付羽譞, 余心泽, 雷宏杰. 不同低聚糖对发酵绿茶抗氧化活性及挥发性风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 160−169. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070292
FU Yuxuan, YU Xinze, LEI Hongjie. Effects of Different Oligosaccharides on the Antioxidant Activity and Volatile Flavor Compounds of Fermented Green Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 160−169. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070292

· 研究与探讨 ·

# 不同低聚糖对发酵绿茶抗氧化活性及挥发性风味物质的影响

付羽譞[1], 余心泽[2], 雷宏杰[1,*]
（1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100;
2.西北农林科技大学风景园林艺术学院, 陕西杨凌 712100）

**摘　要:** 为探究不同低聚糖对发酵绿茶品质及挥发性风味物质的影响，本研究选用蔗糖、低聚异麦芽糖、低聚半乳糖和低聚果糖添加到陕南毛尖绿茶浸提液中，以植物乳植杆菌在 37 ℃ 下对其进行发酵，分析发酵 48 h 前后理化性质、单体酚含量、抗氧化活性、有机酸含量以及挥发性风味物质的变化。结果表明，与添加蔗糖的发酵绿茶相比，添加低聚糖的发酵绿茶总酚和总黄酮含量增加，单体酚含量发生显著变化（$P$<0.05），其中，添加低聚半乳糖的发酵绿茶表现出最高的总酚含量（2552.21 mg GAE/L），添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶表现出最高的总黄酮含量（365.83 mg RE/L）。添加低聚糖会使发酵绿茶的抗氧化活性显著提高（$P$<0.05），添加低聚半乳糖的 DPPH 自由基清除能力与铁离子还原力最高，分别为 79.20% 和 23.95 mmol Trolox/L，添加低聚果糖的发酵绿茶表现出最高水平的 $ABTS^{+}$自由基清除活性（89.40%）。添加低聚糖后，有机酸含量与添加蔗糖的发酵绿茶组之间存在显著差异（$P$<0.05）。添加低聚糖的发酵绿茶挥发性风味物质含量均高于添加蔗糖的发酵绿茶，其醇类物质、烯类物质和酮类物质等含量增加，同时生成异戊醇、月桂酸和乙酸乙酯等新的挥发性风味物质，赋予了发酵绿茶新的香气特征，添加低聚异麦芽糖的挥发性风味物质含量最高（43987.09 μg/L）。综上所述，低聚糖的添加不仅可显著提高发酵绿茶的营养成分含量和抗氧化活性，还能丰富绿茶的香气组成。研究结果为功能性发酵茶产品的开发提供了理论依据。

**关键词:** 绿茶, 乳酸菌发酵, 低聚糖, 抗氧化活性, 挥发性风味物质
**中图分类号:** TS272.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0160−10
**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025070292
本文网刊:

# Effects of Different Oligosaccharides on the Antioxidant Activity and Volatile Flavor Compounds of Fermented Green Tea

**FU Yuxuan[1], YU Xinze[2], LEI Hongjie[1,*]**
（1.College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2.College of Landscape Architecture and Art, Northwest A & F University, Yangling 712100, China）

**Abstract:** This study aimed to investigate the effects of different oligosaccharides on the quality and volatile aroma compounds of fermented green tea. Sucrose, isomalto-oligosaccharides, galacto-oligosaccharides, and fructo-oligosaccharides were added to Mao Jian green tea extract and subjected to fermentation with *Lactiplantibacillus plantarum* at 37 ℃. Changes in physicochemical properties, monomeric phenolic compounds, antioxidant activity, organic acid composition, and volatile compounds were analyzed before and after 48 h of fermentation. The results showed that, compared with sucrose-supplemented fermented green tea, oligosaccharide supplementation significantly increased total phenolic and flavonoid contents, monomeric phenol content changed significantly ($P$<0.05). Among them, galacto-oligosaccharide supplementation yielded the highest total phenolic content (2552.21 mg GAE/L), while isomalto-oligosaccharide supplementa-

**收稿日期:** 2025−07−25
**作者简介:** 付羽譞（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: 1095065293@nwafu.edu.cn。
*** 通信作者:** 雷宏杰（1984−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品发酵与酿造, E-mail: leihongjie@nwafu.edu.cn。

tion yielded the highest total flavonoid content (365.83 mg RE/L). Oligosaccharide supplementation also markedly enhanced antioxidant activity ($P$<0.05). Galacto-oligosaccharide supplementation produced the strongest DPPH radical scavenging activity (79.20%) and ferric-reducing antioxidant power (23.95 mmol Trolox/L); however, fructo-oligosaccharide supplementation produced the highest $ABTS^+$ radical scavenging activity (89.40%). In addition, significant differences ($P$<0.05) in organic acid were observed between oligosaccharide-supplemented samples and sucrose-supplemented samples. Oligosaccharide-supplemented samples had higher total volatile aroma compound levels than sucrose-supplemented samples, with increased alcohol, alkene, and ketone levels, and the formation of new volatile aroma compounds, such as isoamyl alcohol, lauric acid, and ethyl acetate, thereby conferring distinctive aroma characteristics. Among the oligosaccharides, isomalto-oligosaccharide supplementation yielded the highest volatile aroma compound content (43987.09 μg/L). Overall, these findings indicate that oligosaccharide supplementation not only significantly enhances the nutritional composition and antioxidant activity of fermented green tea but also enriches its aroma profile, providing a theoretical basis for the development of functional fermented tea products.

**Key words**: green tea; lactic acid bacteria fermentation; oligosaccharides; antioxidant activity; volatile aroma compounds

绿茶是中国的传统饮品之一, 然而, 传统茶饮方式因其冲泡流程复杂, 冲泡时间较长, 不适于如今人们快节奏的生活方式, 同时传统绿茶风味较为单一, 难以满足消费者多样化的口感需求。乳酸菌发酵是一种能够有效改善饮品风味、提高健康功效的新技术[1]。近年来, 乳酸菌发酵饮料越来越受消费者喜爱, 已有研究将乳酸菌运用于绿茶饮料领域, 发现乳酸菌发酵能够改善绿茶饮料的感官品质和功能特性, 增强其健康功效[2−3]。Tu 等[4] 利用从康普茶中分离纯化的酵母菌发酵绿茶浸提液, 得到的发酵茶饮料中总酚和总黄酮含量显著提升, 同时具有良好的抗氧化和抗菌活性。Wang 等[5] 利用布拉氏酵母 CNCMI-745 和植物乳杆菌 299V 发酵绿茶, 证明混菌发酵可以丰富、改善绿茶风味。廖雪[6] 利用从绿茶发酵过程中筛选出的植物乳杆菌 NCU001692 发酵绿茶, 制备了一款香气滋味俱佳、功能性优异、含有大量活性物质的益生菌新型茶饮料。以上研究均表明乳酸菌发酵能显著改善绿茶风味与营养价值。

目前, 大部分研究侧重于乳酸菌发酵绿茶的工艺、风味及功能性研究, 通常以蔗糖或者果葡糖浆作为外来碳源, 很少有人研究不同低聚糖对绿茶乳酸菌发酵特性的影响。绿茶中大量的茶多酚表现出较强的抗菌活性[7−10], 从而抑制了乳酸菌在绿茶中的存活与增殖, 仅以乳酸菌接种发酵无法达到绿茶发酵的最大效益。低聚异麦芽糖、低聚果糖和低聚半乳糖三种益生元是被广泛应用于食品工业中的功能性低聚糖, 研究表明低聚糖和益生菌的协同作用可以增强乳酸菌发酵的功能特性[11], 对益生菌的生长具有增殖作用[12−13], 添加低聚糖可以在一定程度上促进乳酸菌的发酵性能, 从而提高产品的营养价值和感官品质。

本研究以陕南毛尖绿茶为原料制备绿茶浸提液, 分别添加蔗糖、低聚半乳糖、低聚果糖和低聚异麦芽糖, 选用植物乳植杆菌发酵制备发酵绿茶。以添加蔗糖发酵的绿茶为对照, 对添加不同低聚糖的发酵绿茶的理化性质、单体酚含量、抗氧化活性、有机酸含量和香气成分进行比较, 探究添加不同低聚糖对乳酸菌发酵绿茶品质及挥发性风味物质的影响, 为开发营养风味良好、香气典型的功能性绿茶发酵饮品提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

