

食蔗糖驹形氏杆菌筛选与鉴定及其在蜂蜜康普茶中的应用

钱星宇^{1,2}, 王文霞^{1,2}, 乔江涛², 拓馨宇¹, 张慧¹, 张红城², 刘利强^{1*}

(1. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北邯郸 056000)

(2. 中国农业科学院蜜蜂研究所, 资源昆虫产品加工与功能评价实验室, 北京 100093)

摘要: 分析纯种发酵蜂蜜康普茶在发酵期间主要化学成分的变化, 以开发新型康普茶。采用稀释涂布平板法及 16S rDNA 技术筛选优势醋酸菌; 分别采用 pH 计、液相色谱-质谱联用法和气相色谱-质谱联用法测定蜂蜜康普茶与蔗糖康普茶在 0、2、4、7、9、11、14 d 的 pH 值、碳水化合物及挥发性成分变化, 并进行感官评价。筛选出一株食蔗糖驹形氏杆菌 *Komagataeibacter saccharivorans* 3-3; 0~14 d 时, 蜂蜜康普茶与蔗糖康普茶的 pH 值分别由 5.16 降至 2.97 ($P<0.05$), 5.41 降至 4.02 ($P<0.05$); 葡萄糖含量分别由 21.76 g/L 降至 4.64 g/L ($P<0.05$), 0.83 g/L 增至 5.08 g/L ($P<0.05$); 果糖含量分别由 20.96 g/L 降至 1.63 g/L ($P<0.05$), 0.27 g/L 增至 4.45 g/L ($P<0.05$); 蔗糖含量分别由 2.89 g/L 降至 1.12 g/L ($P<0.05$), 58.03 g/L 降至 29.04 g/L ($P<0.05$); 蜂蜜康普茶发酵液中共检出 62 种主要挥发性物质, 蔗糖康普茶检出 49 种主要挥发性物质, 纯种蜂蜜康普茶感官评价总分为 25 分, 纯种蔗糖康普茶感官评价总分为 20 分。纯种蜂蜜康普茶感官接受度较好, 产品品质较高, 为开发新型康普茶提供思路。

关键词: 食蔗糖驹形氏杆菌; 蜂蜜康普茶; 碳水化合物; 挥发性成分

文章编号: 1673-9078(2025)10-175-186

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0924

Screening and Identification of *Komagataeibacter saccharivorans* and Its Application in Honey-based Kombucha

QIAN Xingyu^{1,2}, WANG Wenxia^{1,2}, QIAO Jiangtao², TUO Xinyu¹, ZHANG Hui¹, ZHANG Hongcheng²,
LIU Liqiang^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

(2. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Laboratory for Processing and Functional Evaluation of Resource Insect Products, Beijing 100093, China)

Abstract: Alterations in the major chemical constituents of pure-strain fermented honey-based kombucha during the fermentation process were extensively evaluated, with the objective of developing a novel kombucha beverage. The dominant acetic acid-producing bacteria were screened using the dilution plate method and 16S rDNA technology. Variations in pH value, carbohydrate content, and volatile components within the honey- and sucrose-based kombucha fermentation broths at specific time points (0, 2, 4, 7, 9, 11, and 14 days) were determined using a pH meter, liquid chromatography-mass spectrometry, and gas chromatography-mass spectrometry, respectively. Sensory evaluations were also performed. A specific strain of *Komagataeibacter*

引文格式:

钱星宇,王文霞,乔江涛,等.食蔗糖驹形氏杆菌筛选与鉴定及其在蜂蜜康普茶中的应用[J].现代食品科技,2025,41(10):175-186.

QIAN Xingyu, WANG Wenxia, QIAO Jiangtao, et al. Screening and identification of *Komagataeibacter saccharivorans* and its application in honey-based kombucha [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 175-186.

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2024-08-22; 接受日期: 2024-08-29

作者简介: 钱星宇 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1760380914@qq.com

通讯作者: 刘利强 (1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 动物源食品中致病微生物的检测与控制, E-mail: 464703755@qq.com

saccharivorans, identified as 3-3, was selectively isolated and utilized in the study. Over a 14-day period, the pH values of honey- and sucrose-based kombuchas decreased from 5.16 to 2.97 ($P<0.05$) and from 5.41 to 4.02 ($P<0.05$), respectively. The glucose content decreased from 21.76 to 4.64 g/L ($P<0.05$) in honey-based kombucha and increased from 0.83 to 5.08 g/L ($P<0.05$) in sucrose-based kombucha. Similarly, the fructose content decreased from 20.96 to 1.63 g/L ($P<0.05$) in honey-based kombucha and increased from 0.27 to 4.45 g/L ($P<0.05$) in sucrose-based kombucha. The sucrose content decreased from 2.89 to 1.12 g/L ($P<0.05$) in honey-based kombucha and from 58.03 to 29.04 g/L ($P<0.05$) in sucrose-based kombucha. Sixty-two major volatile compounds were detected in honey-based kombucha, whereas 49 were identified in sucrose-based kombucha. Sensory evaluation yielded a total score of 25 for pure-strain honey-based kombucha and 20 for pure-strain sucrose-based kombucha, indicating greater sensory acceptance and product quality for the honey-based variant. The pure-strain honey-based kombucha beverage has good sensory acceptance and high product quality, thus providing a foundation for developing new types of kombucha beverages.

Key words: *Komagataeibacter saccharivorans*; honey-based kombucha; carbohydrate; volatile component

康普茶 (Kombucha) 是一种发源于我国的传统发酵饮品, 通常以红茶、白砂糖为基底, 由醋酸菌、乳酸菌及酵母菌组成的混合菌群 (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast, SCOBY) 发酵而成, 口感清爽、微甜、微酸。康普茶的发酵过程主要为醋酸发酵与酵母发酵两部分, 酵母菌发酵蔗糖, 产生乙醇; 醋酸菌利用葡萄糖及产生的乙醇生产乙酸、葡萄糖酸及葡萄糖醛酸。康普茶成分复杂, 具有多种功能活性, 如抗菌、抗氧化、降血压、保肝作用、提高免疫力等^[1,2], 因此康普茶逐渐受到西方国家市场的青睐。目前, 筛选康普茶中的优势微生物作为发酵菌种并寻找康普茶发酵中的潜在替代物以开发新型康普茶已成为研究热点。

康普茶中醋酸菌的主要优势菌株为驹形杆菌属 (*Komagataeibacter*)、葡糖醋杆菌属 (*Gluconobacter*) 及醋酸杆菌属 (*Acetobacter*)。酵母菌主要由酿酒酵母属 (*Saccharomyces*)、裂殖酵母属 (*Schizosaccharomyces*)、孢圆酵母属 (*Torulaspora*) 及接合酵母属 (*Zygosaccharomyces*) 等组成^[3,4]。目前, 康普茶的主要发酵方式为 SCOBY 自然发酵, SCOBY 中微生物群落组成复杂, 不适合工业化生产, 且存在菌种易退化、产生杂菌及霉菌污染、不易保藏等食品安全问题, 无法保证产品的安全性及稳定性。Barbosa 等^[4]发现康普茶中存在一种致病真菌, 马拉色菌 (*Malassezia*)。此外, Andreson 等^[5]分析了 16 种不同来源的康普茶微生物组成, 发现 S、M 和 H 生产商的康普茶存在不同群体, 证实了不同发酵环境的康普茶微生物组成具有差异。因此, 筛选优势菌发酵康普茶有利于产品的安全性与稳定性。驹形杆菌属 (*Komagataeibacter saccharivorans*、*Komagataeibacter rhaeticus* 等) 是从康普茶中分离出的主要功能性醋酸菌, 目前, 纯种康普茶的发酵菌种多为温驯驹形氏杆菌 (*Komagataeibacter oboediens*)、木糖驹形氏杆菌 (*Komagataeibacter xylinus*) 等, 采用食蔗糖驹形氏杆菌 (*Komagataeibacter saccharivorans*) 发酵康普茶

