI），电离能 70 eV；质量扫描范围 29~350 m/z；离子源温度 230 ℃。

定性定量分析：在相同色谱和质谱条件下，对 C_6~C_{24} 正构烷烃系列进行分析，用于计算挥发性化合物的保留指数（RI），公式见式（1）。通过与 NIST14 库中的质谱信息及保留指数的比较，对挥发性化合物进行鉴定[14]。按内标法定量测定挥发性化合物含量，将挥发性化合物与内标 4-甲基-2-戊醇的峰面积比乘以内标浓度表示各挥发性化合物的浓度（Cj）[15]，公式见式（2）。

$$RI = 100\left(\frac{\lg X_i - \lg X_n}{\lg X_{n+1} - \lg X_n} + n\right) \quad \text{式（1）}$$

式中：X_i 为目标化合物保留时间；X_n 和 X_{n+1} 为相邻两个正构烷烃的保留时间。

$$Cj = \frac{Aj \times Cis}{Ais} \times 1000 \quad \text{式（2）}$$

式中：Cj 为目标化合物浓度（mg/L）；Aj 为目标化合物峰面积；Ais 为内标峰面积；Cis 为内标浓度（g/L）。

1.3　数据处理

使用 SPSS 软件进行单因素方差分析（One-Way ANOVA），显著性水平设定为 P<0.05，表示差异显著；使用 TBtools 进行层次聚类分析并绘制热图；使用 Origin 2024 绘制图表；使用 XLSTAT 2019 进行主成分分析。

2　结果与分析

2.1　发酵后活菌数的变化

活菌数可以作为评估乳酸菌生长能力的一个重要参数，很大程度上反映了菌株在特定发酵环境中的适应性[16]。与接种时的活菌数 6 lgCFU/mL 相比，所有菌种活菌数在 48 h 后都至少增加了 1 个数量级，表明乳酸菌能够适应白桦树汁环境利用其营养物质进行生长代谢。由图 1 可知，两个时期的白桦树汁发酵后的样品中 BB16 的活菌数最高，可达

8.0 lgCFU/mL, 其次为 B4; 其他菌株的活菌数在 7.4~8.0 lgCFU/mL 之间, 而 MKS2 的活菌数最低, 前期白桦树汁中为 7.4 lgCFU/mL, 后期白桦树汁中为 7.6 lgCFU/mL。不同乳酸菌发酵白桦树汁表现出的生长差异, 表明菌株的生物学特性与白桦树汁的营养成分相互作用会显著影响发酵效果。

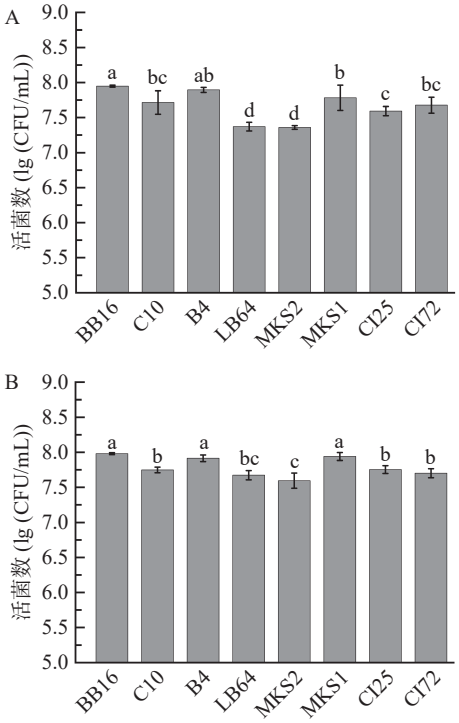


图 1 前期白桦树汁(A)、后期白桦树汁(B)发酵 48 h 后 8 株菌的活菌数

Fig.1 Viable cell counts of 8 strains after fermenting early birch sap (A) and late birch sap (B) for 48 hours

注: 不同字母表示差异显著(P<0.05), 图 2~图 3 同。

2.2 白桦树汁发酵前后理化指标变化

由图 2 可知, 两种白桦树汁发酵后均出现 pH、还原糖含量显著降低, 总酸含量显著升高的现象(P<0.05)。这是由于乳酸菌发酵过程中会消耗糖分产生有机酸, 从而导致 pH 下降[17]。白桦树汁的 pH 在不同菌株之间表现出显著差异, 前、后期未发酵样品 UFJ 的 pH 均显著高于发酵后的 pH(图 2A、图 2D)。同时总酸含量与 pH 的变化呈负相关, 这与 Chen 等[18] 的研究一致。

前期白桦树汁中 UFJ 的总酸含量为 0.036 g/L, 发酵后 BB16 处理的总酸含量最高, 为 0.630 g/L, 增加了 16 倍多, 其他菌株发酵的白桦树汁总酸含量也有不同程度的增加, 增加了 4~14 倍(图 2B)。这反映了不同菌株在产酸能力上的差异。后期白桦树汁中 UFJ 总酸含量为 0.014 g/L, 发酵后 BB16 处理的总酸含量最高为 0.299 g/L, 其余在 0.12~0.25 g/L 之间, 增加了 7~20 倍(图 2E), 其总酸含量增加幅度比前期白桦树汁组较高, 但含量却整体低于前期白桦树汁组。图 2C 显示, 前期采集白桦树汁还原糖含量约为 7 g/L, 随着发酵, 还原糖含量显著降低, 在 3~4.6 g/L 左右, 下降了 34%~57%。图 2F 显示, 后期采集白桦树汁中还原糖含量约为 4 g/L, 发酵后还原糖含量则为 2~3 g/L, 下降了 27%~53%, 其下降幅度及整体含量比前期白桦树汁组较低。糖降低是由于糖类转化为有机酸和发酵过程中乳酸菌的增殖[19]。

前期未发酵白桦树汁相比后期具有更高的糖和

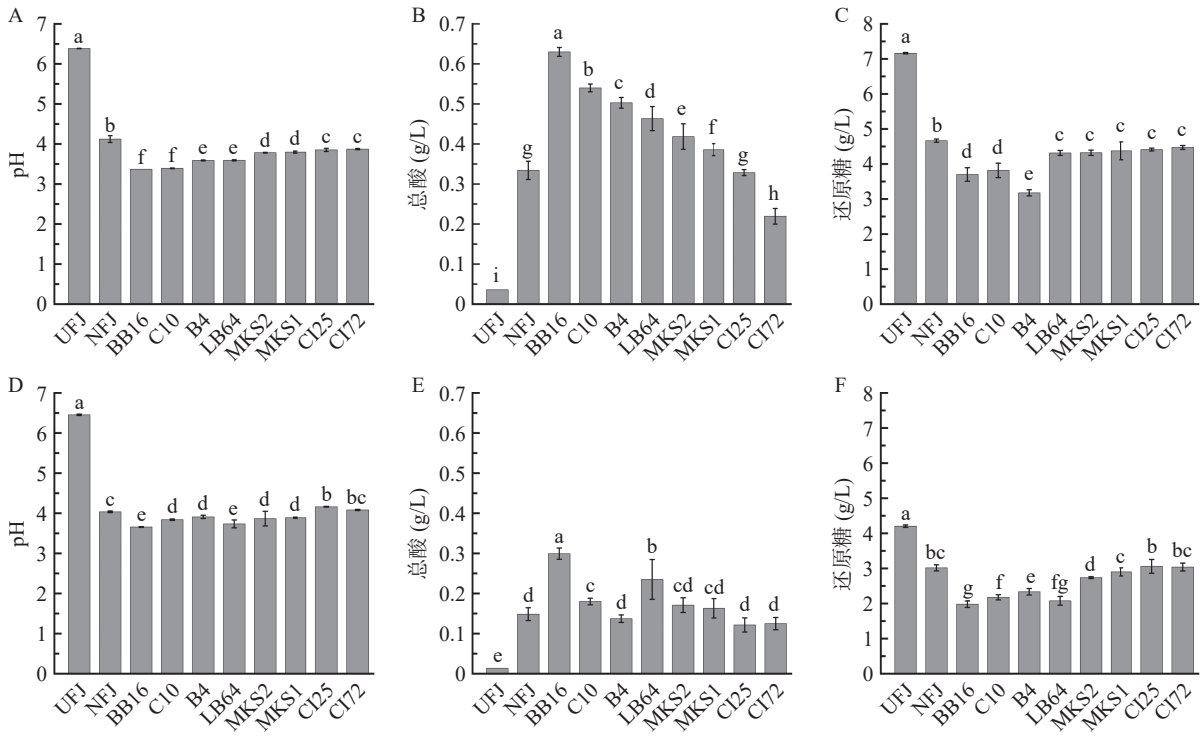


图 2 白桦树汁发酵前后的理化指标变化

Fig.2 Changes in physicochemical properties of birch sap before and after fermentation

注: 前期白桦树汁组: A.pH; B.总酸含量; C.还原糖含量; 后期白桦树汁组: D.pH; E.总酸含量; F.还原糖含量。

酸，主要是由于白桦树在萌芽期前的生理活动更为活跃，需要大量能量支持新芽的萌发和嫩叶的生长，导致糖类、有机酸等营养物质的积累。随着时间的推移，树木的生长进入旺盛阶段，大量消耗糖类和有机酸，导致后期白桦树汁中的糖和酸含量相对较低[20]。

2.3　白桦树汁发酵前后抗氧化能力变化

在评估抗氧化能力时，可通过测定样品对 $ABTS^+$ 自由基和 DPPH 自由基的清除效果来反映其抗氧化性能。由图 3 可知，两种白桦树汁发酵后清除自由基的能力均显著增强（$P<0.05$），与谭淇丹等[21] 的发现相一致。

在 $ABTS^+$ 自由基清除率中（图 3A、图 3C），两种白桦树汁发酵后均是 BB16 处理组清除率最高，经 BB16、B4 和 MKS1 发酵后的 $ABTS^+$ 自由基清除率高于自然发酵 NFJ 处理组。前期白桦树汁发酵后的清除率在 3%~13% 之间，后期为 5%~11% 之间。在 DPPH 自由基清除率中（图 3B、图 3D），前期白桦树汁中 LB64 处理的清除率最高，超过 20%，其他菌株处理的清除率在 15%~20% 之间。后期白桦树汁中 B4 处理的清除率最高 17%，其余样品的清除率在 15%~17% 之间。游颖等[22] 的研究中也由此发现，白桦树汁发酵后在清除 DPPH 自由基和抑制羟自由基能力方面显著提高。同时，不同菌株对不同白桦树汁的适应性差异会影响其发酵过程中的代谢活动，产生不同的抗氧化物质，进而导致不同处理组之间的抗氧化差异。