陕南毛尖绿茶　购于陕西杨凌, 在保质期内; 植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum* 90, Lp90)　上海华朴生命健康科技有限公司; 蔗糖　广州福正东海食品有限公司; 低聚半乳糖、低聚果糖、低聚异麦芽糖　山东百龙创园生物科技股份有限公司; MRS 肉汤培养基　北京陆桥技术股份有限公司; 甲醇、甲酸、乙腈、乳酸、苹果酸、乙酸、异丁酸、柠檬酸、琥珀酸、没食子酸、没食子酸儿茶素、儿茶素、表儿茶素、表没食子儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯、没食子儿茶素没食子酸酯、表儿茶素没食子酸酯、咖啡酸　色谱纯, 上海阿拉丁生化技术公司; 2-辛醇　上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ)　北京索莱宝科技有限公司; 其他化学试剂均为国产分析纯。

BKQ-B50II 立式高压蒸汽灭菌锅　山东博科生物产业有限公司; LRH-250CL 恒温培养箱　上海一恒科学仪器有限公司; GL-10MD 大容量高速冷冻离心机　湖南湘仪仪器开发有限公司; ALC-210.3 电子分析天平　福州华志科学仪器有限公司; SW-CJ-1FD 超净工作台　苏州安泰空气技术有限公司; PB-10 pH 计　上海梅特勒-托利多仪器有限公司; ATAGO 手持式糖度计、QP2010 气相色谱-质谱联用仪、LC-2030 PLUS 高效液相色谱仪　日本岛津公司; DK-98-IIA 电热恒温水浴锅、SHJ-A4 水浴恒温振荡器　金坛市宏华仪器厂; UV1800PC 紫外可见分光光度计　陕西天平仪器设备有限公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　原料的预处理　以 85 ℃ 纯净水浸泡陕南毛尖绿茶 20 min, 茶水比为 1∶40(w/v), 将 100 目尼龙纱布过滤后的 3000 mL 茶汤等分装入 4 个食品级

的 1000 mL 锥形瓶中，分别添加 8% 的蔗糖、低聚半乳糖、低聚果糖和低聚异麦芽糖，充分搅拌溶解，在 115 ℃ 条件下灭菌 15 min，冷却至室温。

1.2.2 发酵菌种的活化 称取 Lp90 菌粉 0.01 g，置于 250 mL MRS 肉汤培养基中，置于恒温培养箱中 37 ℃ 恒温活化 12 h 后，离心（6000×g，15 min，4 ℃）弃去上清液，使用生理盐水洗涤菌泥 2 次，得到活化后的乳酸菌悬液。

1.2.3 绿茶的发酵 将活化后的植物乳植杆菌按 1%（v/v）的添加量接种至调糖后的绿茶浸提液中，封口后充分摇匀，置于恒温培养箱中 37 ℃ 恒温发酵 48 h，期间每隔 12 h 取一次样，以添加蔗糖发酵的绿茶为对照，对添加低聚异麦芽糖（IMO）的发酵绿茶、低聚半乳糖（GOS）的发酵绿茶和低聚果糖（FOS）的发酵绿茶进行相关指标测定。

1.2.4 理化指标测定 活菌数：用标准涂布平板法测定活菌落数，首先用等梯度的 0.9% 生理盐水将 1 mL 发酵绿茶稀释至适当体积，将稀释后的绿茶均匀涂抹在固体培养基上进行培养。对菌落数在 30~300 CFU 范围内的平板进行菌落计数，并以 log CFU/mL 表示。

pH：将待测样品摇匀，取 10 mL 置于烧杯中，使用 pH 计在室温下测定 pH，待数值稳定后读数。

可溶性固形物：在 20 ℃ 下使用手持糖度仪进行测定，以蒸馏水为空白，结果以°Brix 表示。

1.2.5 总酚和总黄酮含量测定 采用福林酚比色法测定发酵绿茶中总酚含量[14]。将 2.5 mL 福林酚试剂（10%，v/v）添加至 0.5 mL 经稀释的绿茶样品中，后加入 2 mL 75 g/L $Na_2CO_3$ 溶液振荡 1 min，避光反应 40 min，于紫外波长 760 nm 测定绿茶样品的吸光度，根据没食子酸的标准曲线计算绿茶样品中的总酚含量，结果以每升茶汤中没食子酸的毫克当量（mg GAE/L）表示。

采用氯化铝比色法测定样品中的总黄酮含量[15]。将 0.5 mL 50 g/L $NaNO_2$ 溶液添加至 4 mL 经稀释的绿茶样品中，反应 5 min 后加入 1 mL 100 g/L $AlCl_3$ 溶液，反应 5 min，最后加入 2 mL 2 mol/L NaOH 溶液，反应 10 min 后用分光光度计测定反应液在 510 nm 处的吸光度值，根据（+）-儿茶素（0.05~1.00 mg/mL）的标准曲线计算绿茶样品中的总黄酮含量，结果以每升茶汤中（+）-儿茶素当量（mg RE/L）表示。

1.2.6 单体酚含量测定 使用高效液相色谱法（HPLC）检测绿茶在发酵过程中儿茶素、没食子酸和咖啡因含量[16]。发酵绿茶样品用 0.45 μm 亲水性滤器过滤至 HPLC 样品瓶中待测。选取色谱级的没食子酸、没食子酸儿茶素、儿茶素、表儿茶素、表没食子儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯、没食子儿茶素没食子酸酯、表儿茶素没食子酸酯和咖啡酸标准品，用 90% 甲醇配制单体酚标准液（100.0 mg/L）并稀释，得到浓度为 0.5~50.0 mg/L 的单体酚工作液，测定前置于棕色瓶内在 4 ℃ 保存。测定条件：流动相：A：甲酸溶液（1%，v/v），B：乙腈，梯度洗脱程序：0 min，5% B；5 min，5% B；25 min，12% B；40 min，30% B；50 min，45% B；51 min，5% B；60 min，5% B，流速 1.0 mL/min，检测波长 260 nm 和 320 nm，检测温度 30 ℃，进样量 10 μL。采用外标法对单体酚的检测结果进行峰保留时间定性和峰面积定量分析。

1.2.7 抗氧化活性测定 DPPH 自由基清除能力的测定：将样品稀释 2 倍后，取 2 mL 经稀释的样品与 4 mL 0.045 mg/mL DPPH 甲醇溶液混合后避光反应 30 min，用紫外分光光度计在 517 nm 处测定溶液吸光度值（$A_{sample}$），以溶剂和 DPPH 甲醇溶液混合为对照（$A_{control}$）。DPPH 自由基清除活性计算公式如下[17]：

$$\text{DPPH自由基清除活性}(\%) = \frac{A_{control} - A_{sample}}{A_{control}} \times 100$$

式（1）

$ABTS^+$自由基清除能力的测定：将 2.45 mmol/L $K_2S_2O_8$ 溶液和 7 mmol/L ABTS 1∶1 混合，避光反应 16 h 制备 ABTS 阳离子自由基，所得溶液用 80% 乙醇稀释至 734 nm 处吸光度为 0.70±0.02 即得到 ABTS 阳离子自由基试剂。将 600 μL 稀释后的样品与 5.4 mL ABTS 阳离子自由基试剂混合，反应 6 min，用紫外分光光度计测定溶液在 734 nm 处的吸光度值（$A_{sample}$）。以溶剂和 ABTS 阳离子自由基试剂混合为对照（$A_{control}$）。$ABTS^+$自由基清除活性计算公式如下[18]：

$$ABTS^+\text{自由基清除活性}(\%) = \frac{A_{control} - A_{sample}}{A_{control}} \times 100$$

式（2）

铁还原能力的测定：稀释样品，将 0.3 mol/L 醋酸缓冲液（pH3.6）、10 mmol/L TPTZ 溶液（用 40 mmol/L HCl 溶解）和 20 mmol/L $FeCl_3$ 溶液以 10∶1∶1 的体积比混合，37 ℃ 反应 30 min 制备 FRAP 试剂。随后将 200 μL 稀释后的样品与 6 mL FRAP 试剂混合，在 593 nm 处测定溶液的吸光度值，根据 Trolox 标准曲线计算绿茶样品的铁还原能力，结果以每升茶汤中 Trolox 的毫摩尔当量（mmol Trolox/L）表示[19]。

1.2.8 有机酸含量测定 使用高效液相色谱法（HPLC）测定有机酸含量[20]。发酵绿茶样品用 0.45 μm 亲水性滤器过滤至 HPLC 样品瓶中待测。选取色谱级的乳酸、苹果酸、乙酸、异丁酸、柠檬酸和琥珀酸标准品，用甲醇配制有机酸标准液（10.0 g/L）并稀释得到浓度为 0.4~10.0 g/L 的有机酸工作液，测定前置于棕色瓶内在 4 ℃ 保存。测定条件：流动相：A：$KH_2PO_4$（0.01 mol/L，pH2.7），B：甲醇，A∶B=97∶3，等浓度洗脱，流速 0.6 mL/min，检测波长 210 nm，检