的报道较少^[6,7]。

发酵过程中的碳源很大程度上决定了康普茶的最终口感、风味及营养物质。传统的康普茶使用蔗糖作为发酵底物, 然而由于蔗糖热量高, 长期使用增加了肥胖和患糖尿病等慢性疾病的风险。此外蔗糖中除了碳水化合物外几乎不含其他营养成分。因此, 人们一直致力于找到蔗糖的替代品生产康普茶。蜂蜜作为天然甜味物质, 不仅含有单糖能够满足康普茶发酵底物要求, 还含有多种营养成分及丰富的风味物质^[8]。同时, 蜂蜜具有多种功能活性, 如抗菌、抗炎、抗氧化等, 不仅能够作为碳源替代物及甜味剂发酵康普茶, 还有助于提高产品品质^[9]。蜂蜜的高糖浓度及抗菌活性都能够在一定程度上抑制杂菌及病原菌的生长^[10]。除此之外, 蜂蜜能够丰富康普茶中的发酵微生物, 促进康普茶中活性成分的生成, 因此用蜂蜜代替传统康普茶发酵用的蔗糖有助于提高产品品质及风味。

本研究以蜂蜜代替蔗糖作为发酵基底, 采用纯种发酵生产康普茶, 对康普茶发酵过程中的主要化学成分进行分析, 并进行感官评价, 以改善康普茶风味及口感, 开发新型蜂蜜康普茶。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红茶, 黄山青谷茶叶有限责任公司; 洋槐蜜, 山东蜜源经贸有限公司; 康普茶发酵液及菌膜, 黄山青谷茶叶有限责任公司; 葡萄糖、果糖、蔗糖标准品 (98%), 上海源叶生物科技有限公司; 氨水 (色谱级), 北京索莱宝科技有限公司; 乙酸, 美国赛默飞世尔公司; 乙腈 (色谱级), 美国赛默飞世尔公司; 乙醇, 山东名德医疗科技有限公司; 0.22 μm 滤膜 (Milipore), 默克密理博公司; 革兰氏染液, 北京索莱宝科技有限公司; 细菌微量生化反应管, 杭州微生物试剂有限公

司;瓷珠菌种保存管,青岛海博生物技术有限公司;葡萄糖、氯化钠,北京奥博星生物技术有限公司;碳酸钙、琼脂粉、酵母膏、蛋白胨,北京索莱宝科技有限公司;柠檬酸,天津市福晨化学试剂厂;十二水合磷酸氢二钠,西陇化工股份有限公司;细菌 DNA 提取试剂盒,天根生化科技北京有限公司。

1.2 仪器与设备

BSA124S-CW 型分析天平,德国赛多利斯公司;SevenEasys20 型 pH 计,瑞士梅特勒公司;SW-CJ-1D 垂直净化工作台,苏州天创净化设备有限公司;LS-50HD 立式压力蒸汽灭菌器,江阴滨江医疗设备有限公司;HERAcell150 恒温培养箱,美国赛默飞世尔公司;HZQ-F160 恒温振荡培养箱,苏州培英实验设备有限公司;Pro96GPCR 扩增仪,杭州秋籁科技有限公司;ThermoSovall 台式离心机,美国赛默飞世尔公司;Finnpipette 移液枪,美国赛默飞世尔公司;Milli-Q-IQ7000 超纯水系统,默克密理博公司;1260-6460LC-QQQ 液相色谱-三重四极杆质谱联用仪,美国安捷伦公司;7890B-7200GC-QTOF 气相色谱-四极杆飞行时间质谱联用仪,美国安捷伦公司。

1.3 培养基

活化培养基:20 g 葡萄糖、10 g 酵母膏、1 L 去离子水,调节 pH 值为 6.8,121 °C 灭菌 20 min,灭菌后加入 3% (V/V) 乙醇。

葡萄糖培养基:20 g 葡萄糖、10 g 酵母膏、20 g 碳酸钙、15 g 琼脂、1 L 去离子水,调节 pH 值为 6.8,121 °C 灭菌 20 min,灭菌后加入 3% (V/V) 乙醇。

HS 培养基:20 g 葡萄糖、5 g 蛋白胨、5 g 酵母膏、1.15 g 柠檬酸、6.8 g 十二水合磷酸氢二钠,乙酸调节 pH 值为 6.0。

1.4 实验方法

1.4.1 康普茶菌种筛选与纯化

取 10% (V/V) 康普茶发酵液及 1% (m/V) 菌膜放入活化培养基中,30 °C 培养 3~5 d。无菌操作取活化后的 1 g 菌膜及 10 mL 发酵液放入装有 90 mL 无菌生理盐水的研钵中,充分研磨。溶液混合均匀后,吸取 1 mL 至 9 mL 无菌生理盐水中,此时的稀释度为 10^{-2} ,按照此方法,依次将梯度稀释为 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 及 10^{-6} 浓度。分别吸取 10^{-4} 、 10^{-5} 及 10^{-6} 稀释浓度各 200 μ L 涂布于葡萄糖培养基,于 30 °C 培养 3~5 d。待菌落长出后,挑取有透明圈的不同形态菌落进行反复纯化,对其进行革兰氏镜检并接种到 HS 培养基中。选择产菌膜的菌株进行生化鉴定,利用基因组 DNA

提取试剂盒提取革兰氏阴性杆菌 DNA,扩增 16S rDNA 序列,菌株保存于 -80 °C 瓷珠保存管。

16S rDNA 序列的引物为:

338F: 5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3'

806R: 5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'

PCR 的反应体系为: DNA 模板 2 μ L, 正向引物 1 μ L, 反向引物 1 μ L, BSA 3 μ L, Mix 酶 12.5 μ L, ddH₂O 5.5 μ L。

PCR 扩增体系为: 95 °C 预变性 5 min, 95 °C 变性 45 s, 55 °C 退火 50 s, 72 °C 延伸 45 s, 28 个循环, 72 °C 再延伸 10 min, 扩增产物送至北京奥维森基因科技有限公司进行测序,将测序结果在 NCBI (National Center for Biotechnology Information) 中进行 BLAST 比对,构建系统发育树。

1.4.2 康普茶的制备

纯种发酵蜂蜜康普茶: 将 8 g 红茶在煮沸后的 1 000 mL 纯净水中浸泡 10 min, 经 4 层灭菌纱布过滤茶叶, 冷却片刻后加入 60 g 洋槐蜜, 待溶液完全冷却至室温后接入 2% (V/V) 纯化后的菌种, 用纱布封口, 于 25 °C 恒温箱静置有氧发酵 14 d。分别在 0、2、4、7、9、11、14 d 定时无菌操作取 20 mL 样品于试管中, -20 °C 保存备用, 以进行后续测定。纯种发酵蔗糖康普茶: 以蔗糖替换蜂蜜, 其余都相同。每个试验重复 3 次。

1.4.3 pH值的测定

取样后, 采用 pH 计直接测定样品 pH 值。

1.4.4 葡萄糖、蔗糖、果糖含量测定

1.4.4.1 标准曲线溶液配制

分别吸取适量体积的标准品, 溶于纯净水中, 配置成质量浓度范围为 50 μ g/L~2 mg/L 的混合标准工作液。

1.4.4.2 样品前处理

将样品置于 4 °C 解冻后, 加入 50 mL 离心管中, 于 9 000 r/min 离心 15 min, 取 2 mL 上清液于 10 mL 试管中, 经 0.22 μ m 滤膜过滤后稀释 1 000 倍, 上机检测。

1.4.4.3 色谱仪条件

色谱柱: HILIC (2.1 $\times$ 100 mm $\times$ 2.7 μ m, 美国 Agilent 公司); 柱温 35 °C; 进样量: 5 μ L; 流量: 5 mL/min; 流动相 A: 0.3% 氨水, 流动相 B: 乙腈^[11]。

