

厌氧发酵对雪茄烟叶香气成分的影响

熊华仪, 周文, 胡德军, 张维, 滕彩雯, 姜宇, 石艳, 高洋洋*

四川中烟工业有限责任公司长城雪茄厂, 四川 什邡

收稿日期: 2024年11月9日; 录用日期: 2024年12月6日; 发布日期: 2024年12月16日

摘要

【目的】研究陶坛作为发酵容器进行厌氧发酵对雪茄烟叶品质提升的效果, 优化发酵技术。【方法】对比分析厌氧发酵组(SY)、不充CO₂组(NC)和未发酵组(CK)的化学成分、感官质量并结合气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)对发酵后挥发性香味物质进行定量检测, 并分析发酵过程中氧化胁迫产物(H₂O₂和MDA)的浓度变化。【结果】① SY组的烟碱含量较CK组下降12.3%, 还原糖和总糖分别下降10.2%和9.8%, 钾氯比提高15.6%; ② 在感官评价中, SY组在香气量、甜润度和醇和度上得分较CK组分别提升33.5%、25.4%和18.7%; ③ 挥发性香味物质总量较CK组提升46.4%, 其中新植二烯含量较CK组提高51.5%, 美拉德反应产物糠醛、糠醇分别提高15.6%和12.1%; ④ 氧化胁迫指标中, SY组H₂O₂和MDA浓度分别较CK下降87.6%和66.2%。【结论】陶坛厌氧结合CO₂控温技术的发酵方式, 有效提升了雪茄烟叶的化学成分和感官品质, 促进香味物质的生成, 并显著降低氧化损伤, 为雪茄烟叶发酵工艺的优化提供了新的技术路径。

关键词

雪茄烟叶, 厌氧发酵, CO₂控温, 氧化胁迫, 化学成分, 挥发性香味物质

The Effect of Anaerobic Fermentation on the Aroma Components of Cigar Tobacco Leaves

Huayi Xiong, Wen Zhou, Dejun Hu, Wei Zhang, Caiwen Teng, Yu Jiang, Yan Shi, Yangyang Gao*

Greatwall Cigar Factory, China Tobacco Sichuan Industrial Co., Ltd., Shifang Sichuan

Received: Nov. 9th, 2024; accepted: Dec. 6th, 2024; published: Dec. 16th, 2024

Abstract

[Objective] This study aims to investigate the effect of using earthenware jars as fermentation

*通讯作者。

文章引用: 熊华仪, 周文, 胡德军, 张维, 滕彩雯, 姜宇, 石艳, 高洋洋. 厌氧发酵对雪茄烟叶香气成分的影响[J]. 农业科学, 2024, 14(12): 1339-1347. DOI: 10.12677/hjas.2024.1412168

vessels for anaerobic fermentation on the quality enhancement of cigar tobacco leaves, and to optimize fermentation techniques. [Methods] A comparative analysis was conducted on the chemical composition and sensory quality of the anaerobic fermentation group (SY), the non-CO₂ group (NC), and the unfermented group (CK). The volatile aroma compounds after fermentation were quantitatively analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and the changes in the concentrations of oxidative stress products (H₂O₂ and MDA) during fermentation were examined. [Results] 1) The nicotine content in the SY group decreased by 12.3% compared to the CK group, while reducing sugars and total sugars decreased by 10.2% and 9.8%, respectively, and the potassium-to-chloride ratio increased by 15.6%; 2) In sensory evaluation, the SY group scored higher than the CK group by 33.5% in aroma intensity, 25.4% in sweetness, and 18.7% in smoothness; 3) The total amount of volatile aroma compounds increased by 46.4% in the SY group compared to the CK group, with new plant-derived terpenes increasing by 51.5%, and Maillard reaction products such as furfural and furfuryl alcohol increasing by 15.6% and 12.1%, respectively; 4) Regarding oxidative stress indicators, the concentrations of H₂O₂ and MDA in the SY group decreased by 87.6% and 66.2%, respectively, compared to the CK group. [Conclusion] The fermentation method combining earthenware anaerobic fermentation with CO₂ temperature control effectively enhanced the chemical composition and sensory quality of cigar tobacco leaves, promoted the generation of aroma compounds, and significantly reduced oxidative damage. This study provides a new technological pathway for optimizing the fermentation process of cigar tobacco leaves.