测温度 20 ℃，进样量 10 μL。采用外标法对有机酸的检测结果进行峰保留时间定性和峰面积定量分析。

1.2.9　挥发性风味物质测定　用顶空固相微萃取技术-气相色谱-质谱联用法（HS-SPME-GC-MS）对绿茶样品的挥发性风味物质进行检测[21]。移取 5 mL 绿茶样品于含有 2 g NaCl 的进样瓶中，再加入 10 μL 0.2 mg/mL 的 2-辛醇（用乙醇配制）作为内标。检测条件如下：进样瓶先在 45 ℃ 环境下平衡 15 min，再用老化处理过的萃取头插入进样瓶中，顶空吸附 30 min 后解吸，用 GC-MS 对解吸的挥发性风味物质进行分析。

色谱条件如下：色谱柱：DB-17MS 毛细管色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）；升温程序：起始温度 40 ℃，保持 3 min 后以 4 ℃/min 的速率升温至 120 ℃，再以 6 ℃/min 的速率升温至 240 ℃，保持 9 min；自动进样；进样口温度 250 ℃；载气为氦气；流速为 1.93 mL/min；不分流进样。

质谱条件：电子电离源；电子能量 70 eV；离子源温度 230 ℃；接口温度 230 ℃；质量扫描范围 m/z 35~500。

根据气相色谱-质谱中的 NIST 14 质谱数据库、匹配度和保留时间对各个物质进行检索。选择匹配度大于 85 的物质作为有效的挥发性风味物质，采用 2-辛醇作为内标物，按下式计算发酵绿茶中挥发性风味物质的含量：

$$\text{挥发性风味物质含量}(\mu g/L)=\frac{\text{各物质的峰面积}}{\text{内标物的峰面积}}\times\text{内标物质量浓度}(\mu g/L)$$

式（3）

### 1.3　数据处理

所有实验重复三次，结果以平均值±标准差表示。采用 Minitab 21 软件进行单因素方差分析，经 Tukey 检验，$P<0.05$ 表示样本之间存在显著性差异。用 Origin 2023b 软件制作图表、Excel 2019 处理数据。

## 2　结果与分析

### 2.1　添加不同低聚糖发酵绿茶理化指标的变化

2.1.1　添加不同低聚糖发酵绿茶活菌数的变化　如如图 1 所示，发酵过程中，绿茶的活菌数均呈先上升后下降趋势，且发酵 48 h 后活菌数显著高于初始值（7.57 log CFU/mL）（$P<0.05$）。与添加蔗糖的发酵绿茶相比，添加低聚糖的发酵绿茶显示出更高活菌数，结果表明添加低聚糖能够促进植物乳植杆菌的生长和增殖。其中，添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶的活菌数高于其他组，在发酵 48 h 时为 7.84 log CFU/mL。

2.1.2　添加不同低聚糖发酵绿茶 pH 和可溶性固形物含量的变化　如图 2a 所示，发酵绿茶的 pH 均呈下降趋势。添加蔗糖的发酵绿茶 pH 从发酵初的 5.14 显著下降至 3.84（$P<0.05$），添加低聚糖发酵绿茶 pH 的下降幅度大于对照组，其中，添加低聚半乳糖的

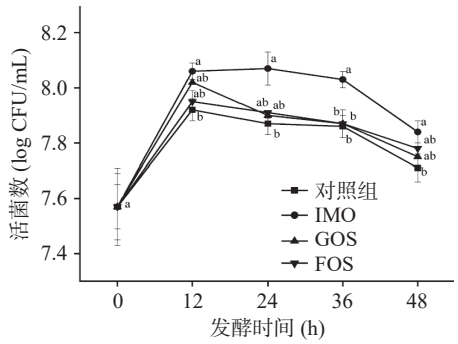



图 1　添加不同低聚糖发酵绿茶活菌数的变化

Fig.1　Changes in the viable counts of fermented green tea with different oligosaccharide additions

注：不同字母表示同一时间不同样品具有显著性差异（$P<0.05$），图 2~图 4 同。

发酵绿茶 pH 最低为 3.62，这是因为添加低聚糖促进了发酵过程中乳酸的生成，从而使绿茶 pH 下降[22]。如图 2b 所示，绿茶的可溶性固形物含量均由发酵前的 9.6°Brix 下降为 9.3°Brix~9.4°Brix，添加低聚糖的发酵绿茶可溶性固形物含量与对照组没有显著差异（$P>0.05$）。

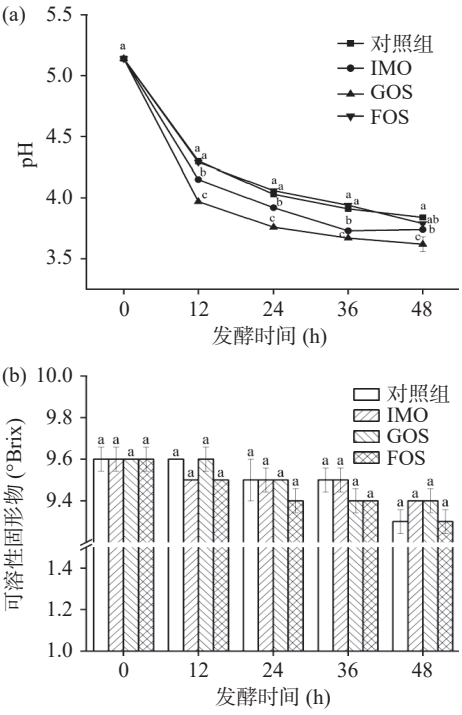



图 2　添加不同低聚糖发酵绿茶 pH（a）和可溶性固形物含量（b）的变化

Fig.2　Changes in pH (a) and soluble solids content (b) of fermented green tea with different oligosaccharide additions

2.1.3　添加不同低聚糖发酵绿茶总酚和总黄酮含量的变化　如图 3a 所示，添加蔗糖、低聚半乳糖和低聚果糖的发酵绿茶总酚含量呈上升趋势，低聚异麦芽糖组呈上升后下降趋势，发酵后总酚含量显著高于初始含量（2116.04 mg GAE/L）（$P<0.05$），原因是乳酸菌通过产生 $\beta$-半乳糖苷酶将复杂的酚类化合物水解为较为简单的形式，并能够从植物细胞壁释放可溶性

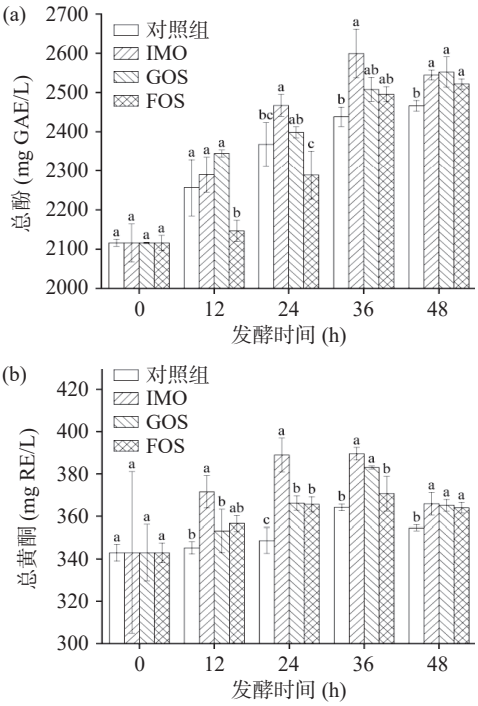



图 3 添加不同低聚糖发酵绿茶总酚(a)和总黄酮(b)含量的变化

Fig.3 Changes in total phenolic (a) and total flavonoid (b) of fermented green tea with different oligosaccharide additions

共轭或不溶性结合酚类化合物,促进酚类物质的释放[23],同时,发酵过程中的酸性环境使茶多酚与咖啡碱等金属离子发生络合作用,抑制了茶多酚类氧化褐变,使其较发酵前含量增多[24]。低聚异麦芽糖组总酚含量在后期下降,可能是因为添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶中活菌数最高,植物乳植杆菌的生长繁殖消耗过多营养物质,导致酚类物质减少。发酵 48 h 后,添加低聚糖的发酵绿茶总酚含量均显著高于对照组(2466.25 mg GAE/L)($P$<0.05),其中,低聚半乳糖的发酵绿茶总酚含量最高(2552.21 mg GAE/L)。

如图 3b 所示,与未发酵绿茶相比,发酵绿茶的总黄酮含量显著增加($P$<0.05),呈先上升后下降趋势,这是因为乳酸菌发酵会破坏细胞壁结构,从而促使黄酮类化合物释放,导致总黄酮含量上升[25];发酵后期,总黄酮含量下降,可能是因为植物乳植杆菌在发酵过程中分泌多种糖苷酶,导致黄酮糖苷物逐渐分解[26]。发酵 48 h 后,添加低聚糖的发酵绿茶总黄酮含量显著高于对照组(354.66 mg RE/L)($P$<0.05),其中,添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶总黄酮含量最高(365.83 mg RE/L)。