1.4.5 挥发性成分的测定

1.4.5.1 样品前处理

将样品置于 4 °C 解冻后, 取 2 mL 样品加入 10 mL 离心管中, 于 9 000 r/min 离心 15 min, 取上清液于烧杯中, 经 0.22 μ m 滤膜过滤, 置于热搅拌器上加热, 于 65 °C 下平衡 15 min, 使用 SPME Arrow 1 萃取头萃取 40 min, 进样口解析 3 min。

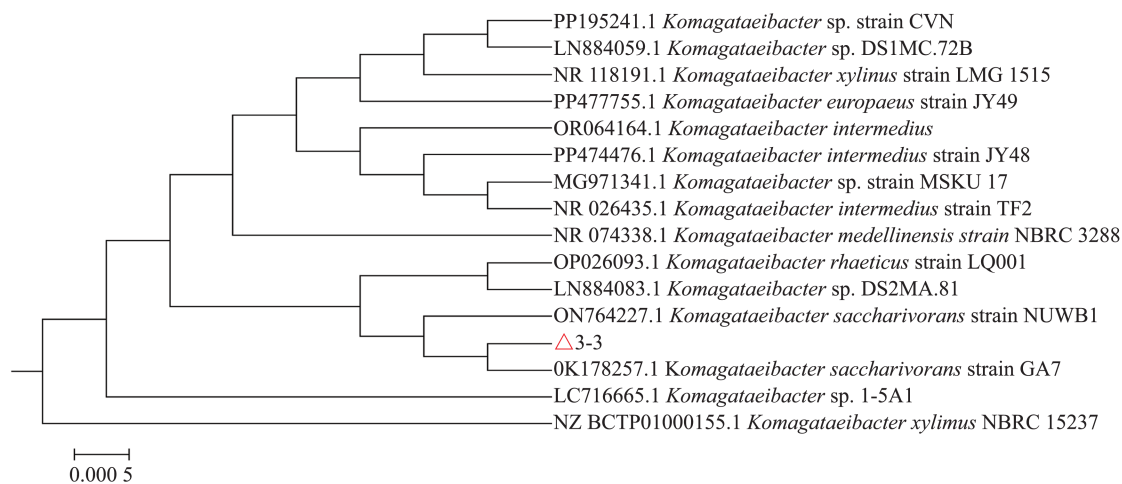


图 1 3-3 菌株基于 16S rDNA 序列的系统发育树

Fig.1 Phylogenetic tree based on 16S rDNA sequence of strain 3-3

1.4.5.2 气相色谱条件

色谱柱：Agilent HP-5MS UI（30 m×0.25 mm×0.25 μm，美国 Agilent 公司）；进样方式：不分流进样；进样口温度：35 ℃；载气：氦气；升温程序：起始柱温为 35 ℃，保持 2 min，以 10 ℃/min 升到 100 ℃，以 5 ℃/min 升到 260 ℃，保持 5 min。

1.4.5.3 质谱主要条件

电离方式：EI；离子源温度：230 ℃；接口温度：250 ℃^[12]。

1.4.6 感官评价

表 1 纯种发酵康普茶的感官评价表

Table 1 Sensory evaluation form for pure culture fermented kombucha		
项目	评价标准	分值/分
口感	口感顺滑、清爽，无涩味，不刺激口腔	5~7
	口感酸涩，略有刺激	2~4
	吞咽明显刺激口腔，有辛辣感	0~1
风味	茶香，复合酸味，有各种醇类、酯类香味	5~7
	茶香较淡，有微酸味或异味，香气较淡	2~4
	无茶香或刺鼻酸味或异味	0~1
色泽	橙黄色或杏黄色，色泽均匀鲜亮	5~7
	棕褐色或色泽分布不均	2~4
	深褐色或淡黄色	0~1
透明度	清澈透明，无沉淀物，细菌纤维素膜较厚	5~7
	浑浊不清，有部分沉淀或悬浮物，细菌纤维素较薄	2~4
	发酵液有大量细菌沉淀，透明度差，无纤维素菌膜	0~1
酸度	酸甜适中	5~7
	酸度较淡	2~4
	极酸或基本无酸味	0~1

采用综合评分法^[13,14]，选择 20 名（10 名男生，10 名女生）感官特性正常的人员作为评估员，通过康普茶感官培训，熟悉评价的色、香、味、质地、风格、特征及检测所需的方法，掌握感官评价术语后对康普茶口感、风味、色泽、透明度、酸度五个方面进行评价。本次评价需在安静且无异味的场所中进行，按照感官评价表对康普茶进行打分，取 20 份感官评价表的平均值作为最后结果。纯种发酵康普茶的感官评价表见表 1。

1.5 数据处理

采用 Origin 2022 及 SPSS 27.0 处理数据， $P<0.05$ 表示差异显著，MEGA 7.0 构建系统发育树。

2 结果与讨论

2.1 康普茶菌种筛选与纯化

从康普茶中分离出一株菌，编号 3-3，其菌落圆形，表面光滑，扁平，不透明，呈淡黄色。生理生化结果如表 2。用 PCR 法扩增得到 3-3 的 16S rDNA 序列，通过 BLAST 比对，利用 MEGA 构建系统发育树，如图 1。3-3 与 *Komagataeibacter saccharivorans* 聚为一支，亲缘关系较近，因此确定 3-3 为 *Komagataeibacter saccharivorans*（食蔗糖驹形杆菌）。大多数 *Komagataeibacter* 菌株具有高度耐酒精、耐酸及高产纤维素能力。Wang 等^[13]发现，从醋发酵液中筛选出的 *K.oboediens* 和 *K.europaeus* 菌株能够耐受高达 15%~20% 的酸度，在这种酸度下，许多微生物都难以存活，这些菌株在极端酸度环境下仍能生存并发挥正常功能的关键可能是由于它们的细胞内蛋白质具有快速适应的能力。此外，在 *Komagataeibacter* 菌株发酵过程中，能够在发酵液表面形成一层细菌纤维素膜，这种纤维素膜具有网状结构、高孔隙率及良好的

渗透率，能够为发酵体系中的好氧微生物提供良好的氧气输送通道，维持发酵环境的稳定性，确保发酵的顺利进行^[15]。

表 2 3-3菌株的生理生化鉴定结果
Table 2 Physiological and biochemical identification results of strain 3-3

试验项目	3-3
接触酶	+
葡萄糖	+
乳糖	-
半乳糖	+
甘油	+
氧化酶	-

2.2 pH值在发酵期间的变化分析

纯种发酵的蜂蜜及蔗糖康普茶发酵样品在 0、2、4、7、9、11、14 d 内的 pH 值变化如图 2 所示，蜂蜜康普茶的 pH 值由 5.16 持续下降至 2.97，蔗糖康普茶的 pH 值由 5.41 持续下降至 3.04，由于蜂蜜的 pH 值通常在 3.2~4.5 之间，因此蜂蜜康普茶发酵液的 pH 值整体略低于蔗糖康普茶。在 0~4 d 之间，蜂蜜康普茶的 pH 值由 5.16 快速下降至 3.81 ($P<0.05$)，此时碳源充足，食蔗糖驹形氏杆菌迅速繁殖，它们不仅能够快速分解蜂蜜中的果糖，将其转化为乙酸，增加发酵液的酸度；同时，蜂蜜中丰富的葡萄糖也被其直接转化为葡萄糖酸和葡萄糖醛酸，进一步提升了整体的酸度水平。这一过程不仅表明食蔗糖驹形氏杆菌具有强大的代谢能力，也体现了其在发酵食品生产中可能带来的风味与品质变化。在 4~14 d 之间，pH 值下降速度减慢，蜂蜜康普茶的 pH 值由 3.81 降至 2.97 ($P<0.05$)，逐渐趋于平缓，分析原因为此时碳源逐渐消耗殆尽，食蔗糖驹形氏杆菌繁殖速度减慢，代谢活动减弱。另一方面，除乙酸外，在康普茶的发酵过程中还可以产生其他有机酸，例如葡萄糖醛酸、琥珀酸、DSL、乳酸、柠檬酸、苹果酸、酒石酸等，均会造成发酵液 pH 值的下降，有利于康普茶独特风味的形成^[16]。0~4 d 之间，蔗糖康普茶的 pH 值由 5.41 下降至 4.49 ($P<0.05$)，4~7 d 之间，蔗糖康普茶的 pH 值由 4.49 降至 4.02 ($P<0.05$)。发酵过程中，溶液的酸度增加表明微生物的数量随之上升，酸度变化越快，微生物生长速率越快，与蜂蜜康普茶相比，蔗糖康普茶的 pH 值降幅较小，其中的食蔗糖驹形氏杆菌生长受限，产酸能力下降。在 Suffys 等^[11]的研究中，描述了康普茶发酵液在发酵过程中 pH 值的降低现象，在 0~14 d 内 pH 值由 4.05 降至 3.00，