2.4　白桦树汁发酵前后氨基酸组成变化

2.4.1　氨基酸组成和总氨基酸含量的比较　在前期研究的基础上，优化建立了白桦树汁氨基酸组成分析方法，测定了 21 个氨基酸标准品并制作标准曲线（表 1）。在样品中共检测出 21 种氨基酸，其中未发酵白桦树汁中仅检测到 12 种氨基酸。在前期采集的白桦树汁的各处理组中，MKS1 和 CI25 氨基酸种类最多有 19 种；在后期组，NFJ 处理组和 CI25 处理

表 1　氨基酸标准品的线性关系

Table 1　Linear relationship of amino acid standards

氨基酸	线性关系	相关系数	线性范围（mg/mL）
谷氨酸	y=4407.2x+3.8879	0.9971	0.003125~0.1
谷氨酰胺	y=2508.3x+29.3400	0.9938	0.009375~0.3
精氨酸	y=5018.6x−12.6580	0.9944	0.003125~0.3
脯氨酸	y=6929.8x+1.4596	0.9989	0.0125~0.4
天冬氨酸	y=2267x+2.0722	0.9964	0.003125~0.1
天冬酰胺	y=2034.2x+6.8518	0.9986	0.009375~0.3
苏氨酸	y=4816.7x+1.6228	0.9999	0.003125~0.3
甲硫氨酸	y=5954.8x−12.219	0.9983	0.003125~0.3
异亮氨酸	y=4634.9x+6.9845	0.9996	0.003125~0.3
赖氨酸	y=32701x−63.3800	0.9989	0.003125~0.3
丙氨酸	y=7932.3x+9.1597	0.9987	0.015625~0.5
缬氨酸	y=5055.1x+0.4865	0.9984	0.009375~0.3
亮氨酸	y=4941.8x+2.4171	0.9997	0.003125~0.3
酪氨酸	y=3931.7x+3.4992	0.9986	0.009375~0.3
色氨酸	y=2106.7x+9.0194	0.9982	0.015625~0.5
苯丙氨酸	y=4100x+2.4106	0.9988	0.003125~0.3
丝氨酸	y=4933.9x+1.0603	0.9989	0.003125~0.1
半胱氨酸	y=6401.4x+4.7771	0.9992	0.003125~0.3
甘氨酸	y=7359.8x−0.4307	0.9988	0.003125~0.3
组氨酸	y=3310.9x−8.6375	0.9979	0.009375~0.3
胱氨酸	y=1462.7x+2.8902	0.9855	0.003125~0.3

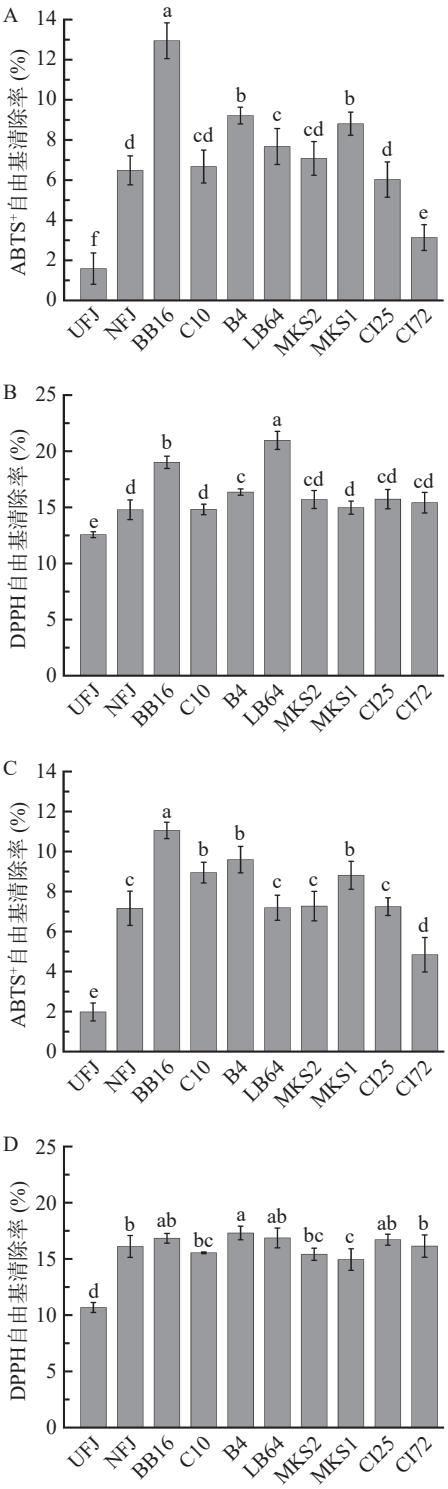


图 3　白桦树汁发酵前后的抗氧化活性变化

Fig.3　Changes in antioxidant activity of birch sap before and after fermentation

注：前期白桦树汁组：A.$ABTS^+$ 自由基清除率；B.DPPH 自由基清除率；后期白桦树汁组：C.$ABTS^+$ 自由基清除率；D.DPPH 自由基清除率。

组检出的氨基酸种类最多有 16 种。两个时期的白桦树汁发酵后氨基酸种类均增多，这是由于乳酸菌影响发酵基质中的代谢途径从而丰富了氨基酸的种类[23]。前期 UFJ 中氨基酸组成主要为组氨酸、异亮氨酸和半胱氨酸，总氨基酸含量为 78.28 μg/mL，发酵后均显著增加至 100 μg/mL 以上，其中 CI25 处理组中总氨基酸含量最高（269.55 μg/mL）（表 2）。后期 UFJ 中氨基酸组成主要为亮氨酸（105.15 μg/mL）、脯氨酸（98.04 μg/mL）和半胱氨酸（17.23 μg/mL），发酵后脯氨酸显著减少，甚至未检出，使得发酵后的样品中总氨基酸含量降低（表 3）。乳酸菌之间的蛋白酶类型和蛋白质水解活性存在差异[24]，不同时期采集的桦树汁中自身化学组成也有所不同，共同造成发酵后不同处理条件下氨基酸含量存在显著差异。

氨基酸对食物的风味有很大贡献，典型的风味贡献氨基酸可分为四类：甜味氨基酸、苦味氨基酸、鲜味氨基酸和芳香氨基酸。后期 UFJ 除鲜味氨基酸外，其余风味氨基酸含量均高于前期 UFJ。前期样品组中形成风味的氨基酸含量从高到低依次为苦味氨基酸>甜味氨基酸>鲜味氨基酸>芳香氨基酸，后期样品组中为苦味氨基酸>甜味氨基酸>芳香氨基酸>鲜味氨基酸。

2.4.2 甜味氨基酸的比较 前期白桦树汁发酵后各处理组的甜味氨基酸总含量均增加，其中 CI25 和 CI72 处理的甜味氨基酸含量显著高于其他样品（$P<0.05$），超过 100 μg/mL。而后期桦树汁发酵后甜味氨基酸总含量均下降。前期 UFJ 中含有较低脯氨酸，发酵后除 NFJ 外其余处理组脯氨酸含量均显著增加，而后期 UFJ 中含有较高的脯氨酸，在发酵后含量显著降低。这导致了甜味氨基酸总含量在两种基质中的不同变化。脯氨酸在不同时期采集的桦树汁中的差异变化，可能是由于乳酸菌代谢途径的差异以及发酵基质中其他代谢物的调控作用所导致的[25]。

2.4.3 苦味氨基酸的比较 前期白桦树汁发酵后除 BB16 外其余处理组的苦味氨基酸总含量均增加，且超过了 100 μg/mL。后期白桦树汁发酵后苦味氨基酸总含量无明显差异，含量在 114 μg/mL 左右，除 CI25 处理总含量低于 100 μg/mL。苦味氨基酸中亮氨酸含量最为突出，平均含量约 100 μg/mL 远高于其他氨基酸，为苦味氨基酸中的重要贡献者。亮氨酸是挥发性化合物合成的重要前体[26]，也是作为调节植物生长的关键信号分子[27]。