## 2.2 添加不同低聚糖发酵绿茶单体酚含量的变化

儿茶素可以通过中和氮氧自由基发挥抗氧化活性[27],是绿茶中最重要的多酚类物质。如表 1 所示,发酵 48 h,除儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯和表没食子儿茶素含量外,添加低聚糖的发酵绿茶中单体酚含量与发酵对照组存在显著差异($P$<0.05)。没食子酸儿茶素、没食子酸、咖啡酸和表儿茶素含量显著下降($P$<0.05),添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶没食子酸儿茶素(11.85 mg/L)、没食子酸(21.12 mg/L)和咖啡酸(104.45 mg/L)含量最低,添加低聚果糖的发酵绿茶表儿茶素含量(35.70 mg/L)最低。儿茶素、表没食子儿茶素没食子酸酯、表没食子儿茶素含量基本不变。没食子儿茶素没食子酸酯和表儿茶素没食子酸酯含量显著上升($P$<0.05),其中,在添加低聚半乳糖的发酵绿茶中检测到没食子儿茶素没食子酸酯(30.28 mg/L)和表儿茶素没食子酸酯(8.99 mg/L)含量最高。这是因为低聚糖添加能增强植物乳植杆菌的繁殖与活性,从而促进发酵期间绿茶中单体酚的转化、降解和生成反应。

## 2.3 添加不同低聚糖发酵绿茶抗氧化活性的变化

本研究通过测定 ABTS$^+$自由基、DPPH 自由基和铁还原能力进行发酵绿茶的抗氧化活性分析。自由基的过度积累会导致细胞内氧化应激,而氧化应激是导致衰老和冠心病、炎症感染和癌症等疾病的主要原因[28]。发酵过程中绿茶复杂多酚类物质降解成的小分子多酚物质可以提供电子来灭活自由基。如图 4 所示,发酵前后,除添加蔗糖的 ABTS$^+$自由基清除活性未发生显著变化外,其他抗氧化活性均得到显著提高,添加低聚糖的发酵绿茶抗氧化活性总体上显著高于添加蔗糖组($P$<0.05),其中,在添加低聚半乳糖的发酵绿茶中检测到最高水平的 DPPH 自由基清除活性(79.20%)和铁离子还原力(23.95 mmol

表 1 添加不同低聚糖发酵绿茶单体酚含量的变化(mg/L)

Table 1 Changes in phenolic profiles of fermented green tea with different oligosaccharide additions (mg/L)

| 单体酚 | 对照组 | 发酵对照组 | FJ-IMO | FJ-GOS | FJ-FOS |
|---|---|---|---|---|---|
| 没食子酸儿茶素 | 30.81±0.09$^a$ | 26.46±0.05$^b$ | 11.85±0.03$^c$ | 14.87±0.03$^c$ | 19.22±0.05$^c$ |
| 没食子酸 | 23.83±0.01$^a$ | 23.42±0.03$^b$ | 21.12±0.01$^c$ | 21.33±0.02$^c$ | 23.25±0.02$^b$ |
| 儿茶素 | 13.42±0.06$^a$ | 13.46±0.03$^a$ | 13.48±0.06$^a$ | 13.66±0.03$^a$ | 13.54±0.02$^a$ |
| 表没食子儿茶素没食子酸酯 | 58.06±0.07$^a$ | 59.32±0.03$^a$ | 60.03±0.02$^a$ | 60.06±0.03$^a$ | 60.12±0.06$^a$ |
| 表没食子儿茶素 | 48.89±0.02$^a$ | 48.59±0.07$^a$ | 48.62±0.05$^a$ | 48.84±0.02$^a$ | 48.41±0.09$^a$ |
| 咖啡酸 | 107.21±0.06$^a$ | 106.69±0.04$^a$ | 104.45±0.07$^c$ | 106.85±0.08$^a$ | 105.43±0.08$^b$ |
| 表儿茶素 | 41.90±0.04$^a$ | 40.41±0.09$^a$ | 38.05±0.05$^b$ | 39.75±0.08$^b$ | 35.70±0.06$^c$ |
| 没食子儿茶素没食子酸酯 | 26.98±0.02$^c$ | 28.08±0.03$^b$ | 27.30±0.04$^{bc}$ | 30.28±0.04$^a$ | 30.21±0.02$^a$ |
| 表儿茶素没食子酸酯 | 8.02±0.08$^b$ | 8.15±0.06$^b$ | 8.83±0.05$^a$ | 8.99±00.1$^a$ | 8.83±0.07$^a$ |

注:对照组和发酵对照组分别为添加蔗糖的未发酵绿茶组和发酵绿茶组,FJ-IMO、FJ-GOS、FJ-FOS分别为添加低聚异麦芽糖、低聚半乳糖、低聚果糖的发酵绿茶组;同行不同字母表示样品具有显著性差异($P$<0.05),表2、表3同。

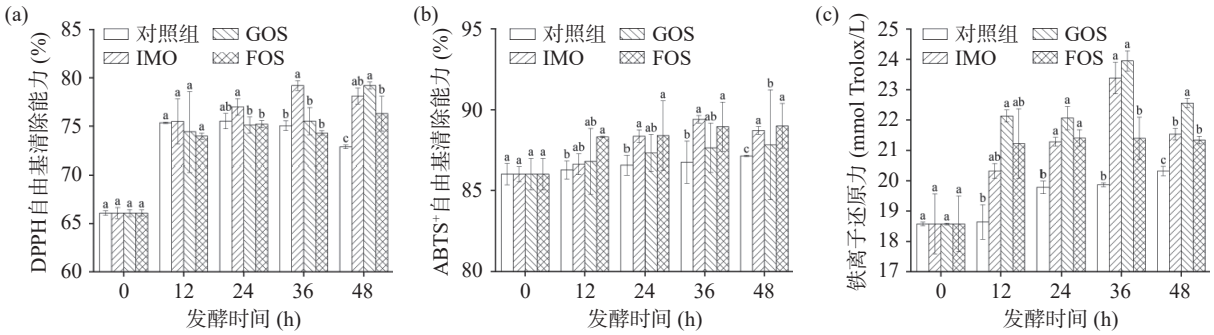



图 4　添加不同低聚糖发酵绿茶 DPPH 自由基清除活性(a)、ABTS⁺自由基清除活性(b)和铁离子还原力(c)的变化

Fig.4　Changes in DPPH radical scavenging activity (a), ABTS⁺ radical scavenging activity (b) and FRAP (c) of fermented green tea with different oligosaccharide additions

Trolox/L)，在添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶中检测到最高水平的 ABTS⁺自由基清除活性(89.40%)，这表明添加低聚糖能显著提高发酵绿茶的抗氧化活性，原因可能是多酚化合物与抗氧化活性有较强相关性，添加低聚糖会使发酵绿茶中总酚含量上升，进而增强其抗氧化活性。

## 2.4　添加不同低聚糖发酵绿茶有机酸含量的变化

有机酸与其他呈味物质相互协调，与茶汤“鲜爽醇和”的口感息息相关。如表 2 所示，绿茶发酵 48 h 后，其乳酸、乙酸、异丁酸、柠檬酸和琥珀酸含量增加，苹果酸含量减少，与发酵对照组相比，添加低聚糖的发酵绿茶有机酸总含量增加。乳酸是绿茶发酵过程中产生的最主要的有机酸，其增加是由于葡萄糖作为糖酵解途径的前体转化为丙酮酸，在乳酸脱氢酶的参与下，丙酮酸被还原为乳酸[29]。苹果酸是绿茶发酵过程中产生的较为主要的有机酸，是植物乳植杆菌发酵过程中首选的底物。短链脂肪酸(乙酸、异丁酸)显著影响着茶的风味和人类健康[30]。在添加蔗糖和不同低聚糖的发酵绿茶中，添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶中乳酸(2.53 g/L)和柠檬酸(0.65 g/L)含量最高；添加低聚半乳糖的发酵绿茶中苹果酸(1.70 g/L)含量最低，异丁酸(0.38 g/L)和琥珀酸(3.85 g/L)含量最高；添加低聚果糖的发酵绿茶中乙酸(3.10 g/L)含量最高。这可能是因为添加低聚糖促进了发酵过程中糖酵解等发酵途径，导致乳酸、乙酸等有机酸含量增加。结果表明添加低聚糖比蔗糖促进了更多有机酸的生成。