Keywords

Cigar Tobacco Leaves, Anaerobic Fermentation, CO₂ Temperature Control, Oxidative Stress, Chemical Composition, Volatile Aroma Compounds

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雪茄烟是一种需要经过发酵处理的独特烟草制品, 未经过发酵的雪茄烟叶在味道上会存在青杂气重、香气不足、刺激性大、苦涩味重、劲头大等问题[1], 这些问题直接影响了雪茄的整体品质和消费者的体验。因此, 雪茄烟叶的发酵工艺显得尤为重要。

在有氧环境中, 活性氧(如 H₂O₂)的积累会导致烟叶中的一些重要香气前体, 如类胡萝卜素、脂肪酸等的过度氧化[2], 影响香味物质的形成。而厌氧发酵通过减少 H₂O₂ 的产生, 降低了过氧化反应的发生, 使得这些香气前体物质在适当的条件下转化为芳香化合物, 如类胡萝卜素降解产物(大马士酮)、美拉德反应产物(糠醛、糠醇等) [3], 从而提高了雪茄烟叶的香气含量。

丙二醛(MDA)是脂质过氧化的产物, 反映了细胞膜的氧化损伤程度[4]。在有氧条件下, 高水平的 MDA 会削弱微生物细胞膜结构稳定性, 影响其对底物的摄取与代谢。而厌氧发酵能够有效减少 MDA 的产生, 保持微生物的细胞膜完整性, 从而支持其高效代谢。这种代谢活动的增强, 有助于微生物产生更多的香气化合物, 提升雪茄烟叶的香气质量[5] [6]。

目前工业上常用的雪茄发酵方式为有氧发酵, 雪茄烟叶发酵过程中可能会产生不良风味, 影响雪茄的口感和品质, 降低消费者的满意度。随着对雪茄发酵科学的深入研究, 探索更有效的发酵工艺, 将为改善雪茄烟叶的品质和风味提供新的思路与方法。本文旨在研究陶坛厌氧发酵对雪茄烟叶香气成分的影响, 为雪茄的生产和品质提升提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 主要材料、试剂与仪器

主要材料：供试烟叶(四川德阳雪茄原烟 Fi-C-2-Bt-L 德雪四号)，四川中烟工业有限公司长城雪茄厂提供。

主要试剂：二氯甲烷、乙酸苯乙酯、醋酸、乙醇，均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司；过氧化氢含量检测试剂盒、丙二醛-MDA 试剂盒，北京索莱宝科技有限公司；

主要仪器：气相色谱-质谱联用分析仪(GC-MS)；FUTURA 型连续流动分析仪；紫外分光光度计。

2.2. 实验方法

2.2.1. 发酵方法

SY 组(实验组)采用陶坛装罐发酵，装坛烟叶质量为 35 kg，放入发酵房，控制发酵房温度 47℃ 发酵 15 天、40℃ 发酵 15 天、35℃ 发酵 30 天变化进行变温发酵，湿度 $80 \pm 5\%$ ，在三级变温发酵过程中，每级发酵温度变化时在陶坛内充入二氧化碳控温至下一级所需温度，发酵周期为 60 天；CK 组(对照组)为未发酵的烟叶；NC 组(空白组)，不充入二氧化碳降温，所有处理组初始含水量为 $(15 \pm 1)\%$ 。

2.2.2. 常规化学成分测定

参照[7]，将烟叶烘干后研磨，称取 0.25 g 粉末，加入 25 mL 萃取液(水溶液中分别加入体积分数 1% 的醋酸和 2% 的乙醇配制萃取液)振荡 1 h 后过滤得到上清液，使用连续流动分析仪对上清液进行常规化学成分测定。