降低趋势表现为初期较快而后逐渐放缓。

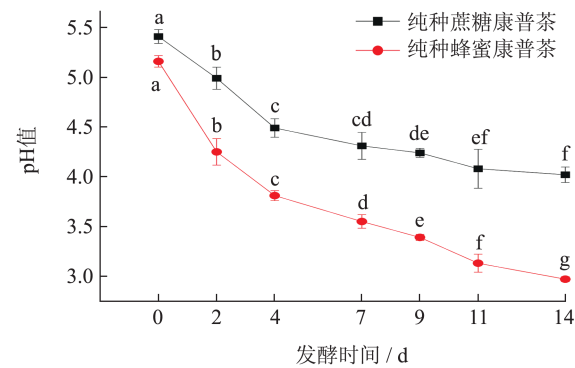


图 2 发酵时间对蜂蜜、蔗糖康普茶样品 pH 值的影响
Fig.2 Effect of fermentation time on the pH value of honey and sucrose kombucha samples (n=3)

注：不同小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$)。

2.3 葡萄糖、蔗糖、果糖含量在发酵期间的变化分析

蜂蜜康普茶活化培养基中的糖类主要来源于蜂蜜。据报道，蜂蜜中糖类主要可以分为单糖、双糖、低聚糖及多糖，其中单糖约占 75%，单糖主要是由 32%~44% 的果糖与 23%~38% 的葡萄糖组成，双糖主要是 7% 的麦芽糖及 1% 的蔗糖^[17]。蜂蜜不仅作为甜味剂与 SCOBY 中的微生物生长所必需的碳源存在，还参与微生物的代谢活动和纤维素的生产过程^[18]。发酵后，糖含量下降，表明发酵液中存在消耗糖类的代谢活动，从发酵开始，发酵液中的食蔗糖驹形氏杆菌就在消耗碳源以满足自身生长需求及代谢活动，发酵期间蜂蜜康普茶与蔗糖康普茶发酵液的碳水化合物变化如图 3 所示。在 0~7 d 时，发酵液中的蔗糖、果糖及葡萄糖含量消耗较快，蜂蜜康普茶发酵液中的蔗糖由 2.89 g/L 降至 1.72 g/L ($P<0.05$)，果糖由 20.29 g/L 降至 7.29 g/L ($P<0.05$)，葡萄糖由 21.76 g/L 降至 11.27 g/L ($P<0.05$)。在发酵初期，食蔗糖驹形氏杆菌展现出其独特的代谢优势，表现为繁殖旺盛且代谢活动显著增强。这一阶段，它们能够高效地利用发酵液中的糖类物质作为能源和底物，通过糖酵解途径和三羧酸循环等代谢途径进行生长与代谢活动。随着代谢的进行，果糖与葡萄糖被逐步转化为乙酸等有机酸，这一转化过程正是康普茶发酵中酸味产生的初始阶段。食蔗糖驹形氏杆菌的这种高效利用葡萄糖与果糖并生成乙酸的能力，不仅为后续的发酵过程提供了必要的能量和底物，还奠定了康普茶独特风味的基础，为后续的风味发展开启了序幕。7~14 d 时，蔗糖由 1.72 g/L 降至 1.12 g/L ($P<0.05$)，果糖由 7.29 g/L 降

至 1.63 g/L ($P<0.05$), 葡萄糖由 11.27 g/L 降至 4.64 g/L ($P<0.05$)。随着发酵的继续, 蔗糖、果糖及葡萄糖的消耗速率逐渐减缓, 蔗糖逐渐趋于消耗殆尽的阶段。在这一阶段, 食蔗糖驹形氏杆菌以剩余的葡萄糖与果糖为主要底物, 继续其活跃的代谢过程。这一过程不仅促进了发酵的深入进行, 还最终促成了康普茶独特风味的形成。

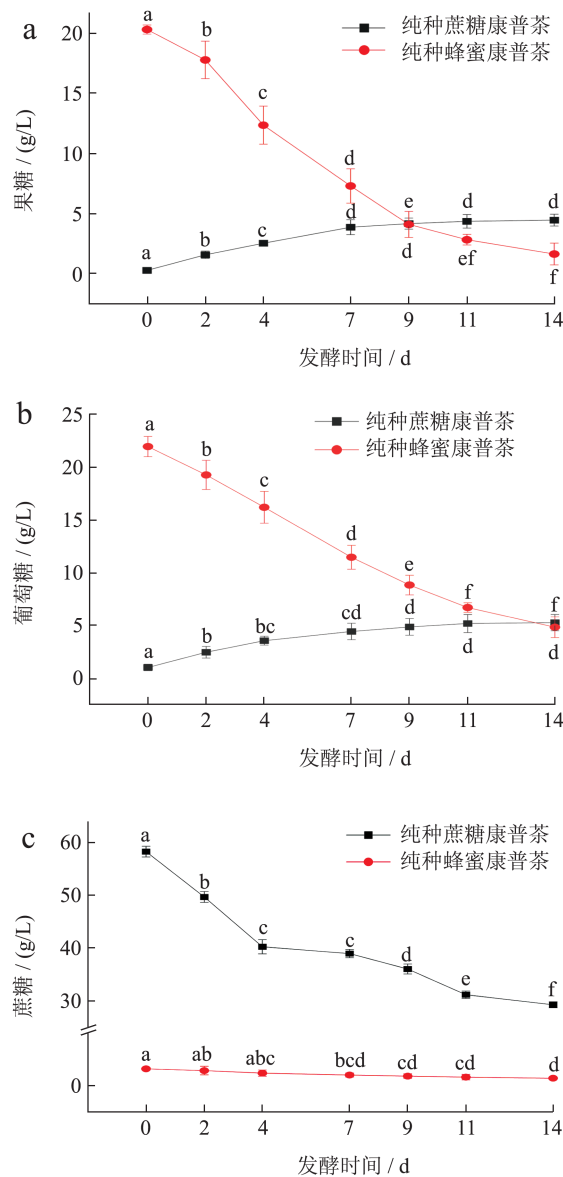


图 3 发酵时间对蜂蜜康普茶及蔗糖康普茶发酵液中碳水化合物的影响

Fig.3 Effect of fermentation time on the carbohydrates present in the fermentation broth of honey kombucha and sucrose kombucha ($n=3$)