表 2　添加不同低聚糖发酵绿茶有机酸含量的变化(g/L)

Table 2　Changes in organic acids of fermented green tea with different oligosaccharide additions (g/L)

| 有机酸 | 对照组 | 发酵对照组 | FJ-IMO | FJ-GOS | FJ-FOS |
|---|---|---|---|---|---|
| 乳酸 | 0.40±0.01$^{d}$ | 0.91±0.03$^{c}$ | 2.53±0.03$^{a}$ | 2.21±0.09$^{a}$ | 1.77±0.05$^{b}$ |
| 苹果酸 | 4.40±0.02$^{a}$ | 4.00±0.05$^{a}$ | 2.87±0.06$^{c}$ | 1.70±0.09$^{d}$ | 3.28±0.04$^{b}$ |
| 乙酸 | 1.04±0.05$^{c}$ | 1.20±0.05$^{c}$ | 2.85±0.02$^{a}$ | 1.47±0.04$^{b}$ | 3.10±0.01$^{a}$ |
| 异丁酸 | 0.19±0.01$^{c}$ | 0.20±0.07$^{c}$ | 0.22±0.01$^{bc}$ | 0.38±0.01$^{a}$ | 0.27±0.01$^{b}$ |
| 柠檬酸 | 0.23±0.03$^{c}$ | 0.25±0.02$^{c}$ | 0.65±0.02$^{a}$ | 0.52±0.01$^{b}$ | 0.32±0.02$^{c}$ |
| 琥珀酸 | 1.04±0.03$^{c}$ | 1.33±0.02$^{b}$ | 3.63±0.07$^{a}$ | 3.85±0.02$^{a}$ | 1.52±0.02$^{b}$ |

## 2.5　添加不同低聚糖发酵绿茶挥发性风味物质的变化

消费者对发酵绿茶的喜爱度与其挥发性风味物质的组成和含量密切相关，低聚糖的类型和结构能通过影响植物乳植杆菌的代谢途径和能力，进而影响最终发酵产品的风味特征。表 3 展示了绿茶发酵前后挥发性风味物质的变化，共检测到 56 种挥发性风味化合物，其中包括 14 种醇类、9 种烯类、6 种酸类、10 种酮类、7 种酯类、5 种醛类、2 种烷烃类和 3 种其他(呋喃、酚类等)，香气特征通过 ChemicalBook 数据库查询。与未发酵绿茶相比，发酵绿茶总挥发性风味物质含量大幅增加，其中最高为添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶(43987.09 μg/L)，最低为添加蔗糖的发酵对照组(27451.06 μg/L)。

表 3　添加不同低聚糖发酵绿茶挥发性风味物质含量的变化(μg/L)

Table 3　Changes in volatile compounds of fermented green tea with different oligosaccharide additions (μg/L)

| 序号 | 挥发性风味物质 | 对照组 | 发酵对照组 | FJ-IMO | FJ-GOS | FJ-FOS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 醇类 | | | | | |
| 1 | alpha-松油醇 | 1381.67±71.50$^{d}$ | 3069.14±147.25$^{c}$ | 4886.10±199.02$^{a}$ | 3838.48±169.63$^{b}$ | 3932.04±225.69$^{b}$ |
| 2 | 橙花醇 | 365.83±9.39$^{d}$ | 597.75±20.63$^{bc}$ | 703.41±33.71$^{a}$ | 540.51±15.09$^{c}$ | 645.96±27.04$^{ab}$ |
| 3 | 香叶醇 | 978.49±85.93$^{d}$ | 1923.40±114.38$^{bc}$ | 2298.97±162.99$^{a}$ | 1614.65±108.65$^{c}$ | 2008.28±172.62$^{ab}$ |
| 4 | 2-甲基丁醇 | 63.33±6.51$^{d}$ | 178.78±5.78$^{b}$ | 231.91±8.68$^{a}$ | 228.74±13.38$^{a}$ | 140.79±7.59$^{c}$ |
| 5 | 异戊醇 | ND | ND | 431.44±22.88$^{a}$ | 345.00±10.11$^{b}$ | ND |
| 6 | 叶醇 | ND | 1615.68±103.29$^{b}$ | 2613.78±185.71$^{a}$ | 2636.03±188.66$^{a}$ | 1247.98±74.59$^{c}$ |
| 7 | 正庚醇 | 242.15±6.53$^{c}$ | 418.38±17.86$^{a}$ | 389.01±10.92$^{ab}$ | 359.72±18.57$^{b}$ | 359.10±14.64$^{b}$ |
| 8 | 苯甲醇 | ND | 283.69±13.21$^{d}$ | 2094.10±127.07$^{a}$ | 1809.89±161.87$^{b}$ | 602.32±22.83$^{c}$ |
| 9 | 2-乙基己醇 | 198.31±11.50$^{d}$ | 369.39±16.33$^{c}$ | 979.04±82.66$^{a}$ | 625.24±24.75$^{b}$ | 283.71±8.15$^{cd}$ |