2.2.3. 挥发性香气物质测定

使用蒸馏萃取(SDE)技术处理样品，并使用气相色谱质谱联用仪(GC-MS)分析烟叶香气成分及含量[8]。

2.2.4. 烟叶表面微生物收集

(1) 配制缓冲液：100 mmol/L Tris-HCl，50 mmol/L EDTA- Na_2 ，20 g/L PVP，1 mL/L 吐温 20，1.4 mol/L 氯化钠，调节 pH 值为 8。(2) 样品处理：首先取 30 g 烟叶样品切成小段，将其置于 300 mL 缓冲液中，超声处理 30 min，过滤烟叶，在 4℃、6000 r/min 条件下离心 10 min 后，弃置上清液，在离心管中加入 1 mL 缓冲液，沉淀重悬后，继续离心并弃去上清液，重复洗涤直至上清液几乎无色，收集微生物细胞(沉淀量在 200 mg 以上)，液氮速冻 1 h，于 -80℃ 冰箱中保存备用。

2.2.5. 氧化胁迫产物检测

采用过氧化氢检测采用索莱宝过氧化氢试剂盒。

采用丙二醛检测采用索莱宝丙二醛试剂盒。

2.2.6. 烟叶感官评价

满分 9 分制，选择醇和度、丰富度、香气量、甜润度、刺激性、舒适度、杂气、回味、燃烧性、灰色共 10 个品质特征指标，评分标准见表 1，发酵结束后的烟叶卷制成规格统一的单料烟支，由四川中烟长城雪茄烟厂 10 位感官评吸员进行感官评价。

2.3. 数据处理

参考 GC-MS 数据系统中的 NIST 参考文库鉴定挥发性香味物质；本文所有试验数据为 3 个平行试验的平均值，用平均值 \pm 标准差(SD)表示。采用 Origin 9.0 进行作图以及数据分析。

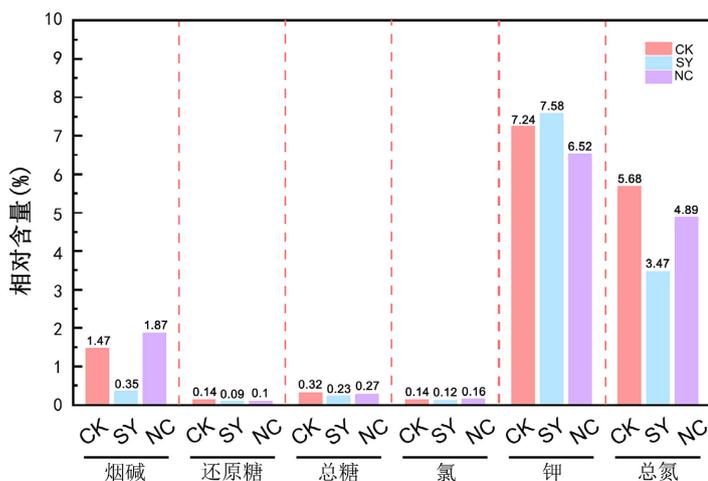
Table 1. Criteria for sensory evaluation and smoking rating of tobacco leaves**表 1.** 烟叶感官评分标准

评价指标	评分标准					
	≤4	5	6	7	8	9
醇和度	差	较差	稍欠	尚好	较好	好
丰富度	单调	稍单调	略丰富	尚丰富	较丰富	丰富
香气量	微弱	稍弱	一般	尚浓郁	较浓郁	浓郁
甜润度	苦涩	较苦涩	欠甜润	尚甜润	较甜润	甜润
刺激性	强	较强	一般	稍弱	弱	无
舒适度	差	较差	欠舒适	尚舒适	较舒适	舒适
杂气	多	较多	一般	稍少	少	无
回味	短暂	稍短	适中	尚悠长	较悠长	悠长
燃烧性	差	较差	稍欠	尚好	较好	好
灰色	黑	黑灰	花灰	灰	灰白	白

3. 结果与分析

3.1. 烟叶化学成分分析

雪茄烟叶的吸品质与其化学成分高度相关，其中烟碱、还原糖、总糖、氯、钾以及总氮等基础化学成分起着决定性作用[9]。各烟叶样品组的基础化学成分及其相对含量如图 1 所示：SY 组烟碱含量较 CK 和 NC 组显著下降，说明陶坛厌氧发酵的手段可能改善了烟叶表面的微生物菌群，增加了能够降低烟叶中烟碱的微生物丰度。还原糖和总糖在烟叶发酵过程中会参与美拉德反应等生化过程，生成香气成分，SY 和 NC 组的还原糖和总糖含量均下降。说明厌氧条件能够促进微生物利用还原糖和总糖。SY 组钾相对含量上升，同时氯含量下降，钾氯比上升，有助于提高烟叶的燃烧性。总氮含量 SY 组和 NC 组均较对照 CK 组下降，说明厌氧发酵过程能够代谢氨类化合物，这些化合物分解成氨气排出，SY 组含氮化合物含量下降最多，说明发酵过程充入 CO₂ 能够利于含氮化合物的分解。