注: 不同小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$)。

在发酵过程中, 蔗糖康普茶发酵液中的蔗糖由

58.03 g/L 降至 29.04 g/L ($P<0.05$), 果糖由 0.27 g/L 增至 4.45 g/L ($P<0.05$), 葡萄糖由 0.83 g/L 增至 5.08 g/L ($P<0.05$)。Zou 等^[19]利用纯蔗糖发酵康普茶, 结果表明蔗糖在 0~8 d 时, 由 80.00 g/L 降至 0.00 g/L, 葡萄糖与果糖的含量在 0~6 d 均呈现出上升的趋势, 葡萄糖含量由 0.00 g/L 升至 16.00 g/L, 果糖含量由 0.00 g/L 升至 15.00 g/L。此时蔗糖含量较高, 蔗糖的分解在初期迅速进行, 从而导致了葡萄糖和果糖含量的显著增加, 在 6~14 d 内果糖与葡萄糖含量均呈现下降的趋势直至平缓, 尽管葡萄糖作为能量来源被逐渐消耗, 但其消耗的速度并未超过其因蔗糖分解而增加的速度, 因此最终葡萄糖与果糖的总含量仍高于发酵初始的水平, 而蔗糖的含量则显著降低。在本研究中, 蔗糖的利用率较低, 且果糖与葡萄糖含量并未出现先上升后下降趋势, 相较于蔗糖, 食蔗糖驹形氏杆菌更倾向于利用葡萄糖与果糖。在蔗糖作为主要底物的发酵环境中, 由于需要先将蔗糖分解为单糖才能被有效利用, 因此食蔗糖驹形氏杆菌的生长速度受到了一定程度的限制, 其代谢能力也相应减弱, 表现为生长缓慢和代谢效率不高。由于蜂蜜中蔗糖含量较低, 蜂蜜康普茶发酵液中果糖与葡萄糖的含量均未出现增加趋势, 而是持续下降直至发酵结束。这表明, 与蔗糖发酵相比, 使用蜂蜜作为发酵底物时, 微生物无需经历将蔗糖分解为果糖和葡萄糖的复杂过程, 而是直接利用蜂蜜中的果糖与葡萄糖进行发酵, 从而能够有效缩短发酵时间, 提高发酵效率, 也为未来优化康普茶发酵工艺提供了新思路。

2.4 挥发性成分在发酵期间的变化分析

在康普茶发酵中, 醇、醛、酸及酯等挥发性成分的形成及转化是影响康普茶的品质与风味的决定性因素之一^[20]。随着消费者对康普茶感官品质及健康作用的需求增加, 挥发性成分的研究备受关注。本文使用食蔗糖驹形氏杆菌发酵蜂蜜康普茶与蔗糖康普茶, 蜂蜜康普茶检测出挥发性成分共 62 种, 分别为羧酸类 9 种、醇类 7 种、醛类 10 种、苯类 8 种、酯类 15 种、酮类 8 种、酚类 1 种及萜烯类 4 种; 蔗糖康普茶检出 49 种挥发性成分, 分别为羧酸类 8 种, 醇类 5 种, 醛类 8 种, 苯类 6 种, 酯类 11 种, 酮类 6 种, 酚类 1 种, 萜烯类 4 种, 如表 3 所示。通过对比可以发现, 蜂蜜康普茶相较于蔗糖康普茶多出了 13 种挥发性物质, 如癸酸、苧醇、2-己烯醛、壬醛、樟脑、水杨酸甲酯、乙酸苯乙酯、 β -紫罗兰酮、 α -柏木烯等重要香味物质。这一发现表明蜂蜜作为发酵基质, 为康普茶增添了更

为丰富的香气成分。因此,从促进纯种发酵康普茶风味多样性的角度来看,蜂蜜比蔗糖更为优越,能够赋予康普茶更加复杂且诱人的香气特性,这一研究结果为未来康普茶发酵工艺的优化及风味改善提供参考。发酵期间不同挥发性成分的变化如图4所示,在发酵过程中,总挥发性成分的含量呈现上升趋势,同时,不同类别的挥发性成分之间的相对含量产生不同的动态变化。发酵结束后,蜂蜜康普茶中羧酸类成分的相对含量由3.83%增加至30.43%,主要是乙酸、异戊酸、癸酸、辛酸、壬酸含量增多;醇类成分由5.56%增至10.67%,主要是 α -松油醇、苯乙醇、薄荷脑含量增多;在发酵过程中,初期并未检测到乙酸异戊酯、异氰酸酯及乙酸苯乙酯这三种酯类成分,然而,随着发酵的深入进行,它们的含量逐渐上升,分别达到0.568%、1.326%和0.154%,这些变化影响了最终产品的风味特征。

康普茶原始基质的特征性香味化合物,如茶香酮、壬酸及萜烯类衍生物,有助于康普茶标志性气味的形成。其最终风味还取决于发酵条件如基质的选择、蔗糖浓度、发酵时间、微生物组成、发酵温度等^[21,22]。Zhang等^[23]深入研究了康普茶的风味构成,揭示了其独特风味还可能源自茶基底与草本成分,共检测出46种关键风味化合物,并指出苯乙醇、癸醇、辛酸及其乙酯类(辛酸乙酯、癸酸乙酯)可作为康普茶特征风味的标志性。影响康普茶初始发酵风味的主要化合物为洋槐蜜及红茶中的芳樟醇(花果香)、(R)-(+)-柠檬烯(柑橘味)、茶香酮(茶木香)、壬酸(脂肪及椰香)、苯甲醛(杏仁味)、糠醛(杏仁味)、 α -松油醇(丁香香味)等,使得发酵液初期(0~2 d)整体呈现柑橘花香味^[24]。随着发酵的进行(2~4 d),大马士酮(茶木香)、乙酸苯乙酯(蜂蜜甜香)及3-萜烯(松木香)等物质的形成,使得发酵液呈现柑橘-草本味。Ho等^[25]认为发酵过程中茶汤中类胡萝卜素的不断分解对大马士酮含量的增加产生了影响,此外,茶叶中苯类及醛类物质的减少可能与发酵过程中微生物的降解有关^[26]。在发酵后期(7~14 d), α -松油醇(丁香香味)、苯乙醇(玫瑰花香)、薄荷脑(薄荷香味)、异佛尔酮(薄荷香味)、樟脑(辛香)及挥发性酸含量逐渐增加,发酵液甜味减少,逐渐呈现辛辣花香味^[11]。挥发性酸是康普茶发酵中的重要芳香化合物,会赋予产品腐臭

味或奶酪味。发酵过程中产生的醇与苯、醛、酮是醋酸菌生成有机酸及芳香化合物的底物^[11,18,27]。酯类是构成康普茶最终风味的重要化合物,酯类的形成与脂肪酸与氨基酸代谢密切相关^[28]。在本研究中,乙酸乙酯(菠萝味)、癸酸乙酯(果香)、乙酸异戊酯(香蕉及梨香)、乙酸苯乙酯(花香、蜜香、果香)等均被检出,参与了康普茶特殊风味的组成。醛类化合物因其特有的青草及脂肪味,常被视作发酵饮品中的不良风味成分。在发酵初期,如辛醛、壬醛、苯乙醛等醛类物质被检出,但随着发酵过程的深入,这些醛类的相对含量逐渐降低。

2.5 感官评价

两种康普茶发酵液的感官评价结果如图5、6所示,纯种蜂蜜康普茶总分(25分)高于纯种蔗糖康普茶(20分)。纯种蜂蜜康普茶具有浓郁的花香、果香与蜂蜜味(6分),色泽透亮(5分),澄清度高(5分),但酸度略高,有一定的刺激感(4分),在口感上表现为顺滑,但稍有刺激性(5分)。纯种蔗糖康普茶有较淡的茶香味,但果香及蜂蜜香味不足,影响了整体风味的层次感(4分),发酵液较为澄清(5分),在酸度方面,该饮品略显不足,未展现出足够的刺激与活力,这可能也是导致其口感平淡的一个原因(4分),色泽较深,不够清新(4分),在口感上,较为平淡,缺乏独特风味(3分)。分析原因可能是由于蜂蜜为康普茶带来的独特香气与微生物发酵气味相结合,形成了丰富的口感与层次,更受受试者喜爱,而蔗糖康普茶由蔗糖发酵,甜味较为单一,风味相对简单。蜂蜜康普茶的酸度普遍高于蔗糖康普茶,本实验中,在相同发酵时间内,纯种蜂蜜康普茶酸度更高,在Fernando等^[16]的研究中,蜂蜜康普茶的酸度显著高于蔗糖康普茶,赋予产品强烈的醋香味。此外,在Wang等^[13]的研究中,与商业康普茶相比,纯种发酵的康普茶可通过缩短发酵时间4~5 d达到相同的风味,同时,未过滤茶叶发酵的康普茶香气物质与感官评价总分结果皆优于过滤茶叶后发酵的康普茶。因此为了提高蜂蜜康普茶的感官接受度,可考虑未来采用茶叶发酵康普茶,并缩短发酵周期以生产酸度适中、风味多样的纯种蜂蜜康普茶。