表 2 前期白桦树汁发酵前后氨基酸组成

Table 2 Amino acid composition of early birch sap before and after fermentation

氨基酸种类	氨基酸含量（μg/mL）									
	UFJ	NFJ	BB16	C10	B4	LB64	MKS2	MKS1	CI25	CI72
甜味氨基酸										
甘氨酸	ND	0.32±0.31^{c}	ND	2.89±0.56^{a}	0.98±0.23^{b}	0.52±0.05^{c}	0.40±0.02^{c}	0.35±0.09^{c}	1.39±0.36^{b}	1.19±0.18^{b}
丙氨酸	TR	4.27±0.83^{b}	ND	4.67±0.40^{b}	6.37±0.08^{b}	9.48±3.44^{a}	8.71±0.22^{ab}	9.17±0.91^{a}	4.52±3.64^{b}	8.96±0.49^{ab}
丝氨酸	0.62±0.01^{b}	ND	0.35±0.30^{b}	ND	0.17±0.21^{b}	ND	ND	ND	22.62±3.30^{a}	ND
苏氨酸	ND	ND	ND	0.57±0.13^{a}	ND	TR	0.05±0.08^{c}	0.29±0.08^{b}	0.09±0.15^{c}	0.03±0.05^{c}
脯氨酸	0.98±0.04^{e}	ND	19.61±0.56^{c}	8.75±1.10^{d}	1.89±1.92^{e}	69.73±0.77^{ab}	5.52±0.04^{de}	63.61±0.45^{b}	68.43±11.90^{ab}	71.60±1.52^{a}
甲硫氨酸	3.55±0.40^{cd}	3.79±1.74^{c}	2.90±0.34^{cd}	6.49±0.00^{a}	5.74±0.05^{ab}	6.70±0.35^{a}	6.22±0.27^{ab}	2.59±0.01^{d}	5.25±1.18^{b}	4.01±0.03^{c}
半胱氨酸	15.55±1.08^{b}	14.99±0.84^{b}	TR	0.72±0.07^{c}	6.03±0.55^{c}	0.96±1.10^{c}	4.87±1.40^{c}	23.90±2.37^{a}	22.61±13.10^{ab}	28.16±2.72^{a}
鲜味氨基酸										
谷氨酸	ND	5.26±5.41^{b}	3.90±1.12^{b}	ND	ND	6.21±0.54^{b}	ND	6.19±0.91^{b}	11.57±1.59^{a}	6.11±1.35^{b}
天冬氨酸	15.55±1.08^{b}	14.99±0.84^{b}	TR	0.72±0.07^{c}	6.03±0.55^{c}	0.96±1.10^{c}	4.87±1.40^{c}	23.90±2.37^{a}	22.61±13.10^{ab}	28.16±2.72^{a}
苦味氨基酸										
赖氨酸	2.18±0.04^{bc}	2.10±0.02^{c}	2.28±0.20^{b}	2.11±0.18^{c}	2.20±0.03^{bc}	2.45±0.07^{a}	2.19±0.03^{bc}	2.22±0.08^{bc}	2.15±0.02^{bc}	2.15±0.02^{bc}
精氨酸	ND	1.93±1.68^{b}	ND	3.02±0.08^{a}	3.18±0.01^{a}	3.78±0.15^{a}	3.26±0.07^{a}	3.34±0.21^{a}	3.36±0.09^{a}	3.17±0.03^{a}
组氨酸	28.91±0.16^{a}	ND	2.86±2.54^{b}	ND	2.10±1.83^{b}	ND	3.65±0.05^{b}	3.75±0.30^{b}	3.61±0.08^{b}	3.60±0.05^{b}
亮氨酸	ND	96.71±3.69^{b}	8.56±0.29^{d}	101.26±3.77^{b}	106.81±0.37^{a}	91.17±4.86^{c}	107.09±1.35^{a}	102.43±2.35^{ab}	103.29±4.27^{ab}	105.38±0.52^{ab}
异亮氨酸	17.98±0.32^{b}	4.64±1.13^{d}	27.73±2.35^{a}	TR	0.14±0.25^{d}	TR	0.39±0.26^{d}	5.40±0.88^{d}	10.40±3.10^{c}	3.75±2.34^{d}
缬氨酸	ND	2.69±2.67^{ab}	ND	4.34±0.27^{a}	3.48±0.06^{ab}	3.52±0.19^{ab}	3.77±0.20^{ab}	1.77±0.31^{bc}	2.14±2.16^{b}	2.61±0.12^{ab}
芳香氨基酸										
酪氨酸	ND	3.35±0.02^{bc}	ND	4.13±0.04^{a}	3.05±0.91^{c}	ND	3.57±0.21^{b}	1.79±0.06^{d}	TR	TR
色氨酸	TR	TR	ND	0.79±0.97^{b}	TR	4.47±1.92^{a}	0.28±0.39^{b}	TR	ND	TR
苯丙氨酸	0.02±0.04^{b}	1.53±1.43^{a}	0.01±0.01^{b}	0.14±0.25^{b}	0.01±0.01^{b}	0.87±0.51^{ab}	ND	0.51±0.01^{b}	TR	0.38±0.04^{b}
其它										
谷氨酰胺	ND	TR	ND	0.06±0.11^{b}	TR	0.65±1.13^{b}	0.93±1.29^{b}	25.89±0.56^{a}	TR	TR
天冬酰胺	ND	ND	ND	ND	ND	TR	ND	ND	ND	ND
胱氨酸	6.16±1.07^{b}	TR	7.77±0.18^{a}	0.05±0.10^{d}	TR	ND	TR	0.39±0.33^{cd}	0.33±0.57^{cd}	0.85±0.01^{c}
总量	78.28±2.93^{e}	141.46±4.14^{d}	148.17±16.09^{d}	140.01±0.89^{d}	142.14±5.42^{d}	204.55±10.56^{c}	150.81±4.45^{d}	260.01±1.48^{ab}	269.55±27.74^{a}	241.95±3.21^{b}

注：同行不同小写字母表示样品组间差异性显著（$P<0.05$），ND表示未检出，TR表示微量；表3、表5、表6同。

表 3　后期白桦树汁发酵前后氨基酸组成

Table 3　Amino acid composition of late birch sap before and after fermentation

氨基酸种类	氨基酸含量(μg/mL)									
	UFJ	NFJ	BB16	C10	B4	LB64	MKS2	MKS1	CI25	CI72
甜味氨基酸										
甘氨酸	0.65±0.15^{b}	0.33±0.07^{b}	0.90±0.08^{b}	0.49±0.04^{b}	2.59±2.26^{a}	1.05±0.13^{b}	0.66±0.09^{b}	0.65±0.64^{b}	1.39±1.38^{ab}	0.55±0.21^{b}
丙氨酸	ND	ND	TR	0.05±0.05^{b}	1.20±1.24^{a}	0.21±0.36^{b}	TR	TR	TR	TR
丝氨酸	0.60±0.10^{b}	ND	0.54±0.49^{b}	ND	5.17±5.20^{a}	0.30±0.34^{b}	ND	ND	ND	0.42±0.46^{b}
苏氨酸	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.13±0.21^{b}	1.67±0.67^{a}	ND
脯氨酸	98.04±3.34^{a}	ND	ND	ND	ND	71.46±0.30^{b}	ND	89.09±1.84^{a}	67.51±22.09^{b}	72.72±1.02^{b}
甲硫氨酸	ND	7.04±0.05^{ab}	7.29±0.35^{a}	7.32±0.02^{a}	7.11±0.59^{ab}	ND	3.81±3.52^{b}	4.46±4.16^{ab}	5.91±2.93^{ab}	ND
半胱氨酸	17.23±2.07^{b}	17.72±2.31^{b}	24.58±0.07^{a}	20.35±1.22^{b}	12.86±0.31^{c}	17.59±0.13^{b}	17.34±1.57^{b}	18.85±5.90^{b}	16.99±0.10^{b}	17.13±0.45^{b}
鲜味氨基酸										
谷氨酸	ND	TR	ND	ND	ND	TR	ND	ND	ND	TR
天冬氨酸	0.10±0.16^{b}	0.53±0.73^{a}	ND	ND	ND	ND	TR	0.66±0.10^{a}	ND	ND
苦味氨基酸										
赖氨酸	1.52±1.32^{a}	2.10±0.03^{a}	1.40±1.21^{a}	2.07±0.04^{a}	2.18±0.01^{a}	ND	1.39±1.21^{a}	1.36±1.18^{a}	2.08±0.00^{a}	2.27±0.19^{a}
精氨酸	2.41±2.12^{a}	2.04±1.78^{a}	3.03±0.05^{a}	ND	2.63±2.33^{a}	ND	ND	1.88±1.63^{a}	ND	ND
组氨酸	ND	ND	ND	ND	3.44±3.10^{a}	ND	ND	ND	3.00±0.04^{a}	ND
亮氨酸	105.15±3.87^{a}	106.57±0.64^{ab}	100.79±1.22^{bc}	99.82±0.37^{c}	101.56±3.17^{bc}	105.39±0.54^{ab}	105.76±1.56^{ab}	103.20±0.45^{b}	86.38±2.25^{d}	106.48±1.11^{a}
异亮氨酸	5.52±3.08^{b}	7.36±2.60^{ab}	10.92±0.99^{a}	6.05±0.53^{b}	5.01±2.76^{b}	7.14±2.52^{ab}	7.61±1.81^{ab}	6.20±3.72^{b}	ND	5.25±2.03^{b}
缬氨酸	ND	1.71±1.73^{c}	2.60±0.03^{bc}	3.27±0.38^{b}	4.76±0.55^{a}	3.05±0.38^{bc}	1.70±1.71^{c}	ND	0.25±0.23^{d}	2.67±0.79^{bc}
芳香氨基酸										
酪氨酸	0.19±0.11^{b}	0.68±0.77^{b}	ND	1.36±1.53^{b}	1.76±0.58^{b}	11.55±11.65^{a}	ND	ND	0.84±0.95^{b}	ND
色氨酸	ND	3.33±4.14^{d}	21.79±1.38^{a}	12.23±0.13^{b}	7.97±1.95^{c}	ND	4.35±5.21^{cd}	TR	TR	TR
苯丙氨酸	1.44±1.55^{a}	0.06±0.06^{b}	TR	ND	0.59±0.41^{ab}	TR	0.02±0.03^{b}	TR	0.03±0.05^{b}	0.06±0.10^{b}
其它										
谷氨酰胺	TR	TR	ND	ND	ND	TR	ND	ND	TR	TR
天冬酰胺	ND	TR	ND	ND	ND	ND	ND	ND	TR	ND
胱氨酸	ND	0.18±0.31^{a}	TR	TR	TR	ND	TR	TR	0.27±0.33^{a}	TR
总量	232.30±10.02^{a}	149.63±1.66^{d}	173.85±0.65^{cd}	153.03±1.51^{d}	158.83±23.10^{d}	217.73±8.82^{ab}	142.64±6.51^{d}	226.48±2.45^{ab}	186.32±27.64^{c}	207.54±2.71^{b}

2.4.4　鲜味氨基酸和芳香氨基酸的比较　前期白桦树汁中 UFJ、C10、B4 和 MKS2 处理中没有检测到谷氨酸，NFJ、MKS1、CI25、CI72 处理的鲜味氨基酸总含量高于 UFJ。后期白桦树汁中仅有 UFJ、NFJ 和 MKS1 处理含有少量天冬氨酸。白桦树汁中天冬氨酸和谷氨酸含量低可能是由于缺少特定酶系和代谢途径的限制。

前期白桦树汁发酵后 BB16 和 CI25 处理的芳香氨基酸总含量减少，其余处理组增加。后期白桦树汁发酵后 MKS1、CI25 和 CI72 芳香氨基酸总含量减少，其余处理组增加。两种风味氨基酸的含量总体低于甜味和苦味氨基酸。

在其他氨基酸中，天冬酰胺在前期桦树汁组样本中仅被检测到微量存在。在后期桦树汁样本中，谷氨酰胺和天冬酰胺同样仅被检测到微量，由于含量过低，无法进行准确定量分析。

不同菌株发酵后氨基酸组成和含量差异显著（P<0.05），与刘欣等[28] 的研究结果相似。他们发现，乳酸菌发酵荔枝汁-大豆蛋白后，氨基酸种类和代谢特征发生了显著变化，不同乳酸菌菌株表现出不同的氨基酸代谢能力。