**Figure 1.** Basic chemical composition and relative content of tobacco sample group**图 1.** 烟叶样品组的基础化学成分及其相对含量

3.2. 雪茄烟叶感官质量

由表 2 可知, 通过厌氧处理的 NC 组和 SY 组感官评价整体比未发酵的 CK 组好, NC 组在烟叶的丰富度、舒适度以及燃烧性上优于 SY 组。SY 组在醇和度、香气量、甜润度、刺激性、杂气方面表现最优; NC 组在丰富度、舒适度、回味、燃烧性、灰色方面表现最佳。

Table 2. Score table for sensory evaluation of tobacco leaves

表 2. 烟叶感官评价得分表

评价指标	样品		
	CK 组	NC 组	SY 组
醇和度	6.00 ± 0.15	6.12 ± 0.18	7.98 ± 0.12
丰富度	5.25 ± 0.20	7.95 ± 0.15	6.87 ± 0.10
香气量	3.95 ± 0.15	6.02 ± 0.22	7.85 ± 0.18
甜润度	5.10 ± 0.18	6.98 ± 0.12	7.95 ± 0.15
刺激性	2.98 ± 0.10	4.03 ± 0.15	6.97 ± 0.18
舒适度	6.23 ± 0.12	7.89 ± 0.09	6.76 ± 0.15
杂气	2.95 ± 0.20	4.89 ± 0.15	5.90 ± 0.12
回味	5.05 ± 0.18	7.87 ± 0.15	7.25 ± 0.10
燃烧性	4.87 ± 0.22	6.90 ± 0.12	5.98 ± 0.18
灰色	5.12 ± 0.15	7.05 ± 0.18	6.84 ± 0.24

3.3. 分析基础化学成分与感官质量指标相关性

基础化学成分与感官质量指标相关性分析如图 2 所示: 相关性分析结果显示各感官评价指标之间普遍存在正相关性, 其中丰富度与燃烧性, 甜润度与杂气和香气量, 灰色与回味、丰富度之间均有极强的正相关性。同时总氮、总糖、还原糖几个化学指标与醇和度、香气量、甜润度、刺激性、杂气、灰色等感官评价指标间存在显著的负相关性, 说明这几个化学指标可能是影响感官评价的主要原因。

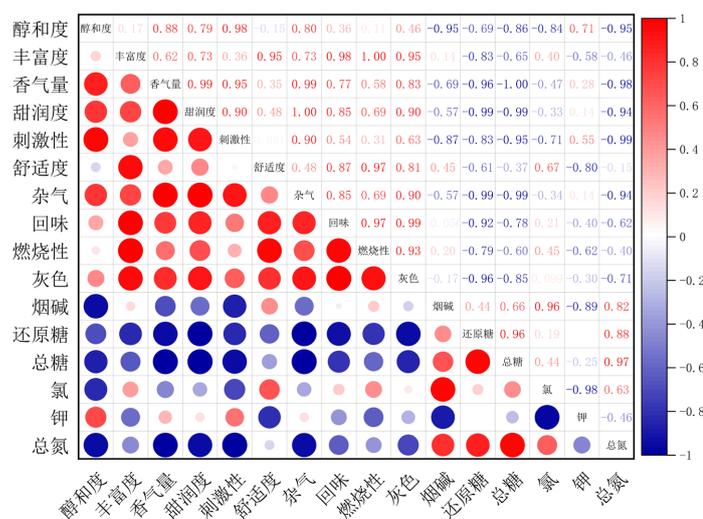


Figure 2. Correlation heatmap between basic chemical components and sensory quality indicators