**续表 3**

| 序号 | 挥发性风味物质 | 对照组 | 发酵对照组 | FJ-IMO | FJ-GOS | FJ-FOS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 1-壬醇 | 109.03±4.75$^{d}$ | 260.95±5.09$^{c}$ | 1003.35±84.73$^{a}$ | 221.58±7.14$^{c}$ | 701.72±38.13$^{b}$ |
| 11 | 十二醇 | 278.57±6.59$^{d}$ | 401.40±27.87$^{a}$ | 378.57±15.85$^{ab}$ | 351.40±17.78$^{bc}$ | 329.88±13.52$^{c}$ |
| 12 | 反式-橙花叔醇 | ND | 121.45±9.77$^{c}$ | 166.07±8.57$^{ab}$ | 154.38±5.57$^{b}$ | 172.12±11.85$^{a}$ |
| 13 | 顺-A,A-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇 | ND | 833.52±33.67$^{a}$ | 848.33±42.78$^{a}$ | 899.96±54.86$^{a}$ | 690.05±30.08$^{b}$ |
| 14 | 2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇 | ND | 607.35±39.98$^{b}$ | ND | 873.10±49.29$^{a}$ | ND |
| | 总计 | 3617.38 | 10680.88 | 17024.08 | 13873.45 | 11113.94 |
| | 烯类 | | | | | |
| 1 | 月桂烯 | 881.67±47.81$^{c}$ | 2059.27±164.46$^{b}$ | 2506.47±208.91$^{a}$ | 2137.55±90.48$^{ab}$ | 2229.35±151.42$^{ab}$ |
| 2 | (+)-柠檬烯 | 556.43±19.15$^{b}$ | 1717.49±165.73$^{a}$ | 2136.51±124.11$^{a}$ | 1999.62±235.78$^{a}$ | 2082.57±201.23$^{a}$ |
| 3 | (E)-*β*-罗勒烯 | 188.66±7.04$^{d}$ | 699.56±51.99$^{c}$ | 904.58±69.54$^{a}$ | 739.46±55.56$^{bc}$ | 838.94±42.84$^{ab}$ |
| 4 | 罗勒烯异构体混合物 | 585.97±28.81$^{c}$ | 1339.42±80.27$^{b}$ | 1683.47±121.62$^{a}$ | 1478.19±113.91$^{ab}$ | 1562.95±92.05$^{ab}$ |
| 5 | 3-蒈烯 | 62.51±4.89$^{c}$ | 162.35±9.05$^{b}$ | 204.82±9.80$^{a}$ | 225.62±9.93$^{a}$ | 180.14±7.78$^{b}$ |
| 6 | 萜品油烯 | 81.78±4.20$^{d}$ | 641.66±37.89$^{bc}$ | 761.16±44.68$^{b}$ | 613.74±21.07$^{c}$ | 884.95±86.97$^{a}$ |
| 7 | 苯乙烯 | ND | ND | 124.25±6.21 | ND | ND |
| 8 | 1,3-二甲基苯乙烯 | ND | 579.53±32.44$^{b}$ | ND | ND | 727.98±42.94$^{a}$ |
| 9 | 1,7,7-三甲雙環[2.2.1]庚-2-烯 | 396.29±23.42$^{d}$ | 1119.11±136.50$^{c}$ | 1561.40±155.90$^{a}$ | 1488.72±120.25$^{ab}$ | 1228.98±78.88$^{bc}$ |
| | 总计 | 2753.31 | 8318.39 | 9882.66 | 8682.90 | 9735.86 |
| | 酸类 | | | | | |
| 1 | 丙二酸 | ND | 54.75±2.26$^{c}$ | 97.66±6.73$^{a}$ | 84.76±6.90$^{b}$ | 59.35±4.65$^{c}$ |
| 2 | 己酸 | ND | 44.84±4.10$^{b}$ | 55.21±3.28$^{b}$ | 92.01±6.39$^{a}$ | 55.20±6.12$^{b}$ |
| 3 | 法尼酸 | ND | ND | ND | 21.07±3.66$^{b}$ | 38.63±5.67$^{a}$ |
| 4 | 月桂酸 | ND | ND | 69.19±5.76$^{b}$ | 95.85±8.34$^{a}$ | 97.18±9.25$^{a}$ |
| 5 | 辛酸 | ND | 30.87±6.75$^{b}$ | 75.53±8.49$^{a}$ | 76.53±8.64$^{a}$ | 64.38±3.20$^{a}$ |
| 6 | 正癸酸 | ND | ND | 42.89±7.98 | ND | ND |
| | 总计 | 0.00 | 130.46 | 340.48 | 370.22 | 314.74 |
| | 酮类 | | | | | |
| 1 | 4-甲基-3-戊烯-2-酮 | 299.68±15.34$^{d}$ | 322.93±10.90$^{cd}$ | 380.45±18.38$^{ab}$ | 343.38±14.51$^{bc}$ | 403.86±19.23$^{a}$ |
| 2 | 甲基庚烯酮 | ND | ND | 158.35±8.58$^{b}$ | ND | 177.32±9.09$^{a}$ |
| 3 | beta-紫罗兰酮 | 233.58±7.31$^{c}$ | 300.78±14.88$^{b}$ | 329.60±9.80$^{b}$ | 333.59±18.78$^{b}$ | 370.87±10.88$^{a}$ |
| 4 | 5-甲基-2-己酮 | 478.09±20.62$^{a}$ | 184.46±14.57$^{bc}$ | 151.85±9.46$^{cd}$ | 196.66±19.94$^{b}$ | 124.75±6.80$^{d}$ |
| 5 | 2-庚酮 | 173.82±4.31$^{cd}$ | 167.76±8.20$^{d}$ | 420.70±23.69$^{b}$ | 649.72±42.20$^{a}$ | 234.19±18.91$^{c}$ |
| 6 | 大马士酮 | 575.87±42.58$^{d}$ | 877.42±38.82$^{bc}$ | 1113.55±117.41$^{ab}$ | 1172.79±166.92$^{a}$ | 852.38±35.10$^{c}$ |
| 7 | 2-壬酮 | 227.76±13.97$^{e}$ | 527.43±20.61$^{d}$ | 782.54±46.80$^{c}$ | 1174.86±87.51$^{b}$ | 1829.64±123.04$^{a}$ |
| 8 | 2-十二烷酮 | 102.38±4.21$^{c}$ | 200.93±13.68$^{bc}$ | 1827.34±167.30$^{a}$ | 216.77±8.44$^{bc}$ | 353.19±24.82$^{b}$ |
| 9 | (3E,5E)-辛-3,5-二烯-2-酮 | 77.56±4.79$^{d}$ | 118.30±7.57$^{c}$ | 159.60±8.27$^{a}$ | 144.03±7.95$^{ab}$ | 134.35±6.08$^{bc}$ |
| 10 | 3,5-辛二烯-2-酮 | ND | ND | 164.62±16.93 | ND | ND |
| | 总计 | 2168.74 | 2700.01 | 5488.60 | 4231.80 | 4480.55 |
| | 酯类 | | | | | |
| 1 | 乙酸芳樟酯 | 1275.82±121.20$^{c}$ | 1762.56±175.32$^{bc}$ | 2914.58±287.16$^{a}$ | 2902.09±228.23$^{a}$ | 1809.39±133.43$^{b}$ |
| 2 | 甲酸己酯 | 163.12±7.79$^{c}$ | 220.95±9.46$^{b}$ | 306.59±12.64$^{a}$ | 222.83±5.39$^{b}$ | 208.16±7.37$^{b}$ |
| 3 | 水杨酸甲酯 | 109.58±7.45$^{d}$ | 169.95±5.20$^{b}$ | 266.46±9.46$^{a}$ | 251.47±7.00$^{a}$ | 145.77±4.04$^{c}$ |
| 4 | 乙酸乙酯 | ND | ND | 114.91±5.03 | ND | ND |
| 5 | 甲酸辛酯 | ND | ND | 408.37±17.35$^{a}$ | ND | 258.91±12.35$^{b}$ |
| 6 | 对苯二甲酸二丁酯 | 103.64±5.39$^{b}$ | 193.77±6.77$^{a}$ | 189.88±6.75$^{a}$ | 182.33±7.99$^{a}$ | 197.94±17.38$^{a}$ |
| 7 | 邻苯二甲酸-1-丁酯-2-异丁酯 | 112.35±4.51$^{c}$ | 186.21±6.10$^{a}$ | 152.59±2.88$^{b}$ | 179.16±7.75$^{a}$ | 174.28±6.02$^{a}$ |
| | 总计 | 1764.51 | 2533.44 | 4353.38 | 3737.88 | 2794.45 |
| | 醛类 | | | | | |
| 1 | 苯甲醛 | 237.61±8.67$^{c}$ | 283.69±9.67$^{b}$ | 547.99±19.15$^{a}$ | 566.73±29.42$^{a}$ | 293.40±9.97$^{b}$ |
| 2 | 癸醛 | ND | ND | ND | 1222.84±133.80 | ND |
| 3 | 庚醛 | ND | ND | 116.39±3.20$^{a}$ | 114.55±5.78$^{a}$ | 91.19±4.89$^{b}$ |
| 4 | 正辛醛 | ND | ND | 367.71±11.38$^{b}$ | 433.73±26.76$^{a}$ | ND |
| 5 | 2,4-二甲基苯甲醛 | ND | ND | 2133.57±183.95$^{a}$ | 860.66±77.60$^{b}$ | ND |
| | 总计 | 237.61 | 283.69 | 3165.66 | 3198.51 | 384.59 |

**续表 3**

| 序号 | 挥发性风味物质 | 对照组 | 发酵对照组 | FJ-IMO | FJ-GOS | FJ-FOS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 烷烃类 | | | | | |
| 1 | p-伞花烃 | 103.33±4.82$^{e}$ | 201.45±6.07$^{d}$ | 401.07±17.78$^{a}$ | 366.44±7.34$^{b}$ | 279.96±8.02$^{c}$ |
| 2 | 茶香螺烷 | 188.61±6.55$^{d}$ | 581.99±20.56$^{bc}$ | 671.34±62.49$^{b}$ | 797.19±25.94$^{a}$ | 557.04±37.46$^{c}$ |
| | 总计 | 291.94 | 783.44 | 1072.41 | 1163.63 | 837.00 |
| | 其他 | | | | | |
| 1 | 3,5-二叔丁基苯酚 | 1076.30±130.74$^{ab}$ | 901.73±88.98$^{b}$ | 1218.16±96.85$^{a}$ | 928.77±53.56$^{b}$ | 1032.63±120.36$^{ab}$ |
| 2 | 白柠檬环醚 | 99.43±7.21$^{d}$ | 132.49±4.45$^{c}$ | 194.76±6.82$^{b}$ | 220.80±9.52$^{a}$ | 147.24±4.65$^{c}$ |
| 3 | 3,6-二氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃 | ND | 986.53±106.07$^{b}$ | 1246.90±82.92$^{ab}$ | 1365.51±130.29$^{a}$ | 1020.14±114.85$^{b}$ |
| | 总计 | 1175.73 | 2020.75 | 2659.82 | 2515.08 | 2200.01 |
| | 共计 | 12009.22 | 27451.06 | 43987.09 | 38398.70 | 31861.15 |

注：结果为三个独立重复实验的平均值；标准差均小于平均值的10%；“ND”表示未检出。

醇类是绿茶整个发酵阶段中占主导地位的挥发性风味物质，发酵后占绿茶挥发性风味物质总含量的 35%~39%。添加低聚糖的发酵绿茶中醇类物质含量高于发酵对照组，其中，低聚异麦芽糖的发酵绿茶醇类物质含量最高，达 17024.08 μg/L；添加蔗糖的发酵绿茶醇类物质含量最低，为 10680.88 μg/L。其中，alpha-松油醇是醇类化合物的重要组成部分，具有紫丁香花香。发酵结束后，添加低聚糖的发酵绿茶 alpha-松油醇含量高于添加蔗糖组，其中添加低聚异麦芽糖的 alpha-松油醇含量最大为 4886.10 μg/L。橙花醇、香叶醇和叶醇也是绿茶中的重要醇类化合物，分别具有甜天然柑橘香、花果香和青草香气[31]，发酵后绿茶中三种醇含量显著增加（$P$<0.05），其中，添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶中橙花醇、香叶醇和叶醇含量较高，分别为 703.41、2298.97 和 2613.78 μg/L。此外，异戊醇是添加低聚糖额外产生的风味物质，为发酵绿茶赋予了全新的清新花果香气。苯甲醇、橙花醇和香叶醇等醇类的增加可能是 $\beta$-葡萄糖苷酶水解糖苷的结果[32]。添加低聚半乳糖的发酵绿茶中醇类物质最多，共有 14 种，说明添加低聚糖发酵会增加绿茶中醇类物质的种类和含量。