2.5　白桦树汁发酵前后挥发性化合物分析

乳酸菌发酵过程中利用碳水化合物、蛋白质等原料，采用不同的代谢途径能够产生各种挥发性化合物[29]。利用 HS-SPME-GC-MS 联用的方法，对两个时期的白桦树汁香气化合物的成分及含量进行分析鉴定。在所有样品中共鉴定出 46 种挥发性化合物，醇、酮类化合物较为丰富，包括醇类 13 种、醛类 5 种、酮类 13 种、酸类 6 种、酯类 5 种、其他类 4 种（表 4）。

前期白桦树汁组 UFJ 检测出 22 种，在 NFJ、BB16、C10、B4、LB64、MKS2、MKS1、CI25 和 CI72 处理中分别鉴定出 28、43、35、42、40、36、36、37、33 种化合物，其中有 13 种化合物，经乳酸菌发酵后含量均上升（表 5）。前期白桦树汁经特定菌株发酵后挥发性化合物总含量增加了 40%~376%，BB16 处理总含量最高，NFJ 处理总含量最低。后期白桦树汁组 UFJ 检测出 19 种，在 NFJ、BB16、C10、B4、LB64、MKS2、MKS1、CI25 和 CI72 处理中分别鉴定出 26、27、25、25、26、27、26、24、25 种化合物，其中有 10 种化合物经乳酸菌发酵后含量均上升（表 6）。后期白桦树汁发酵后挥发性化合物总含量

表 4 白桦树汁发酵前后挥发性化合物组成

Table 4 Composition of volatile compounds in birch sap before and after fermentation

类别	中文名称	英文名称	CAS号	RI值	定性方式	定量离子碎片	香气描述	阈值(μg/L)
醇类								
O1	1-甲氧基-2-丙醇	2-Propanol, 1-methoxy-	107-98-2	1135	MS, RI	45	甜香, 果香	4
O2	正丁醇	1-Butanol	71-36-3	1143	MS, RI	56	酒精味	50000
O3	2-甲基丁醇	1-Butanol, 2-methyl-	137-32-6	1195	MS, RI	41	果香, 麦芽香	4150
O4	2-丁烯醇	2-Buten-1-ol	6117-91-5	1207	MS, RI	57	–	–
O5	正戊醇	1-Pentanol	71-41-0	1239	MS, RI	42	香脂	2540
O6	3-甲基-1-戊醇	1-Pentanol, 3-methyl-	589-35-5	1313	MS, RI	56	果香味, 微微酒精味	830
O7	正己醇	1-Hexanol	111-27-3	1340	MS, RI	56	青草香	1600
O8	2-乙基己醇	1-Hexanol, 2-ethyl-	104-76-7	1480	MS, RI	57	柑橘香	300
O9	正辛醇	1-Octanol	111-87-5	1548	MS, RI	56	果香, 玫瑰香	100
O10	2,3-丁二醇	2,3-Butanediol	513-85-9	1566	MS, RI	45	甜香, 黄油香	100000
O11	正壬醇	1-Nonanol	143-08-8	1652	MS, RI	56	花香	1000
O12	正癸醇	1-Decanol	112-30-1	1811	MS, RI	55	果香, 蜡纸, 微微花香	47
O13	十二醇	1-Dodecanol	112-53-8	1967	MS, RI	55	花香	73
醛类								
AL1	2-丁烯醛	2-Butenal, (E)-	123-73-9	1057	MS, RI	41	药草香, 果香	525
AL2	己醛	Hexanal	66-25-1	1097	MS, RI	44	草味, 油脂味	3
AL3	壬醛	Nonanal	124-19-6	1391	MS, RI	57	花香, 柑橘香	1
AL4	癸醛	Decanal	112-31-2	1500	MS, RI	57	柑橘香	3
AL5	苯甲醛	Benzaldehyde	100-52-7	1534	MS, RI	77	坚果味	3500
酮类								
K1	2-戊酮	2-Pentanone	107-87-9	984	MS, RI	43	果香	1380
K2	甲基异丁基甲酮	4-Methyl-2-pentanone	108-10-1	1018	MS, RI	43	花香, 甜香	700
K3	3-戊烯-2-酮	3-Penten-2-one	625-33-2	1139	MS, RI	69	–	1200
K4	2-庚酮	2-Heptanone	110-43-0	1185	MS, RI	43	果香, 甜香	300
K5	3-羟基-2-丁酮	Acetoin	513-86-0	1284	MS, RI	45	奶油香	140
K6	3-甲基环己酮	Cyclohexanone, 3-methyl-	591-24-2	1334	MS, RI	69	果香, 微微花香	460
K7	甲基庚烯酮	5-Hepten-2-one, 6-methyl-	110-93-0	1335	MS, RI	43	胡椒味	50
K8	2-羟基-3-戊酮	2-Hydroxy-3-pentanone	5704-20-1	1359	MS, RI	45	果香	250
K9	2-壬酮	2-Nonanone	821-55-6	1385	MS, RI	58	热牛奶味, 肥皂味	5
K10	甲基壬基甲酮	2-Undecanone	112-12-9	1595	MS, RI	58	–	7
K11	2-十三烷酮	2-Tridecanone	593-08-8	1848	MS, RI	58	油脂味, 变质的	–
K12	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-	689-67-8	1878	MS, RI	43	–	–
K13	2-十五烷酮	2-Pentadecanone	2345-28-0	2029	MS, RI	58	–	–
酸类								
AC1	乙酸	Acetic acid	64-19-7	1440	MS, RI	43	酸的, 醋味	25590
AC2	己酸	Hexanoic acid	142-62-1	1867	MS, RI	60	奶酪味	1800
AC3	2-甲基-3-羟基丙酸	Propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-2,4,4-trimethylpentyl ester	74367-34-3	1885	MS, RI	71	–	–
AC4	辛酸	Octanoic acid	124-07-2	2060	MS, RI	60	酸味	910
AC5	壬酸	Nonanoic acid	112-05-0	2191	MS, RI	60	脂肪香	208
AC6	正癸酸	n-Decanoic acid	334-48-5	2289	MS, RI	60	酸臭	1000
酯类								
E1	乙酸乙酯	Ethyl Acetate	141-78-6	891	MS, RI	44	菠萝香, 甜香	3280
E2	乙酸正丙酯	n-Propyl acetate	109-60-4	979	MS, RI	43	果香	150000
E3	乙酸丁酯	Acetic acid, butyl ester	123-86-4	1083	MS, RI	43	香蕉味	27
E4	丙烯酸丁酯	2-Propenoic acid, butyl ester	141-32-2	1178	MS, RI	55	–	2
E5	辛酸乙酯	Octanoic acid, ethyl ester	106-32-1	1429	MS, RI	88	菠萝香, 果香	5
其他								
1	2-戊基呋喃	Furan, 2-pentyl	3777-69-3	1229	MS, RI	81	蔬菜香	6

续表 4

类别	中文名称	英文名称	CAS号	RI值	定性方式	定量离子碎片	香气描述	阈值(μg/L)
2	薄荷醇	L-Menthol	2216-51-5	1638	MS, RI	81	薄荷香	950
3	苯酚	Phenol	108-95-2	2015	MS, RI	94	药草香	5000
4	2,4-二叔丁基酚	Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	96-76-4	2318	MS, RI	191	苯酚气味	28.4

注: 阈值与香气描述参考自: ① https://www.leibniz-lsb.de/; ②《Compilations of odour threshold values in air,water and other media (second enlarged and revised edition)》。

表 5　前期白桦树汁发酵前后挥发性化合物含量

Table 5　Content of volatile compounds in early birch sap before and after fermentation