表 3 发酵期间主要挥发性成分的变化 (相对百分含量/%)

Table 3 Changes in the major volatile components during fermentation (Relative percentage content/%)																	
类 别	RT/min	化合物名称	CAS 编号	0 d		2 d		4 d		7 d		9 d		11 d		14 d	
				蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖
羧 酸 类	3.900	乙酸	64-19-7	2.06	1.23	2.56	1.89	5.44	4.60	6.03	7.00	7.98	6.82	8.30	7.44	8.63	8.06
	7.258	2-甲基丁酸	116-53-0	nd	nd	0.14	nd	0.93	0.26	1.17	0.58	1.29	1.96	1.51	1.27	1.71	1.48
	7.597	异戊酸	503-74-2	0.11	nd	1.79	nd	6.32	3.24	6.87	4.19	7.80	5.73	8.28	7.23	8.66	7.00
	9.495	己酸	142-62-1	0.50	0.30	0.64	0.49	0.66	0.89	0.48	1.03	0.35	1.24	0.22	0.92	0.32	1.16
	12.203	异辛酸	149-57-5	0.05	nd	0.28	0.08	0.38	0.06	0.49	0.12	0.58	0.44	0.69	0.34	0.87	0.12
	13.139	苯甲酸	65-85-0	0.17	nd	0.02	nd	0.05	0.26	0.06	0.18	0.29	0.10	0.03	0.10	0.03	0.08
	13.307	辛酸	124-07-2	0.12	0.21	1.13	0.47	1.96	1.48	2.05	1.88	2.23	2.02	2.53	2.01	2.74	1.50
	15.755	壬酸	112-05-0	0.34	0.36	3.28	2.34	5.90	4.36	6.69	5.18	4.08	5.00	3.04	6.10	1.27	5.53
	17.897	癸酸	334-48-5	0.46	nd	0.11	nd	0.15	nd	0.55	nd	0.72	nd	5.32	nd	6.20	nd
	10.409	异辛醇	104-76-7	0.33	0.37	0.21	0.36	0.52	0.46	0.73	0.61	0.66	0.59	0.53	0.62	0.89	0.77
醇 类	10.603	苯醇	100-51-6	0.15	nd	0.49	nd	0.59	nd	0.60	nd	0.31	nd	0.23	nd	0.02	nd
	11.882	芳樟醇	78-70-6	4.31	0.04	4.53	0.52	4.12	0.43	7.43	1.09	8.11	2.43	2.19	1.96	3.79	2.01
	12.244	苯乙醇	60-12-8	0.08	0.08	0.49	0.35	0.28	0.31	0.02	0.13	0.02	0.10	0.01	0.94	1.69	1.11
	13.559	薄荷脑	1490-04-6	nd	nd	0.31	1.52	0.39	1.06	0.44	0.84	0.50	0.42	0.58	0.49	0.67	0.32
	13.971	α -松油醇	98-55-5	0.41	1.00	0.25	1.01	0.48	0.68	1.34	0.66	1.82	1.53	2.02	1.31	2.26	2.23
	14.687	1,1,3,3,5,5,7,7-八甲基 -7-(2-甲基丙氧基)四 硅氧烷-1-醇	1000364-61-2	0.28	nd	0.19	nd	0.23	nd	0.12	nd	0.09	nd	0.70	nd	1.36	nd
	6.291	正己醛	66-25-1	0.03	0.22	0.03	0.15	nd	0.29	nd	0.24	nd	0.78	nd	0.44	nd	0.58
	6.910	3-糠醛	498-60-2	0.73	1.01	0.04	0.07	0.03	0.15	0.03	0.01	0.01	nd	0.01	nd	nd	nd
	7.244	2-己烯醛	505-57-7	0.28	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	9.206	苯甲醛	100-52-7	0.81	0.07	0.58	0.49	0.10	0.11	0.93	0.22	2.74	1.55	0.15	0.26	1.54	0.48
醛 类	9.935	辛醛	124-13-0	0.14	nd	0.14	nd	0.11	nd	0.06	0.02	0.07	0.05	0.03	0.12	0.02	0.05
	10.793	苯乙醛	122-78-1	0.34	nd	2.39	0.92	0.83	0.60	0.25	0.15	0.14	0.02	0.05	nd	0.10	nd
	11.963	壬醛	124-19-6	0.36	nd	0.29	nd	0.26	nd	0.17	nd	0.21	nd	0.08	nd	0.11	nd
	13.354	3-乙基苯甲醛	34246-54-3	0.03	0.20	0.08	0.08	0.06	0.15	0.06	0.13	0.01	0.14	0.00	0.02	0.01	0.01
	14.196	正癸醛	112-31-2	0.08	0.11	0.06	0.06	0.06	0.03	0.04	0.03	0.04	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
	14.560	2,5-二甲基苯甲醛	5779-94-2	0.17	nd	1.00	0.88	0.13	0.10	0.05	0.03	1.19	1.01	0.08	0.05	0.02	0.12