烯类物质也是绿茶芳香化合物的重要组成部分，占发酵绿茶挥发性风味物质总含量的 22%~31%，添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶烯类物质含量最高为 9882.66 μg/L，添加蔗糖的发酵绿茶最低为 8318.39 μg/L。研究表明月桂烯对绿茶的主要风味有重要贡献，月桂烯是主要的烯类物质，具有强烈的花果香、青木香和白柠檬香[33]，添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶的月桂烯含量显著高于添加蔗糖组（$P$<0.05），为 2506.47 μg/L。

酸类物质是绿茶发酵后才产生的风味物质，共鉴定出丙二酸、己酸、法尼酸、月桂酸、辛酸、正癸酸 6 种，添加蔗糖的发酵绿茶中检测出 3 种，添加低聚糖的发酵绿茶中检测出 5 种，其中添加低聚半乳糖的发酵绿茶酸类物质总含量最高为 370.22 μg/L，占挥发性风味物质总含量的 0.01% 左右。低聚糖的添加使发酵绿茶新增法尼酸、月桂酸与正癸酸三种酸类物质，分别赋予了发酵绿茶丁香及仙来花香味、月桂油香味和坚果香气，说明添加低聚糖丰富了发酵绿茶中的酸类化合物，有助于改善发酵绿茶整体的香气，使其更受消费者青睐。

发酵绿茶独特的清爽香气与酮类、酯类和醛类化合物的含量有关，这些挥发性风味物质为发酵产品提供了可接受的风味[34]。绿茶中最具代表性的酮类化合物是大马士酮、beta-紫罗兰酮和 2-壬酮[35]，分别赋予绿茶玫瑰、蜂蜜与花果味、甜木质与坚果气味和草本气味，在添加低聚糖半乳糖的发酵绿茶中检测到大马士酮含量最高为 1172.79 μg/L，在添加低聚果糖组中检测出 beta-紫罗兰酮和 2-壬酮含量最高分别为 370.87 μg/L 和 1829.64 μg/L，有助于绿茶香气特征的形成。酮类是氧化反应的最终产物，低聚糖的添加促进了氧化反应发生，使绿茶中酮类物质的种类与含量增多。乙酸芳樟酯是绿茶中的主要酯类化合物，具有类似铃兰、薰衣草等香精油的幽雅香气，在添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶中检测出最高含量 2914.58 μg/L。添加低聚糖产生的两种新酯类物质是乙酸乙酯和甲酸辛酯，分别带有清灵果香和水果香气，酯类挥发性风味物质的增加与发酵过程中前体物质的代谢转化有关，可能是由氨基酸作为前体生成[36]。添加低聚糖的发酵绿茶新增葵醛、正辛醛、庚醛和 2,4-二甲基苯甲醛 4 种醛类物质，其醛类物质总含量均高于添加蔗糖组，其中，低聚半乳糖发酵组含量最高为 3198.51 μg/L。添加低聚异麦芽糖和低聚半乳糖的发酵绿茶中检测到较高醛类物质含量，这可能是因为低聚异麦芽糖和低聚果糖的添加能促进脂肪酸转化为醛类挥发性风味物质的降解反应。

如图 5 利用热图对挥发性风味物质进行了层次聚类分析，以揭示其中的关系。添加不同低聚糖的发酵绿茶主要分为四个聚类。添加低聚异麦芽糖的发酵绿茶为一类，香气组成与其他发酵绿茶有明显差别，其含有最丰富的酮类物质（甲基庚烯酮、3,5-辛二烯-2-酮）和酯类物质（乙酸乙酯、甲酸辛酯）。添加低聚半乳糖的发酵绿茶为一类，其含有丰富的醛类物质（癸醛、庚醛）。添加蔗糖的发酵绿茶为一类。添加

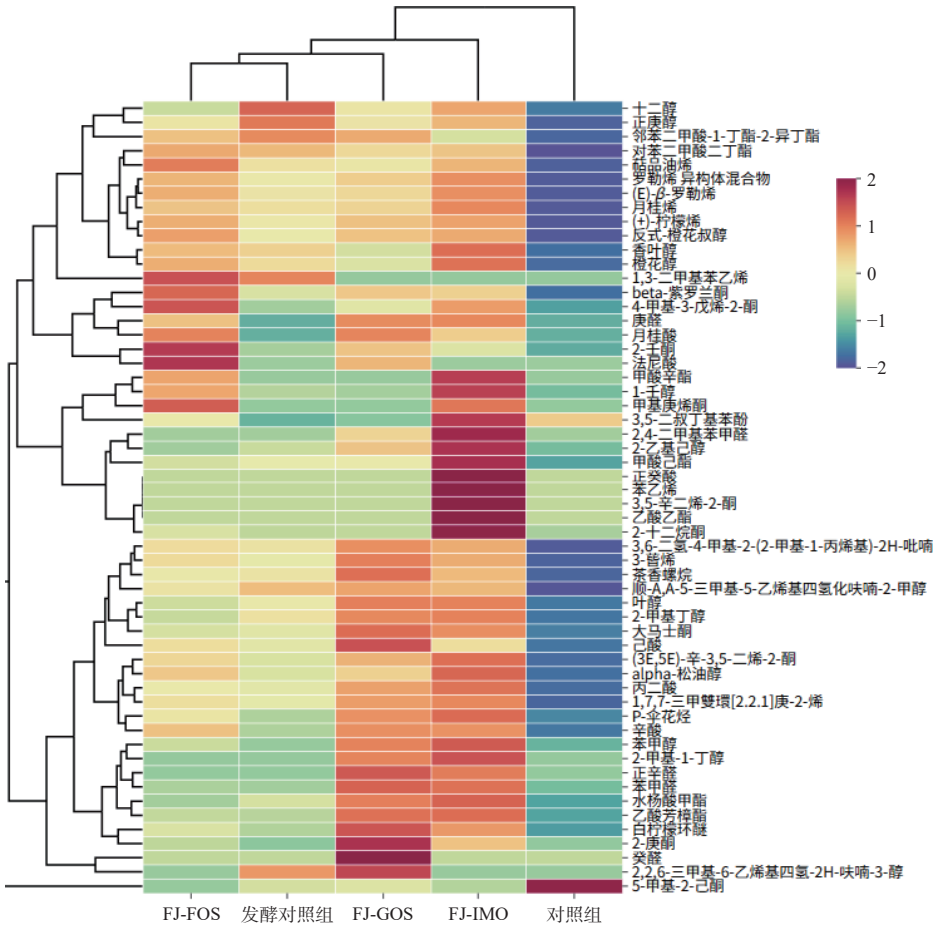



图 5 添加不同低聚糖发酵绿茶挥发性风味物质热图

Fig.5 Heat map of volatile flavor substances in fermented green tea with different oligosaccharide additions

低聚果糖的发酵绿茶为一类。分类结果表明，不同低聚糖对风味的形成有显著影响。

## 3 结论

本研究分析了不同低聚糖对植物乳植杆菌发酵绿茶发酵后各项理化指标、抗氧化活性、挥发性风味物质及活性成分的影响。结果表明，与添加蔗糖的发酵绿茶相比，添加三种低聚糖的绿茶发酵后活菌数增加，pH 降低，总酚和总黄酮含量显著增加，单体酚含量发生显著变化，抗氧化活性显著增强，有机酸含量与对照组存在显著差异，低聚糖的加入也会显著增加发酵绿茶中挥发性风味物质的含量（$P$<0.05）。在添加低聚糖的发酵绿茶中检测出 13 种新生成的挥发性风味物质，表明添加低聚糖发酵可以赋予绿茶新的风味，提高发酵绿茶香气的复杂程度，使其具有独特的绿茶香气。添加低聚糖不仅改善了发酵绿茶的品质与风味，还为功能性发酵茶产品的开发提供了理论依据。

© 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] HAN Z, SHI S, YAO B, et al. Recent insights in *Lactobacillus*-fermented fruit and vegetable juice: Compositional analysis, quality evaluation, and functional properties[J]. Food Reviews International, 2025, 41(6): 1836−1870.