种类	化合物含量(mg/L)									
	UFJ	NFJ	BB16	C10	B4	LB64	MKS2	MKS1	CI25	CI72
醇类										
O1	0.55±0.53^{b}	ND	1.05±0.10^{b}	ND	8.10±4.40^{ab}	3.95±2.73^{b}	7.35±2.28^{ab}	8.95±3.64^{a}	1.45±0.47^{b}	11.25±7.19^{a}
O2	0.40±0.28^{c}	0.35±0.30^{c}	2.85±0.41^{a}	1.00±0.23^{b}	0.85±0.38^{b}	0.60±0.00^{bc}	0.60±0.00^{bc}	0.75±0.34^{bc}	0.65±0.19^{bc}	0.85±0.50^{b}
O3	ND	0.40±0.16^{c}	2.50±0.58^{bc}	13.15±6.18^{a}	1.85±0.30^{c}	5.30±0.26^{b}	0.50±0.20^{c}	0.45±0.10^{c}	1.80±1.28^{c}	0.20±0.00^{c}
O4	0.15±0.10^{b}	ND	5.40±3.24^{a}	0.25±0.10^{b}	0.25±0.10^{b}	0.20±0.00^{b}	0.40±0.00^{b}	0.45±0.10^{b}	ND	0.20±0.00^{b}
O5	ND	ND	0.40±0.23^{b}	0.90±0.35^{a}	0.45±0.10^{b}	0.45±0.19^{b}	0.20±0.00^{b}	0.60±0.54^{ab}	0.60±0.37^{ab}	0.35±0.30^{b}
O6	ND	ND	0.60±0.00^{ab}	0.70±0.12^{ab}	0.55±0.19^{ab}	0.30±0.12^{b}	ND	ND	0.95±0.87^{a}	ND
O7	0.50±0.35^{c}	0.50±0.20^{c}	1.70±0.26^{a}	1.30±0.12^{ab}	1.20±0.67^{b}	1.00±0.37^{b}	0.95±0.10^{bc}	1.10±0.38^{b}	0.50±0.12^{c}	0.75±0.44^{bc}
O8	8.45±1.42^{c}	11.40±10.21^{c}	10.05±1.71^{c}	33.05±2.33^{a}	28.35±6.17^{ab}	25.35±6.05^{b}	26.50±3.85^{ab}	25.40±4.04^{b}	24.80±3.17^{b}	28.70±2.09^{ab}
O9	0.40±0.23^{b}	0.25±0.19^{b}	0.75±0.30^{a}	0.65±0.19^{ab}	0.75±0.19^{a}	0.75±0.10^{a}	0.60±0.00^{ab}	0.55±0.10^{ab}	0.45±0.10^{b}	0.55±0.34^{ab}
O10	0.20±0.16^{c}	ND	125.00±69.51^{b}	197.25±16.87^{a}	80.05±21.78^{bc}	47.80±29.87^{c}	0.55±0.30^{c}	3.30±1.47^{c}	6.05±1.95^{c}	ND
O11	ND	0.15±0.10^{d}	0.65±0.19^{b}	0.40±0.00^{c}	0.85±0.10^{a}	0.75±0.10^{ab}	0.80±0.16^{ab}	0.40±0.16^{c}	0.40±0.23^{c}	0.20±0.00^{d}
O12	ND	ND	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.15±0.10^{ab}	0.10±0.12^{b}	ND
O13	0.25±0.10^{b}	0.15±0.10^{b}	0.20±0.00^{b}	0.35±0.10^{ab}	0.35±0.10^{ab}	0.40±0.00^{a}	0.35±0.10^{ab}	0.40±0.16^{a}	0.40±0.00^{a}	0.25±0.10^{b}
醛类										
AL1	26.30±1.50^{a}	0.15±0.10^{c}	7.90±1.47^{b}	0.40±0.00^{c}	ND	ND	ND	ND	ND	ND
AL2	0.75±0.41^{ab}	0.50±0.35^{b}	0.75±0.72^{ab}	0.90±0.35^{ab}	0.95±0.25^{ab}	0.95±0.34^{ab}	0.90±0.20^{ab}	1.05±0.30^{a}	0.55±0.19^{ab}	0.55±0.10^{ab}
AL3	0.20±0.00^{c}	0.60±0.28^{bc}	0.80±0.33^{b}	0.65±0.19^{bc}	1.30±0.26^{a}	1.00±0.28^{ab}	1.10±0.48^{ab}	0.75±0.10^{b}	1.05±0.38^{ab}	0.90±0.53^{ab}
AL4	ND	ND	0.15±0.10^{b}	0.20±0.00^{ab}	0.25±0.10^{ab}	0.30±0.12^{ab}	0.25±0.10^{ab}	0.30±0.20^{ab}	0.35±0.19^{a}	0.30±0.20^{ab}
AL5	0.10±0.12^{a}	0.15±0.10^{a}	0.10±0.12^{a}	0.45±0.19^{a}	0.30±0.20^{a}	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.45±0.38^{a}	0.10±0.12^{a}	0.55±0.84^{a}
酮类										
K1	13.00±0.00^{b}	ND	34.90±6.36^{a}	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K2	4.65±1.00^{b}	3.30±1.59^{c}	7.00±0.59^{a}	6.05±0.19^{ab}	3.15±0.98^{c}	4.65±0.25^{b}	4.00±0.28^{bc}	3.00±0.91^{c}	5.05±0.19^{b}	4.00±0.95^{bc}
K3	2.05±0.66^{b}	0.60±0.46^{c}	9.90±0.62^{a}	0.80±0.00^{c}	0.60±0.28^{c}	ND	0.55±0.10^{c}	0.55±0.10^{c}	0.60±0.16^{c}	0.80±0.16^{c}
K4	ND	1.15±1.10^{c}	7.95±2.90^{a}	0.35±0.10^{c}	4.00±2.73^{b}	3.65±0.44^{b}	0.75±0.10^{c}	0.45±0.10^{c}	0.55±0.10^{c}	0.90±0.26^{c}
K5	ND	2.60±3.01^{d}	65.75±11.62^{bc}	127.25±17.78^{a}	55.60±6.44^{c}	63.90±4.69^{bc}	1.05±0.10^{d}	12.50±4.18^{d}	84.95±32.54^{b}	19.45±13.92^{d}
K6	ND	ND	0.70±0.35^{a}	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K7	ND	0.35±0.10^{c}	ND	0.60±0.00^{b}	0.60±0.00^{b}	0.50±0.12^{bc}	0.40±0.00^{c}	0.80±0.37^{a}	0.45±0.10^{bc}	0.50±0.12^{bc}
K8	ND	ND	0.30±0.35^{c}	1.05±0.10^{a}	0.35±0.10^{bc}	0.30±0.12^{c}	ND	ND	0.50±0.12^{b}	ND
K9	ND	0.40±0.46^{c}	4.05±1.05^{a}	ND	1.15±0.30^{b}	1.65±0.38^{b}	0.20±0.00^{c}	ND	0.25±0.10^{c}	0.25±0.10^{c}
K10	ND	ND	1.80±0.37^{a}	ND	0.60±0.16^{b}	0.60±0.28^{b}	ND	ND	ND	ND
K11	ND	ND	0.70±0.12^{a}	ND	0.45±0.10^{b}	0.20±0.16^{c}	ND	ND	ND	ND
K12	0.20±0.00^{c}	0.15±0.10^{c}	0.20±0.00^{c}	0.2±0.00^{c}	0.45±0.10^{ab}	0.55±0.19^{a}	0.25±0.10^{c}	0.30±0.12^{bc}	0.40±0.00^{b}	0.35±0.10^{bc}
K13	ND	ND	0.15±0.10^{b}	ND	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	ND	ND	ND	ND
酸类										
AC1	5.05±2.66^{c}	1.35±1.23^{c}	62.75±12.31^{a}	18.45±10.48^{bc}	32.60±28.78^{b}	31.40±4.40^{b}	66.70±2.67^{a}	62.45±6.58^{a}	31.20±0.85^{b}	2.85±0.34^{c}
AC2	ND	0.35±0.41^{c}	1.65±0.38^{ab}	0.35±0.19^{c}	2.05±1.31^{a}	1.75±0.34^{ab}	0.80±0.00^{bc}	1.20±0.16^{b}	0.75±0.19^{bc}	0.95±0.25^{bc}
AC3	0.25±0.10^{ab}	0.15±0.10^{b}	0.35±0.10^{ab}	0.40±0.28^{a}	0.20±0.00^{b}	0.25±0.10^{ab}	0.20±0.00^{b}	0.30±0.12^{ab}	0.20±0.00^{b}	0.20±0.00^{b}
AC4	ND	0.20±0.16^{c}	1.40±0.59^{a}	0.50±0.12^{bc}	0.50±0.20^{bc}	0.55±0.10^{b}	0.25±0.10^{bc}	0.35±0.10^{bc}	0.20±0.00^{c}	0.20±0.00^{c}
AC5	ND	0.40±0.46^{c}	0.95±0.55^{b}	0.95±0.44^{b}	1.15±0.34^{ab}	1.20±0.16^{ab}	1.45±0.38^{a}	1.40±0.28^{ab}	0.45±0.10^{c}	0.60±0.16^{bc}
AC6	ND	ND	0.35±0.19^{a}	ND	0.25±0.10^{ab}	0.30±0.12^{ab}	0.25±0.10^{ab}	0.20±0.00^{b}	ND	ND
酯类										
E1	4.60±0.8^{ab}	1.85±1.39^{b}	5.30±1.16^{ab}	6.10±1.61^{a}	4.10±1.16^{ab}	2.70±1.81^{b}	5.55±3.64^{a}	3.75±0.64^{ab}	5.35±1.28^{ab}	3.10±0.35^{b}
E2	27.85±2.25^{cd}	11.10±11.83^{d}	103.40±29.77^{b}	46.40±1.21^{c}	10.50±1.71^{d}	25.80±4.17^{cd}	14.55±2.02^{d}	26.90±7.14^{cd}	28.50±12.91^{cd}	139.50±32.76^{a}
E3	3.25±0.44^{b}	1.50±1.10^{c}	7.35±2.68^{a}	1.20±0.16^{c}	2.00±0.59^{bc}	1.40±0.49^{c}	1.25±0.25^{c}	1.30±0.26^{c}	1.65±0.34^{c}	2.05±1.04^{bc}
E4	ND	0.15±0.10^{b}	ND	ND	0.45±0.19^{ab}	0.20±0.00^{b}	0.20±0.00^{b}	0.45±0.25^{ab}	0.55±0.25^{a}	0.30±0.12^{b}

续表 5

种类	化合物含量(mg/L)									
	UFJ	NFJ	BB16	C10	B4	LB64	MKS2	MKS1	CI25	CI72
E5	ND	ND	0.20±0.00^{b}	0.20±0.00^{b}	0.20±0.00^{b}	ND	ND	ND	0.30±0.12^{a}	ND
其他										
1	ND	ND	0.15±0.10^{b}	ND	ND	ND	0.15±0.10^{b}	0.60±0.54^{a}	ND	ND
2	ND	ND	ND	ND	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}	0.20±0.00^{a}
3	ND	ND	0.20±0.00^{ab}	0.20±0.00^{ab}	0.25±0.10^{a}	0.20±0.00^{ab}	ND	0.20±0.00^{ab}	0.15±0.10^{b}	0.20±0.00^{ab}
4	1.80±0.77^{ab}	1.25±0.53^{b}	2.00±0.57^{a}	1.65±0.19^{ab}	1.40±0.33^{ab}	1.85±0.44^{ab}	1.15±0.34^{b}	1.30±0.53^{b}	1.50±0.26^{ab}	1.35±0.10^{b}

表 6 后期白桦树汁发酵前后挥发性化合物含量

Table 6 Content of volatile compounds in late birch sap before and after fermentation