续表3

类别	RT/min	化合物名称	CAS 编号	0 d		2 d		4 d		7 d		9 d		11 d		14 d	
				蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖
苯类	7.552	1,3-二甲苯	108-38-3	0.46	0.32	2.63	1.54	0.00	0.87	0.22	0.20	0.12	0.19	0.16	0.13	0.20	0.09
	7.970	邻二甲苯	95-47-6	0.35	0.05	0.25	0.04	0.17	0.02	0.14	0.02	0.07	0.01	0.06	nd	0.07	nd
	9.821	1,2,4-三甲苯	95-63-6	nd	nd	0.05	nd	0.04	nd	0.02	nd	0.01	nd	nd	nd	nd	nd
	10.193	1,3-二氯苯	541-73-1	0.03	nd	0.02	nd	0.02	nd	0.01	nd	0.01	nd	0.00	nd	0.01	nd
	11.073	1,3-二甲苯-4-乙基苯	874-41-9	0.04	nd	0.30	0.14	0.26	0.09	0.18	0.05	0.10	0.03	0.03	nd	0.02	nd
	11.645	2-乙基对二甲苯	1758-88-9	0.40	0.52	0.21	0.32	0.15	0.28	0.15	0.28	0.05	0.16	0.05	0.10	0.03	nd
	12.312	1,2,4,5-四甲苯	95-93-2	0.10	0.03	0.11	0.06	0.10	0.04	0.58	0.49	0.33	0.32	0.09	0.15	0.05	0.06
	12.405	1,2,3,5-四甲基苯	527-53-7	0.54	0.77	0.64	0.85	0.60	0.63	0.06	0.06	0.02	0.05	0.02	0.03	0.05	0.06
	3.521	乙酸乙酯	141-78-6	4.48	2.11	3.47	1.93	2.87	1.58	2.20	1.32	1.89	1.04	1.31	0.95	1.20	0.64
	5.106	异氰酸酯	75-13-8	nd	nd	1.30	0.85	1.09	0.74	0.74	0.64	0.25	0.36	0.27	0.21	1.33	0.85
酯类	5.225	正丁基异氰酸乙酸酯	17046-22-9	0.15	0.62	1.66	1.90	0.80	0.92	0.54	0.64	0.42	0.33	0.16	0.28	0.05	0.16
	7.662	乙酸异戊酯	123-92-2	nd	nd	0.24	0.13	0.28	0.16	0.38	0.25	0.40	0.43	0.49	0.46	0.57	0.68
	11.231	亚砷酸三(三甲基硅烷基)酯	55429-29-3	6.55	7.19	1.74	2.04	0.61	0.84	2.84	2.75	3.61	3.36	0.30	0.57	0.09	0.13
	11.279	苯甲酰基异硫氰酸酯	532-55-8	0.11	nd	0.53	0.36	0.23	0.22	0.10	0.18	0.03	0.06	0.02	0.03	0.05	0.04
	11.703	2-(5-甲基-5-烯基四氢呋喃-2-基)丙-2-基碳酸乙酯	1000373-80-3	1.12	nd	0.72	0.43	0.50	0.32	0.26	0.28	0.30	0.31	0.13	0.11	0.12	0.07
	12.634	戊二酸二甲酯	1119-40-0	0.45	1.67	0.52	1.79	0.74	1.84	0.88	1.96	1.04	2.34	1.28	2.42	1.56	2.53
	14.090	水杨酸甲酯	119-36-8	0.18	nd	0.12	nd	0.07	nd	0.08	nd	0.03	nd	0.02	nd	0.02	nd
	15.434	乙酸苯乙酯	103-45-7	nd	nd	1.41	nd	1.25	nd	0.57	nd	0.31	nd	0.15	nd	0.15	nd
	18.238	2-甲基-丙酸 3-羟基-2,2,4-三甲基戊基酯	77-68-9	0.09	nd	0.13	nd	0.12	nd	0.09	nd	0.07	nd	0.04	nd	0.09	nd
	18.619	癸酸乙酯	110-38-3	0.06	0.28	0.08	0.33	0.14	0.39	0.24	0.45	0.32	0.57	0.41	0.68	0.43	0.77
酯类	20.145	邻苯二甲酸二甲酯	131-11-3	0.02	nd	0.03	nd	0.03	nd	0.02	nd	0.02	nd	0.01	nd	0.02	nd
	23.349	邻苯二甲酸二乙酯	84-66-2	0.02	0.80	0.03	0.84	0.01	0.83	0.01	0.79	0.01	0.65	0.01	0.62	0.01	0.61
	24.679	戊二酸丁基酯	1000358-25-1	0.05	0.08	0.05	0.10	0.05	0.11	0.06	0.12	0.66	0.77	0.71	0.85	0.73	0.90
		Glutaric acid, butyl isobutyl ester															

续表3

类 别	RT/min	化合物名称	CAS 编号	0 d		2 d		4 d		7 d		9 d		11 d		14 d	
				蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖	蜂蜜	蔗糖
	9.634	6-甲基-5-庚烯-2-酮	5-Hepten-2-one, 6-methyl-	110-93-0	0.31	1.06	0.20	0.95	0.07	0.74	0.05	0.72	0.04	0.72	0.03	0.70	0.04
	12.891	茶香酮	2,6,6-Trimethyl-2-cyclohexene-1,4-dione	1125-21-9	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	nd	2.20	nd	1.80	nd	2.20	nd
	12.437	异佛尔酮	Isophorone	78-59-1	0.11	0.16	0.25	0.22	0.03	0.15	0.30	0.39	0.02	0.26	0.02	0.23	1.69
	12.840	5-甲基-2,3-二氢-1H-茚	1H-Indene, 2,3-dihydro-5-methyl-	874-35-1	0.14	0.19	0.11	0.17	0.10	0.15	0.05	0.10	nd	0.09	nd	0.08	nd
酮 类	13.011	樟脑	Camphor	76-22-2	0.20	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.29	nd	0.33	nd	0.12
	18.533	大马士酮	2-Buten-1-one, 1-(2,6,6-trimethyl-1,3-cyclohexadien-1-yl)-, (E)-	23726-93-4	0.19	0.10	0.31	0.14	0.16	0.12	0.08	0.10	0.04	0.06	0.03	0.05	0.04
	20.914	β -紫罗兰酮	trans-beta-Ionone	79-77-6	nd	nd	0.05	nd	0.01	nd	nd	nd	nd	nd	0.00	nd	nd
	30.139	7,9-二叔丁基-1-氧杂 螺[4.5]癸-6,9-二烯 -2,8-二酮	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro (4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione	82304-66-3	0.01	nd	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
酚 类	21.375	2,4-二叔丁基苯酚	2,4-Di-tert-butylphenol	96-76-4	0.23	0.13	0.38	0.25	0.50	0.37	0.54	0.50	0.06	0.18	0.22	0.12	0.29
	10.491	(R)-(+)-柠檬烯	D-Limonene	5989-27-5	0.21	0.49	0.16	0.35	0.15	0.33	0.18	0.28	0.10	0.22	0.14	0.18	0.13
	10.134	3-萜烯	3-Carene	13466-78-9	0.05	0.12	0.03	0.12	0.02	0.11	0.01	0.09	0.01	0.06	0.00	0.03	0.00
萜 烯 类	13.893	精萜	Naphthalene	91-20-3	0.12	0.48	0.11	0.36	0.11	0.33	0.08	0.22	0.27	0.20	0.08	0.15	0.09
	19.337	α -柏木烯	1H-3a,7-Methanoazulene, 2,3,4,7,8,8a-hexahydro- 3,6,8,8-tetramethyl-, [3R-(3- alpha.,3a.beta.,7.beta.,8a.alpha.)]-	469-61-4	0.09	nd	0.07	nd	0.08	0.03	0.07	0.02	0.06	0.02	0.04	0.00	0.06

注: “nd” 表示该物质未检测到。

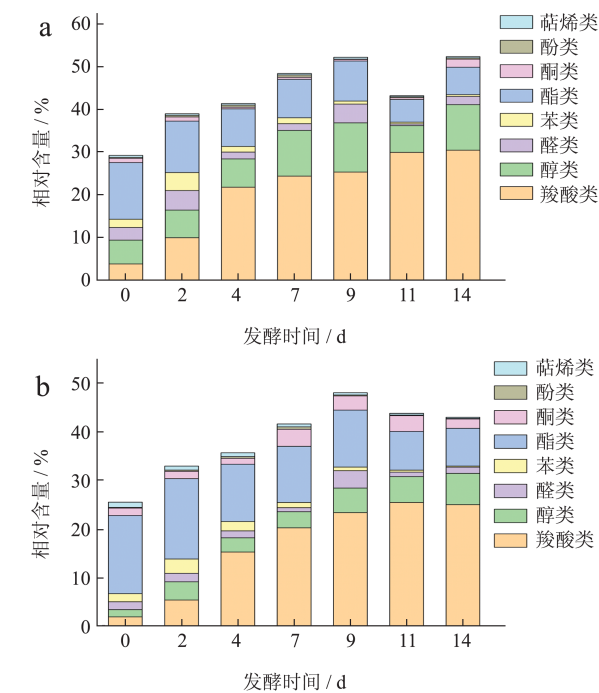


图 4 发酵期间不同挥发性成分相对含量的变化

Fig.4 Changes in the relative content of different volatile components during fermentation