[2] 陈洲琴, 杨煌建, 程贤, 等. 一株具有抗氧化活性茶源真菌的分离、鉴定及其与绿茶共发酵研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(7): 51−57. [CHEN Z Q, YANG H J, CHENG X, et al. Isolation and identification of a tea-derived fungus with antioxidant activity and its co-fermentation with green tea[J]. China Brewing, 2025, 44(7): 51−57.]

[3] 邓成林, 王芙苡, 周金萍, 等. 发酵绿茶饮料工艺优化、抗氧化活性及贮藏品质研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(19): 134−142. [DENG C L, WANG F Y, ZHOU J P, et al. Optimization of fermented green tea beverage process, antioxidant activity and storage quality study[J]. Food Research and Development, 2022, 43(19): 134−142.]

[4] TU C, HU W, TANG S, et al. Isolation and identification of *Starmerella davenportii* strain Do18 and its application in black tea beverage fermentation[J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(4): 355−362.

[5] WANG R, SUN J, LASSABLIERE B, et al. Green tea fermentation with *Saccharomyces boulardii* CNCM I-745 and *Lactiplantibacillus plantarum* 299V[J]. Lwt-Food Science and Technology, 2022, 157: 113081.

[6] 廖雪. 乳酸菌发酵绿茶饮料关键技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023. [LIAO X. Study on key technologies of lactic acid bacteria fermented green tea beverage[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]

[7] 殷一明, 赵德刚, 郑文佳. 绿茶抑菌成分提取工艺优化研究[J]. 中国茶叶, 2023, 45(8): 10−17. [YIN Y M, ZHAO D G,

ZHENG W J. Optimization of extraction process for antibacterial components in green tea[J]. China Tea, 2023, 45(8): 10−17. ]
[ 8 ] ASTAWAN M. , PRAYUDANI A P G, HADININGTIAS P, et al. Effect of tea extract (*Camellia sinensis*) on shelf life and intrinsic quality of tempe[J]. Canrea Journal: Food Technology, Nutritions, and Culinary Journal, 2024, 7(1): 1−14.
[ 9 ] AZZAH A I. Antibacterial activity of green tea leaves extracts against specific bacterial strains[J]. Journal of King Saud University-Science, 2023, 35(5): 102650.
[ 10 ] LIU S, ZHANG Q, LI H, et al. Comparative assessment of the antibacterial efficacies and mechanisms of different tea extracts [J]. Foods, 2022, 11(4): 620.
[ 11 ] 刘洋, 瞿恒贤, 张龙飞, 等. 低聚糖对益生菌发酵乳功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(5): 75−80. [ LIU Y, QU H X, ZHANG L F, et al. Effects of oligosaccharides on functional characteristics of probiotic fermented milk[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(5): 75−80. ]
[ 12 ] 杨健, 马永强, 姚笛. 四种低聚糖对乳酸菌体外增殖过程的影响研究[J]. 饲料研究, 2020, 43(4): 75−80. [ YANG J, MA Y Q, YAO D. Effects of four oligosaccharides on the proliferation of lactic acid bacteria *in vitro*[J]. Feed Research, 2020, 43(4): 75−80. ]
[ 13 ] 李雅丽, 王默涵, 周志桥. 6 种低聚糖对肠道益生菌生长情况的影响及代谢产物分析[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 7. [ LI Y L, WANG M H, ZHOU Z Q. Effects of six oligosaccharides on the growth of intestinal probiotics and analysis of their metabolites[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 7. ]
[ 14 ] HELEENA B M, ANGELICA M, ELENA H, et al. The ability of deep eutectic solvent systems to extract bioactive compounds from apple pomace[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132717.
[ 15 ] MUHAMMAD M F, MURTAZA A, RANA A M, et al. Sustainable emerging sonication processing: Impact on fungicide reduction and the overall quality characteristics of tomato juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 94: 106313.
[ 16 ] LI T, JIANG T, LIU N, 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.
[ 17 ] KWAW E, MA Y, TCHABO W, et al. Effect of *Lactobacillus* strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice[J]. Food Chemistry, 2018, 250: 148−154.
[ 18 ] TAO Y, SUN D W, GÓRECKI A, et al. A preliminary study about the influence of high hydrostatic pressure processing in parallel with oak chip maceration on the physicochemical and sensory properties of a young red wine[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 545−554.
[ 19 ] TAN S, LAN X, CHEN S, et al. Physical character, total polyphenols, anthocyanin profile and antioxidant activity of red cabbage as affected by five processing methods[J]. Food Research International, 2023, 169: 112929.
[ 20 ] KOPCZYŃSKA K, KAZIMIERCZAK R, ŚREDNICKA-TOBER D, et al. The profile of selected antioxidants in two courgette varieties from organic and conventional production[J]. Antioxidants, 2020, 9(5): 404.
[ 21 ] ZHAO Y, ARIEFANDIE FEBRIANTO N, ZHU F. Characterization of physicochemical properties, flavor volatiles and phenolic compounds of feijoa fruit varieties[J]. Food Chemistry, 2023, 419: 136074.
[ 22 ] WIDYASTUTI Y, FEBRISIANTOSA A. The role of lactic acid bacteria in milk fermentation[J]. Food Nutrition Sciences, 2014, 23(4): e13402.
[ 23 ] LEE I H, HUNG Y H, CHOU C C. Solid-state fermentation with fungi to enhance the antioxidative activity, total phenolic and anthocyanin contents of black bean[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 121(2): 150−156.
[ 24 ] 刘忠英, 崔继来, 周洁, 等. 夏季绿茶发酵产品研制及其品质评价[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 54−61. [ LIU Z Y, CUI J L, ZHOU J, et al. Development and quality evaluation of fermented green tea products in summer[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 54−61. ]
[ 25 ] LANDETE J M, CURIEL J A, RODRÍGUEZ H, et al. Aryl glycosidases from *Lactobacillus plantarum* increase antioxidant activity of phenolic compounds[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 7: 7322−7329.
[ 26 ] 王洁. 乳酸菌发酵枸杞叶茶工艺优化及品质评价[D]. 天津: 天津科技大学, 2024. [ WANG J. Process optimization and quality evaluation of lactic acid bacteria fermented *Lycium barbarum* leaf tea[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2024. ]
[ 27 ] MUSIAL C, KUBAN-JANKOWSKA A, GORSKA-PONIKOWSKA M. Beneficial properties of green tea catechins[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(5): 1744.
[ 28 ] ZHANG Y, LIU W, WEI Z, et al. Enhancement of functional characteristics of blueberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 139: 110590.
[ 29 ] TSUGE Y, YAMAMOTO S, SUDA M, et al. Reactions upstream of glycerate-1,3-bisphosphate drive *Corynebacterium glutamicum* D-lactate productivity under oxygen deprivation[J]. Applied Microbiology Biotechnology, 2013, 97: 6693−6703.
[ 30 ] CHEN H, YU F, KANG J, et al. Quality chemistry, physiological functions, and health benefits of organic acids from tea (*Camellia sinensis*)[J]. Molecules, 2023, 28(5): 2339.
[ 31 ] KANG S Y, 朱荫, 郑新强, 等. 不同季节绿茶香气成分的判别与聚类分析[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 268−275. [ KANG S Y, ZHU Y, ZHENG X Q, et al. Discrimination and cluster analysis of aroma components in green tea from different seasons[J]. Food Science, 2018, 39(14): 268−275. ]
[ 32 ] CHEN C, LU Y, YU H, et al. Influence of 4 lactic acid bacteria on the flavor profile of fermented apple juice[J]. Food Bioscience, 2019, 27: 30−36.
[ 33 ] LUO Z, MA L, ZHANG Y, et al. Effect of drying methods on aroma profiling of large-leaf green tea (*Camellia sinensis* var. *Assamica*) determined by HS-SPME-GC-MS[J]. Foods, 2025, 14(7): 1275−1275.
[ 34 ] 刘盼盼, 刘晓辉, 罗龙新, 等. 不同产地绿茶饮料香气特征及差异分析[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 147−152. [ LIU P P, LIU X H, LUO L X, et al. Aroma characteristics and differences analysis of green tea beverages from different producing areas[J]. Food Science, 2016, 37(2): 147−152. ]
[ 35 ] 范霞, 杨恒明, 陈荣顺. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法、电子鼻和电子舌技术分析绿茶饮料的风味物质[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(5): 960−974. [ FAN X, YANG H M, CHEN R S. Analysis of flavor compounds in green tea beverages based on headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, electronic nose and electronic tongue technology[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(5): 960−974. ]
[ 36 ] QIU Y, LIU X, LYU F, et al. Effects of fermentation of *Eurotium cristatum* on the flavor quality of Anji Baicha (*Camellia sinensis*) based on LC-MS and GC-MS[J]. Food Chem, 2025, 493 (2): 145663.