种类	化合物含量(mg/L)									
	UFJ	NFJ	BB16	C10	B4	LB64	MKS2	MKS1	CI25	CI72
醇类										
O2	0.20±0.23^{b}	0.20±0.00^{b}	0.20±0.00^{b}	0.30±0.20^{b}	0.25±0.10^{b}	0.20±0.00^{b}	0.20±0.00^{b}	0.25±0.10^{b}	0.40±0.00^{ab}	0.65±0.66^{a}
O3	ND	2.45±0.10^{b}	0.80±0.00^{d}	ND	1.40±0.33^{cd}	ND	1.50±0.58^{c}	0.90±0.12^{d}	3.95±0.25^{a}	0.70±1.00^{d}
O4	ND	ND	0.40±0.00^{a}	0.20±0.00^{c}	ND	0.25±0.10^{bc}	0.30±0.12^{b}	ND	ND	ND
O7	0.10±0.12^{d}	0.40±0.00^{b}	0.40±0.00^{b}	0.50±0.20^{ab}	ND	0.45±0.10^{ab}	0.55±0.10^{a}	0.25±0.10^{c}	0.40±0.00^{b}	0.40±0.00^{b}
O8	2.95±0.82^{b}	3.65±0.25^{b}	5.30±0.53^{b}	3.30±0.26^{b}	3.75±0.75^{b}	4.25±0.66^{b}	4.05±1.11^{b}	2.15±0.19^{b}	4.95±0.44^{b}	15.80±14.27^{a}
O9	0.20±0.00^{b}	0.40±0.00^{ab}	0.40±0.00^{ab}	0.50±0.12^{ab}	0.35±0.10^{b}	0.55±0.10^{a}	0.40±0.00^{ab}	0.20±0.00^{b}	0.40±0.16^{ab}	0.55±0.30^{a}
O10	ND	0.55±0.38^{bc}	5.35±2.25^{a}	2.15±0.68^{bc}	1.00±0.86^{bc}	2.65±0.72^{b}	5.45±3.87^{a}	0.75±0.44^{bc}	0.45±0.10^{c}	0.30±0.20^{c}
O11	0.15±0.10^{b}	0.30±0.12^{ab}	0.40±0.00^{a}	0.30±0.12^{ab}	0.35±0.10^{ab}	0.40±0.00^{a}	0.35±0.10^{ab}	0.20±0.00^{b}	0.25±0.10^{b}	0.25±0.10^{b}
O13	0.40±0.23^{a}	0.45±0.10^{a}	0.45±0.10^{a}	0.40±0.00^{a}	0.40±0.16^{a}	0.40±0.00^{a}	0.40±0.16^{a}	0.45±0.10^{a}	0.35±0.30^{a}	0.35±0.19^{a}
醛类										
AL1	0.80±0.69^{a}	ND	0.20±0.00^{b}	ND	ND	ND	0.20±0.00^{b}	ND	ND	ND
AL2	0.20±0.00^{b}	0.20±0.00^{b}	0.20±0.00^{b}	0.45±0.25^{a}	ND	0.25±0.10^{ab}	0.20±0.00^{b}	0.40±0.28^{ab}	0.45±0.10^{a}	0.25±0.19^{ab}
AL3	0.20±0.00^{bc}	0.15±0.10^{c}	0.20±0.00^{bc}	0.50±0.12^{a}	0.20±0.00^{bc}	0.25±0.10^{b}	0.20±0.00^{bc}	0.20±0.00^{bc}	0.20±0.00^{bc}	0.25±0.10^{b}
酮类										
K1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K2	6.85±0.66^{ab}	7.15±0.72^{ab}	6.35±0.44^{b}	8.30±1.31^{a}	5.80±0.23^{b}	7.00±0.99^{ab}	6.55±0.19^{b}	7.70±1.05^{ab}	6.30±0.12^{b}	5.35±2.40^{b}
K3	ND	0.35±0.10^{b}	0.80±0.00^{a}	0.55±0.10^{ab}	0.35±0.30^{b}	0.75±0.19^{a}	0.60±0.23^{ab}	0.20±0.00^{b}	0.20±0.00^{b}	0.55±0.41^{ab}
K4	ND	0.20±0.00^{c}	0.25±0.10^{c}	0.45±0.19^{bc}	0.55±0.19^{bc}	1.15±0.53^{a}	0.20±0.00^{c}	0.65±0.10^{b}	0.45±0.10^{bc}	0.40±0.28^{bc}
K5	ND	7.95±2.14^{c}	17.90±4.74^{ab}	21.40±9.90^{a}	10.15±1.84^{bc}	14.20±4.19^{b}	9.80±5.66^{bc}	7.40±0.71^{c}	6.45±1.18^{c}	6.65±0.81^{c}
K9	ND	ND	ND	ND	0.20±0.00^{b}	ND	ND	ND	0.20±0.00^{b}	0.25±0.10^{a}
K12	0.20±0.00^{b}	0.30±0.12^{ab}	0.40±0.16^{a}	0.40±0.16^{a}	0.30±0.12^{ab}	0.30±0.12^{ab}	0.30±0.12^{ab}	0.25±0.10^{ab}	0.35±0.10^{ab}	0.35±0.10^{ab}
酸类										
AC1	0.95±0.34^{d}	16.05±1.26^{bc}	32.15±6.41^{a}	21.15±7.25^{bc}	9.25±2.29^{c}	24.95±5.44^{ab}	22.15±9.31^{b}	7.20±0.91^{cd}	14.25±2.41^{c}	7.30±5.28^{cd}
AC2	0.30±0.35^{c}	2.05±0.30^{a}	1.60±0.16^{ab}	0.85±0.25^{bc}	1.35±0.84^{b}	1.15±0.19^{b}	0.95±0.19^{b}	0.95±0.19^{b}	ND	1.35±0.70^{b}
AC3	0.35±0.19^{ab}	0.30±0.12^{ab}	0.40±0.16^{ab}	0.15±0.10^{b}	0.30±0.12^{ab}	0.30±0.12^{ab}	0.30±0.12^{ab}	0.40±0.00^{ab}	0.45±0.19^{a}	0.25±0.10^{b}
AC4	ND	0.75±0.10^{a}	0.50±0.12^{b}	0.30±0.12^{b}	0.45±0.19^{b}	0.35±0.19^{b}	0.35±0.10^{b}	0.45±0.19^{b}	0.30±0.20^{b}	0.40±0.28^{b}
AC5	0.25±0.10^{c}	1.50±0.12^{bc}	2.70±0.81^{a}	1.25±0.60^{bc}	1.05±0.60^{bc}	1.75±0.53^{b}	2.35±0.66^{ab}	2.55±0.38^{a}	0.35±0.10^{c}	0.80±0.54^{c}
AC6	ND	0.20±0.00^{ab}	0.25±0.10^{ab}	0.15±0.10^{b}	0.15±0.10^{b}	0.25±0.10^{ab}	0.20±0.00^{ab}	0.30±0.12^{a}	ND	ND
酯类										
E1	1.90±1.41^{b}	0.75±0.10^{b}	3.30±0.81^{a}	1.40±0.23^{b}	1.20±0.28^{b}	2.50±0.82^{ab}	2.40±0.82^{ab}	0.70±0.12^{b}	1.70±0.87^{b}	2.15±1.68^{ab}
E2	1.70±0.12^{b}	11.25±0.41^{b}	18.70±2.96^{b}	22.70±4.02^{b}	14.20±2.96^{b}	21.05±1.18^{b}	13.90±7.65^{b}	12.05±0.55^{b}	17.15±1.25^{b}	59.30±49.43^{a}
E3	0.50±0.12^{c}	0.80±0.16^{c}	2.85±1.06^{a}	2.45±1.00^{ab}	1.00±0.16^{bc}	2.30±0.58^{ab}	1.70±0.48^{bc}	1.25±0.10^{bc}	1.10±0.26^{bc}	1.75±1.11^{b}
E5	ND	0.30±0.12^{a}	ND	ND	0.35±0.19^{a}	0.10±0.12^{b}	ND	0.10±0.12^{b}	ND	ND
其他										
4	1.40±0.16^{b}	1.25±0.25^{b}	0.70±0.12^{b}	0.60±0.00^{b}	1.35±0.41^{b}	0.80±0.16^{b}	0.80±0.16^{b}	0.75±0.10^{b}	6.30±7.81^{a}	1.35±0.34^{b}

增加了 148%~449%, CI72 处理总含量最高。2-丁烯醛在前、后期白桦树汁中发酵后均减少, 正壬醇、2-庚酮、3-羟基-2-丁酮、辛酸和壬酸在两个时期中发酵后含量均增加。

为能够更直观地显示两组样品之间的风味物质差异, 绘制了挥发性化合物聚类热图(图 4)。从热图中可以看到, 后期组各发酵样品的化合物含量显著少于前期组。前期各处理中醇类化合物含量高于后期各处理, 而酸类化合物含量略低于后期各处理, 前期 BB16 处理中的酮类化合物含量较为突出。前、后期白桦树汁发酵后出现了多种新的挥发性化合物, 且绝大多数挥发性化合物的含量显著增加(P<0.05)。

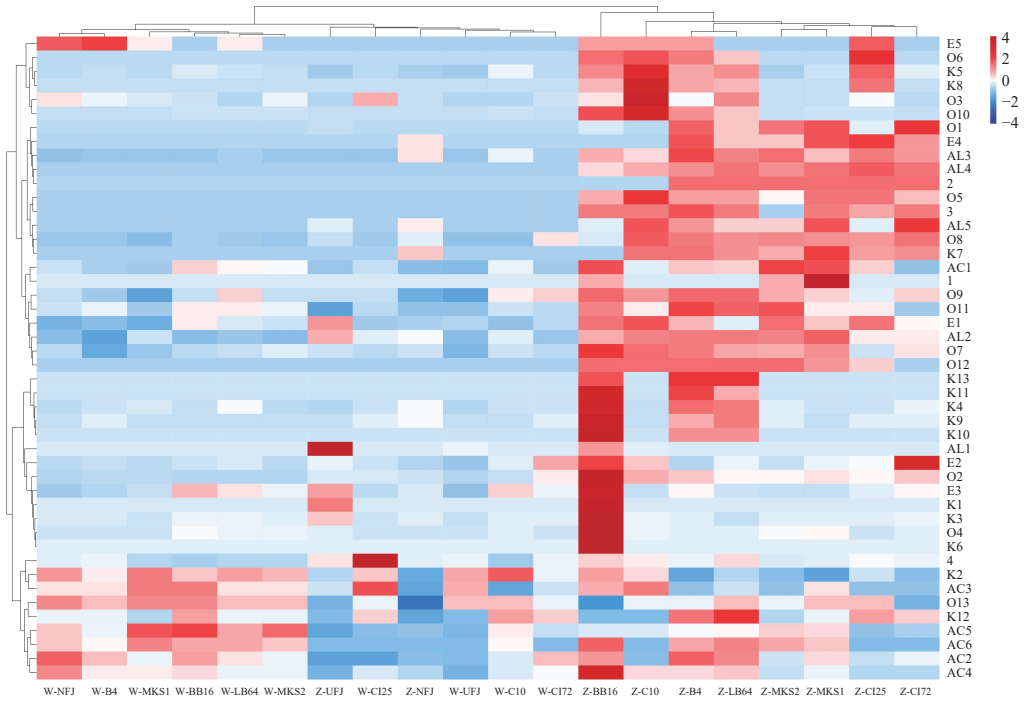


图 4　白桦树汁发酵前后的挥发性化合物含量聚类热图

Fig.4　Clustered heatmap of volatile compound content in birch sap before and after fermentation