注:(a) 为蜂蜜康普茶挥发性成分随发酵时间的变化,(b) 为蔗糖康普茶挥发性成分随发酵时间的变化。

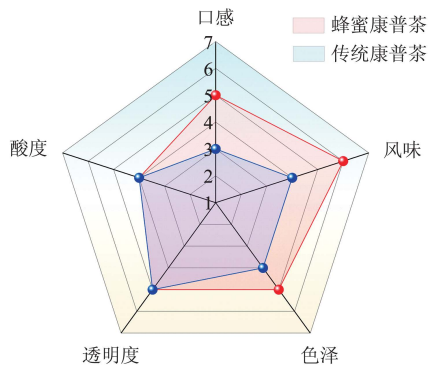


图 5 两种康普茶感官评分雷达图

Fig.5 Radar charts of sensory evaluation scores for two types of kombucha

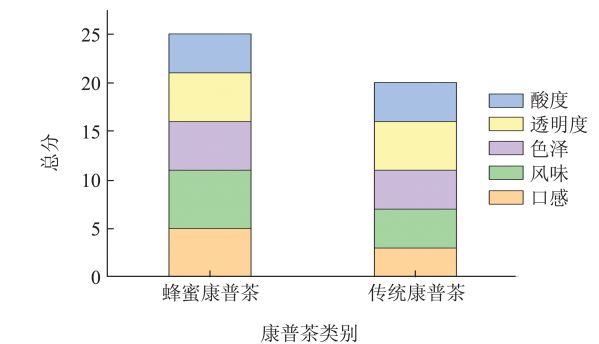


图 6 两种康普茶感官评价总分

Fig.6 Total sensory evaluation scores of two types of kombucha

3 结论

本研究利用筛选出的一株食蔗糖驹形氏杆菌 *Komagataeibacter saccharivorans* 3-3 发酵了纯培养蜂蜜康普茶, 并分析了蜂蜜康普茶与蔗糖康普茶在发酵过程中 (0、2、4、7、9、11、14 d) 的 pH 值、碳水化合物 (蔗糖、果糖、葡萄糖) 及挥发性成分的变化, 并对其感官评价。在发酵过程中, pH 值的显著降低 ($P<0.05$) 直接反映了发酵微生物中有机酸的产生及发酵基质的酸化, 较低的 pH 值不仅能够抑制腐败菌和病原菌生长, 而且有利于蜂蜜康普茶风味的形成。本研究中, 蜂蜜康普茶中蔗糖、果糖及葡萄糖含量的显著下降 ($P<0.05$), 不仅间接揭示了康普茶发酵基质内微生物的代谢活动, 如糖酵解及醋酸菌特有的代谢过程, 同时表明蜂蜜康普茶中含糖量较低, 可作为一种健康饮品。在蜂蜜康普茶检出的 8 类挥发性成分中, 产生的醇类物质及有机酸类物质为康普茶主要的标志性成分, 有助于提升产品的风味及功能活性, 然而, 需要进一步探究微生物与风味物质之间的具体关系。此外, 虽然蜂蜜康普茶的感官接受度优于蔗糖康普茶, 但酸度略高, 未来可通过缩短发酵周期, 进一步提高消费者的感官接受度。

参考文献

- [1] SU J, TAN Q, WU S, et al. Application of kombucha fermentation broth for antibacterial, antioxidant, and anti-Inflammatory processes [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(18): 13984.
- [2] TUBA E, SECIL A S, BÜSRA S G, et al. Additional advances related to the health benefits associated with kombucha consumption [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 20: 11-18.
- [3] HAYRUNISA I, ROSARIA M C, MILENA S, et al. Microbiology and antimicrobial effects of kombucha, a short overview [J]. Food Bioscience, 2023, 56(16): 103270.
- [4] DAMIÃO C B, PAULA A U T, CÉSAR W S R, et al. Microbial-physicochemical integrated analysis of kombucha fermentation [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2021, 148(8): 111788.
- [5] MARET A, JEKATERINA K, RAIN K, et al. Characterisation of chemical, microbial and sensory profiles of commercial kombuchas [J]. International Journal of Food Microbiology, 2022, 373: 109715.
- [6] LIANG W, WANG X, ZHANG L, et al. Changes and biotransformation mechanism of main functional compounds during kombucha fermentation by the pure cultured tea fungus [J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140242.
- [7] WANG B, RUTHERFURD-MARKWICK K, ZHANG X X, et al. Kombucha: production and microbiological research [J]. Foods, 2022, 11(21): 3456.

- [8] 朱文振,范营营,谢绍华,等.蜂蜜抗炎作用的研究进展[J].食品工业科技,2023,45(14):426-434.
- [9] 王琪琦,杜欣玥,高西贝,等.蜂蜜功能活性及药用价值研究进展[J].食品安全质量检测学报,2022,13(18):5849-5854.
- [10] GIOVANNI C, FILIPPO F, MATILDE M, et al. Antibacterial activity of honey samples from Ukraine [J]. Veterinary Sciences, 2020, 7(4): 181.
- [11] SARAH S, GAËTAN R, CLÉMENT B, et al. Characterization of aroma active compound production during kombucha fermentation: towards the control of sensory profiles [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(8): 1657.
- [12] 于杰,韩菁,张卓睿,等.叶唐棣果醋发酵工艺优化及有机酸和挥发性成分分析[J].中国酿造,2021,40(8):145-149.
- [13] WANG X, WANG D, WANG H, et al. Chemical profile and antioxidant capacity of kombucha tea by the pure cultured kombucha [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2022,168 (10): 113931.
- [14] YANG P, ZHONG G, YANG J, et al. Metagenomic and metabolomic profiling reveals the correlation between the microbiota and flavor compounds and nutrients in fermented sausages [J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131645.
- [15] V M B, D B. Bacterial cellulose aerogel enriched in nanofibers obtained from kombucha SCOBY byproduct [J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105975.
- [16] SANTOS D F D, LEONARSKI E, ROSSONI A M, et al. Honey-kombucha beverage with yerba maté infusion: development, polyphenols profile, and sensory acceptance [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 36: 100909.
- [17] SHIN H S, USTUNOL Z. Carbohydrate composition of honey from different floral sources and their influence on growth of selected intestinal bacteria: An *in vitro* comparison [J]. Food Research International, 2005, 38(6): 721-728.
- [18] JAYABALAN R, MALBASA R V, LONCAR E S, et al. A review on kombucha tea-microbiology, composition, fermentation, beneficial effects, toxicity, and tea fungus [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(4): 538-550.
- [19] ZOU C, LI R, CHEN J, et al. Zijuan tea-based kombucha: physicochemical, sensorial, and antioxidant profile [J]. Food Chemistry, 2021, 363: 130322.
- [20] ZHAO Z, SUI Y, WU H, et al. Flavour chemical dynamics during fermentation of kombucha tea [J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2018, 30(9): 732-741.
- [21] GAGGIA F, BAFFONI L, GALIANO M, et al. Kombucha beverage from green, black and rooibos teas: a comparative study looking at microbiology, chemistry and antioxidant activity [J]. Nutrients, 2019, 11(1): 1.
- [22] JAYABALAN R, MARIMUTHU S, SWAMINATHAN K. Changes in content of organic acids and tea polyphenols during kombucha tea fermentation [J]. Food Chemistry, 2007, 102(1): 392-398.
- [23] ZHANG J, JOSHUA M V, RIBEIRO D D, et al. The chemistry and sensory characteristics of new herbal tea-based kombuchas [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(3): 740-748.
- [24] CUEVAS-GLORY L F, PINO J A, SANTIAGO L S, et al. A review of volatile analytical methods for determining the botanical origin of honey [J]. Food Chemistry, 2007, 103(3): 1032-1043.
- [25] HO C, ZHENG X, LI S. Tea aroma formation [J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9-27.
- [26] WANG S, LI C, XU Q, et al. Addition of lactic acid bacteria modulates microbial community and promotes the flavor profiles of kombucha [J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104340.
- [27] CHAN M, SY H, FINLEY J, et al. Determination of ethanol content in kombucha using headspace gas chromatography with mass spectrometry detection: single-laboratory validation [J]. Journal of Aoac International, 2021, 104(1): 122-128.
- [28] BRUNA D, RAQUEL L H, FENSTERSEIFER M F, et al. Understanding the effect of fermentation time on physicochemical characteristics, sensory attributes, and volatile compounds in green tea kombucha [J]. Food Research International, 2023,174 (2): 113569