注：Z 指代前期，W 指代后期。

2.5.1　醇类　醇类在发酵果蔬浆的特征风味中有突出贡献，由发酵过程中碳水化合物的糖酵解产生[30]。白桦树汁中的醇类主要为 2,3-丁二醇和 2-乙基己醇，在前期组中总含量超过 200 mg/L。前期组中 BB16 和 C10 处理中的 2,3-丁二醇含量比 UFJ 高出约 624 倍和 985 倍，正丁醇、2-甲基丁醇、正戊醇、2-乙基己醇、正辛醇和正壬醇在菌株发酵后含量均显著上升（P<0.05），这些醇类能够赋予白桦树汁果香、花香和草木香[15]。在后期白桦树汁组中，没有检测到 1-甲氧基-2-丙醇、正戊醇、3-甲基-1-戊醇和正癸醇，醇类的总含量也远低于前期组。两个时期中，正壬醇发酵后含量均增加，而十二醇在发酵前后无显著变化。

2.5.2　醛类、酸类　乳酸菌发酵过程中，发酵基质中的氨基酸可以在转氨酶的作用下生成 α-酮酸，α-酮酸分别在脱羧酶、脱氢酶的作用下可以生成醛类化合物、酸类化合物。在前期组中检测到 5 种醛类分别为 2-丁烯醛、己醛、壬醛、癸醛和苯甲醛，而在后期组中只有 2-丁烯醛、己醛和壬醛。2-丁烯醛在发酵后含量普遍降低，可能被还原成醇或氧化为酸。醛类化合物对产品香气的影响主要与其含量有关，低浓度时醛类化合物提供的水果味对产品风味产生积极的影响，浓度高时可能对发酵产品香气产生负面影响[31]。大多数酸类化合物经乳酸菌发酵后含量明显提高。发酵后鉴定出 6 种酸类乙酸、己酸、2-甲基-3-羟基丙酸、辛酸、壬酸和正癸酸。而在前期 UFJ 中只检测出乙酸和 2-甲基-3-羟基丙酸。辛酸和壬酸在前、后期组发酵后含量均上升。所有处理组中均鉴定出乙酸，且乙酸的含量远远超过其他酸类，甚至高出其他酸类五十倍以上。乙酸由磷酸己糖途径的乙酸激酶途径产生与多种挥发性化合物的合成密切相关。

2.5.3　酮类　酮类主要通过微生物氧化或脱羧途径产生。白桦树汁中检测出 13 种酮类，主要组成为 3-羟基-2-丁酮和甲基异丁基甲酮，3-羟基-2-丁酮的含量远远超过其他酮类，其含量最高的样品为前期 C10 处理。3-羟基-2-丁酮也称为乙偶姻，带有奶油香气可增强发酵样品的醇厚感。当糖酵解途径产生 3-羟基-2-丁酮时，会产生 2,3-丁二醇和其他副产物[32]，因此 3-羟基-2-丁酮和 2,3-丁二醇的含量都较高。后期白桦树汁中只有 6 种酮类，UFJ 只有甲基异丁基甲酮和 6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮。3-甲基环己酮仅在前期 BB16 处理中检测出，2-戊酮仅在前期 UFJ 和前期 BB16 处理中存在。2-庚酮和 3-羟基-2-丁酮在前、后期组发酵后含量均显著增加，2-庚酮具有果香的香味特征。

2.5.4　酯类　酯类主要通过不饱和脂肪酸的脂氧合酶和 β 氧化途径产生，也可以通过酸和醇之间的酯化反应合成[33]。酯类多样性有助于增强发酵白桦树汁的果香、花香和令人愉悦的特性。在前期白桦树汁组中检测出乙酸乙酯、乙酸正丙酯、乙酸丁酯、丙烯酸丁酯和辛酸乙酯，UFJ 中无丙烯酸丁酯和辛酸乙酯。后期白桦树汁组中无丙烯酸丁酯。白桦树汁中乙酸正丙酯的含量远高于其他酯类，总含量超过了 150 mg/L。其中，前期 CI72 处理中的乙酸正丙酯含量最高，前期 BB16 处理次之，均超过了 100 mg/L。

在后期组中，发酵后的样品中乙酸正丙酯和乙酸丁酯含量均高于未发酵样品。

2.6 主成分分析

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA）是一种多变量数据分析方法，为了进一步直观地比较乳酸菌发酵前后白桦树汁样品香气成分整体的差异，以及其他发酵指标对样品的影响，对两个时期样品的挥发性化合物和理化指标、抗氧化性、氨基酸组成分别进行了 PCA 分析。由于变量较多，为了使图表更有可读性，选择平方余弦和大于 0.5 的变量显示在 PCA 图中

前期白桦树汁组 PCA 分析如图 5 显示，PCA 结果中前两个主成分贡献率分别为 34.97%、25.44%。挥发性化合物变量在主成分的贡献中，醇类、酮类、酸类化合物主要是 F1 的重要贡献者，醛类化合物主要在 F2 中作出重要贡献。根据变量在 F1 上的投影，辛酸和半胱氨酸的贡献值在该主成分上较大。而通过在 F2 上的投影，主要贡献变量为十二醇和 2-丁烯醛。从得分图可以看到，样品主要集中在第一二象限，而 NFJ、UFJ 和 BB16 分别位于第三象限和第四象限。发酵样品与未发酵样品 UFJ 能够明显区分，同时特定菌株发酵与自然发酵 NFJ 也能够明显区分，表明发酵能够显著影响白桦树汁的风味品质和复杂性。同时 BB16 与其它样品的距离远，并与大多数挥发性化合物相关，表明 BB16 具有丰富独特的风味品质与其它组具有显著差异。载荷图中，还原糖、pH、组氨酸、苯丙氨酸和 2-丁烯醛位于第三象限，与 UFJ 密切相关。挥发性化合物和氨基酸主要沿 F1 正向分布，与菌株发酵密切相关，发酵能使白桦树汁中的挥发性化合物和氨基酸更丰富。还原糖与大多数化合物呈负相关，组氨酸、胱氨酸和异亮氨酸在发酵样品中减少，与大多数挥发性化合物呈负相关。

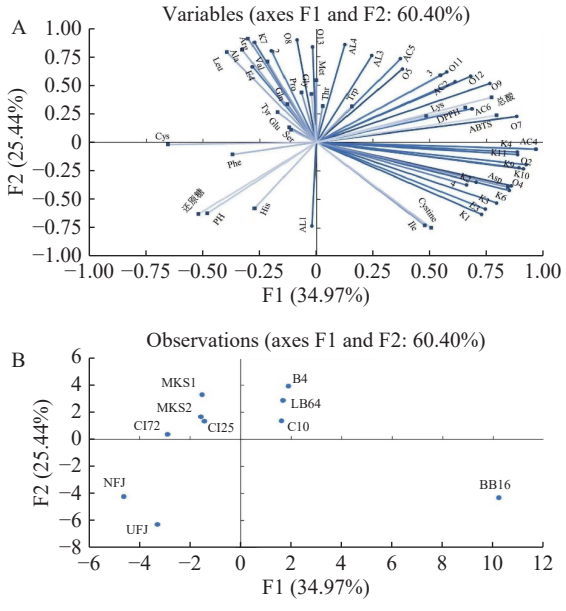


图 5 发酵前期白桦树汁综合指标的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis (PCA) of comprehensive indicators of fermented early birch sap

注: A.载荷图; B.得分图, 图 6 同。

后期白桦树汁组 PCA 分析如图 6 显示，PCA 结果中两个主成分分别解释了样品总体变异的 32.66% 和 21.45%。根据变量在 F1 上的投影，正壬醇、3-羟基-2 丁酮、乙酸、总酸和还原糖是该主成分上的主要贡献变量。而在 F2 上的投影可以看到是 2-乙基己醇为该主成分上的主要贡献变量。得分图中，样品分布较为分散，其中 C10 和 LB64 距离较近，表明它们的发酵特征和成分组成相似，其中 CI25 与其它样品的差异较大。载荷图中还原糖、pH 和脯氨酸与 UFJ 相关性高。还原糖与大多数化合物呈负相关，与前期白桦树汁组分析结果一致。后期 UFJ 中的还原糖、脯氨酸和苯丙氨酸发酵后减少，与大多数化合物的生成有关。

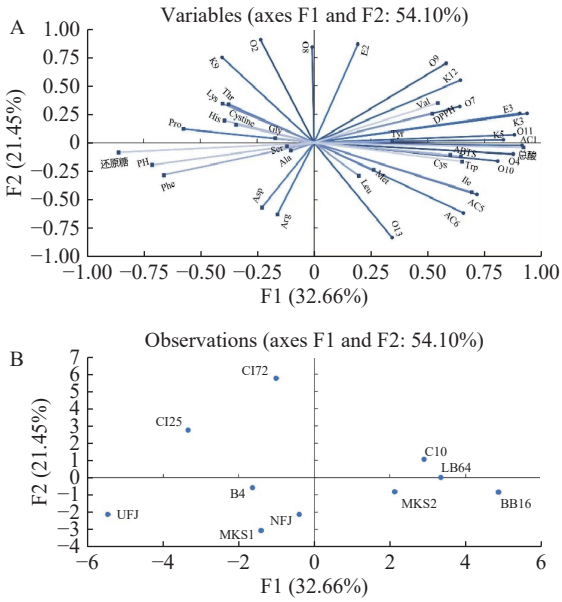


图 6 发酵后期白桦树汁综合指标的主成分分析

Fig.6 Principal component analysis (PCA) of comprehensive indicators of fermented late birch sap

3 结论

本研究选取 8 株不同乳酸菌发酵两个不同采集时期的白桦树汁，系统分析白桦树汁发酵前后的理化指标、抗氧化能力、氨基酸组成以及挥发性化合物组成的变化。结果显示所有菌株在白桦树汁中均表现出良好的生长能力。发酵后，白桦树汁的 pH 和还原糖含量显著降低，总酸含量显著增加。前期未发酵白桦树汁总酸含量和还原糖含量均高于后期未发酵白桦树汁。前期白桦树汁发酵后总酸含量增加了 4~16 倍，还原糖含量减少了 34%~57%，而后期分别为 7~20 倍、27%~53%。其中 BB16 处理在两个时期中表现出良好的生长能力和产酸能力。白桦树汁发酵后抗氧化能力显著增强，其中 BB16 表现出优异的 $ABTS^{+}$自由基和 DPPH 自由基清除能力。通过 HPLC 分析，白桦树汁中的主要氨基酸为亮氨酸和半胱氨酸，发酵后氨基酸的种类增加，而含量在不同基

质和不同菌株发酵下有所差异。后期未发酵白桦树汁的各类风味氨基酸含量高于前期。发酵后的白桦树汁中苦味氨基酸含量高于甜味氨基酸含量。通过 HS-SPME-GC-MS 分析，白桦树汁发酵后共鉴定出 46 种挥发性化合物，在所有组间表现出种类和含量的显著差异。前期白桦树汁组的挥发性化合物总量和种类高于后期组，展现出更为复杂的风味特征。两个时期白桦树汁发酵后，2-丁烯醛含量减少，正壬醇、2-庚酮、3-羟基-2-丁酮、辛酸和壬酸含量均增加。其中经 BB16 发酵后的白桦树汁挥发性化合物种类和含量最为丰富。将前、后期白桦树汁发酵后的样品分别进行综合指标的 PCA 分析，均实现了乳酸菌发酵样品和未发酵样品的明显区分。综述，乳酸菌发酵能够显著影响白桦树汁的风味品质，同时 BB16 被认为是发酵白桦树汁的最佳菌株。本研究为白桦树汁产品的创新开发提供了坚实的理论基础。未来，通过进一步优化发酵工艺并结合系统的感官评价，有望研发出更受消费者喜爱的白桦树汁产品。

© 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］ 邓长贺. 大兴安岭的白桦树资源开发与利用[J]. 林业科技情报，2023, 55(3)：52−54. ［DENG Changhe. Development and utilization of birch resources in greater khingan[J]. Forestry Science and Technology Information, 2023, 55(3)：52−54.］

［2］ LEE C H, CHO Y, PAEK E S, et al. *In vivo* immune activity of sap of the white birch (*Betula platyphylla* var. *japonica*)[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 2009, 41：413−416.

［3］ BILEK M, VIETORIS V, ILKO V. Shelf life extension and sensory evaluation of birch tree sap using chemical preservatives[J]. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences, 2016, 10(1)：499−505.

［4］ GAO Fei, MU Guangqing, TUO Yanfeng. *Lactiplantibacillus plantarum* Y44 complex fermented milk regulates lipid metabolism in mice fed with high-fat diet by modulating gut microbiota[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(46)：25767−25781.

［5］ SHARMA R, GARG P, KUMAR P, et al. Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods[J]. Fermentation, 2020, 6(4)：106.

［6］ GAO Yuan, LIANG Qimeng, SUN Junqi, et al. Probiotic potential of lactic acid bacteria with antioxidant properties in modulating health：Mechanisms, applications, and future directions[J]. Food Bioscience, 2025, 66：106181.

［7］ LI Tianlin, JIANG Tian, LIU Ning, et al. Biotransformation of phenolic profiles and improvement of antioxidant capacities in jujube juice by select lactic acid bacteria[J]. Food Chemistry, 2021, 339：127859.

［8］ LIU Y R, GU P, LAAKSONEN O, et al. Lactic acid bacteria incubation and aging drives flavor enhancement of goji berry juice[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 105：104202.

［9］ KIM J H, LEE W J, CHO Y W, et al. Storage-life and palatability extension of *Betula platyphylla* sap using lactic acid bacteria fermentation[J]. Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition, 2009, 38(6)：787−794.

［10］ MINGAILA J, ČIULDIENĖ D, VIŠKELIS P, et al. The quantity and biochemical composition of sap collected from silver birch (*Betula pendula* Roth) trees growing in different soils[J]. Forests, 2020, 11(4)：365.

［11］ JEONG S J, LEE C H, KIM H Y, et al. Quality characteristics of the white birch sap with varying collection periods[J]. Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition, 2012, 41(1)：143−148.

［12］ WANG Mengze, OUYANG Xiaoyu, LIU Yaran, et al. Comparison of nutrients and microbial density in goji berry juice during lactic acid fermentation using four lactic acid bacteria strains[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(1)：e15059.

［13］ CHEN Y Q, OUYANG X Y, LAAKSONEN O, et al. Effect of *Lactobacillus acidophilus, Oenococcus oeni*, and *Lactobacillus brevis* on composition of bog bilberry juice[J]. Foods, 2019, 8(10)：430.

［14］ LIU Yaran, WANG Shaoyang, REN Jie, et al. Characterization of free and bound volatile compounds in six *Ribes nigrum* L. blackcurrant cultivars[J]. Food Research International, 2018, 103：301−315.

［15］ 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. ［HUANG Hao, ZHOU Yi, CHEN Jiahui, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation on physicochemical properties, phenolic compounds, antioxidant activity and flavor of hawthorn juice[J]. Food Science, 2022, 43(10)：97−106.］

［16］ 罗润萌，张瑜，苏巍，等. 原花青素-铁网络包裹对乳酸菌发酵黑莓汁的影响[J/OL]. 食品工业科技，1−14［2025-02-24］. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024110035. ［LUO R M, ZHANG Y, SU W, et al. Effects of proanthocyanidin-iron network encapsulation on lactic acid fermentation of blackberry juice［J/OL］. Science and Technology of Food Industry, 1−14［2025-02-24］. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024110035.］

［17］ TIITINEN K, VAHVASELKÄ M, HAKALA M, et al. Malolactic fermentation in sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) juice processing[J]. European Food Research and Technology, 2006, 222(5)：686−691.

［18］ CHEN Chen, LU Yanqing, YU Haiyan, et al. Influence of 4 lactic acid bacteria on the flavor profile of fermented apple juice[J]. Food Bioscience, 2019, 27：30−36.

［19］ YAN Yehua, ZHANG Fang, CHAI Zhengyuan, et al. Mixed fermentation of blueberry pomace with *L. rhamnosus* GG and *L. plantarum*-1：Enhance the active ingredient, antioxidant activity and health-promoting benefits[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 131：110541.

［20］ 姜文硕，伏梦，焦智渲，等. 白桦木质部汁液产量及组分变异规律解析[J]. 森林工程，2024, 40(6)：91−100. ［JIANG Wenshuo, FU Meng, JIAO Zhixuan, et al. Analysis on the variation law of xylem sap yield and components of *Betula platyphylla*[J]. Forest Engineering, 2024, 40(6)：91−100.］

［21］ 谭淇丹，燕欣，胡钟月，等. 桦树汁发酵前后成分分析及护肤功效评价[J]. 中国化妆品，2022(11)：118−123. ［TAN Qidan, YAN Xin, HU Zhongyue, et al. Composition analysis and skin care efficacy evaluation of birch juice before and after fermentation[J]. China Cosmetics Review, 2022(11)：118−123.］

［22］ 游颖, 南博, 王心哲, 等. 桦树酒体外抗氧化能力的研究[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 94−96. ［YOU Ying, NAN Bo, WANG Xinzhe, et al. The antioxidant activities of birch wine[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(3): 94−96.］

［23］ WANG Huixian, HE Xingqiao, LI Juanni, et al. Lactic acid bacteria fermentation improves physicochemical properties, bioactivity, and metabolic profiles of *Opuntia ficus-indica* fruit juice[J]. Food Chemistry, 2024, 453: 139646.

［24］ CUI Yanhua, XU Tingting, QU Xiaojun, et al. New insights into various production characteristics of *Streptococcus thermophilus* strains[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(10): 1701.

［25］ 白凤翎, 张柏林, 赵宏飞, 等. 乳酸菌蛋白代谢研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 381−384. ［BAI Fengling, ZHANG Bailin, ZHAO Hongfei, et al. Progress in protein metabolism of lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2010, 31(19): 381−384.］

［26］ EL HADI M A M, ZHANG F J, WU F F, et al. Advances in fruit aroma volatile research[J]. Molecules, 2013, 18(7): 8200−8229.

［27］ HILDEBRANDT T M, NUNES NESI A, ARAÚJO W L, et al. Amino acid catabolism in plants[J]. Molecular Plant, 2015, 8(11): 1563−1579.

［28］ 刘欣, 刘芸, 陈梅春, 等. 8 种乳酸菌发酵荔枝汁-大豆蛋白的氨基酸代谢特征研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 106−113. ［LIU Xin, LIU Yun, CHEN Meichun, et al. Study on amino acid metabolism characteristics of *Litchi* juice-soybean protein fermented by 8 kinds of lactic acid bacteria[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(23): 106−113.］

［29］ 梁华正, 张燮, 饶军, 等. 微生物挥发性代谢产物的产生途径及其质谱检测技术[J]. 中国生物工程杂志, 2008, 28(1): 124−133. ［LIANG Huazheng, ZHANG Xie, RAO Jun, et al. Generation pathway of microbial volatile metabolites and its mass spectrometry detection technology[J]. China Biotechnology, 2008, 28(1): 124−133.］

［30］ 陈倩, 李永杰, 扈莹莹, 等. 传统发酵食品中微生物多样性与风味形成之间关系及机制的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 412−419. ［CHEN Qian, LI Yongjie, HU Yingying, et al. Research progress on the relationship and mechanism between microbial diversity and flavor formation in traditional fermented foods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 412−419.］

［31］ 全琦, 刘伟, 左梦楠, 等. 乳酸菌发酵果蔬汁的风味研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(1): 315−323. ［QUAN Qi, LIU Wei, ZUO Mengnan, et al. Research progress on flavor of fruit and vegetable juice fermented by lactic acid bacteria[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(1): 315−323.］

［32］ LIANG Shan, LIU Ying, YUAN Shao, et al. Study of consumer liking of six Chinese vinegar products and the correlation between these likings and the volatile profile[J]. Foods, 2022, 11(15): 2224.

［33］ ZHANG Suling, ZHAO Huiyu, TANG Zhiwei, et al. Flavor characteristics of key aroma compounds in bayberry juice, fruit, and thinning fruit using HS-SPME coupled with GC/Q-TOF-MS[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106032.