图 2. 基础化学成分与感官质量指标相关性热图

3.4. 挥发性香味物质分析

Table 3. Volatile aroma compounds in cigar tobacco leaves

表 3. 雪茄烟叶挥发性香味物质

分类	物质	香气描述	样品组($\mu\text{g/g}$)		
			CK	SY	NC
醛类	糠醛		7.59	8.78	8.13
	苯乙醛	玫瑰	2.48	2.94	2.52
	苯甲醛	玫瑰	1.23	3.16	2.11
	4-吡啶甲醛		1.56	0.89	1.32
	丙醛		-	1.25	1.03
	β -环柠檬醛		0.88	0.59	0.42
	5-甲基呋喃醛		-	1.61	0.67
	香茅醛		2.41	2.54	1.65
	合计		16.15	21.76	17.85
醇类	糠醇		7.64	8.57	9.62
	苯甲醇	花香	7.26	10.26	8.94
	3-苄氧基-1-丙醇		-	0.26	-
	苯乙醇	玫瑰	11.42	18.65	19.63
	植物醇	香脂	13.45	14.81	16.21
	香紫苏醇	龙涎香	-	1.56	-
	合计		39.77	54.11	54.4
酮类	甲基庚烯酮	柠檬草	-	1.54	-
	香叶基丙酮	果香、花香	3.68	2.59	2.87
	巨豆三烯酮	清香、花香	15.82	22.79	15.66
	6-甲基-5-烯-2-酮	柑橘	-	0.28	-
	4-氧代异佛尔酮	柑橘、茶香	5.34	2.68	-
	异佛尔酮	甜味、木制	-	0.23	0.61
	大马士酮	玫瑰、果香	-	5.21	3.23
	茄酮	胡萝卜	-	28.64	18.29
	植酮		31.55	21.30	24.65
合计		56.39	85.23	65.31	
酸酯类	棕榈油酸		-	0.18	-
	合计		-	0.18	-
烯烃类	二氧化二戊烯		2.06	1.09	1.24
	新植二烯		328.54	498.21	409.16
	合计		330.6	499.3	410.4
其他类	吡啶	粪臭	10.27	6.54	7.98
	邻二甲苯	天竺葵	2.13	-	-
	3-乙酰基吡啶	坚果香	1.85	2.19	2.04
	合计		14.25	8.73	10.02

通过使用 GC-MS 对发酵结束后的雪茄烟叶进行挥发性香味物质分析, 结合 NIST 11 谱库进行检索, 结果如表 3 所示, 总共检测出 29 种挥发性化合物, 其中醛类(8 种)和酮类(9 种)最多, 其次为醇类(6 种)、烯炔类(2 种)、酸酯类(1 种)和其他(3 种)。由表 3 可知, 通过厌氧发酵处理的 SY 组和 NC 组香气总含量都明显上升, 分别较 CK 提升 46.4% 和 22%, 说明厌氧发酵的方式可以提升雪茄烟叶挥发性香味物质含量。

新植二烯是含量最高的挥发性香味物质, 是一种重要的增香剂, 其具有清香味同时在雪茄燃烧过程中能够协助使其他香气物质的挥发、提升烟气丰富度[10]。CK 组新植二烯含量为 328.54 $\mu\text{g/g}$, 厌氧发酵后 SY 组新植二烯含量高达 498.21 $\mu\text{g/g}$, 提升了 51.5%, NC 组新植二烯含量提升 24.5%, 美拉德反应是烟叶发酵过程中的重要化学反应之一, 能产生如糠醛、糠醇、呋喃等香气物质[11]。SY 组糠醛、糠醇和 5-甲基呋喃醛含量分别为 8.78 $\mu\text{g/g}$ 、8.57 $\mu\text{g/g}$ 和 1.61 $\mu\text{g/g}$ 较 CK 分别提升 15.6%、12.1% (其中 CK 组未检出 5-甲基呋喃醛)。NC 组美拉德反应产物总量较 SY 组低, 可能是由于美拉德反应的进行需要稳定的温度环境, SY 组在发酵过程中通过充入 CO_2 对烟叶进行降温的方式, 为其反应提供了稳定的温度环境, 同时 CO_2 的存在可能会利于某些微生物将蛋白质、淀粉等大分子物质转化为氨基酸和还原糖, 使其更容易参与美拉德反应。

苯丙氨酸的转化产物是雪茄烟香气的重要成分之一, 它们为雪茄烟赋予了独特的风味[12], 其中苯乙醇与苯甲醇等芳香物质尤为突出, 能为雪茄烟提供独特的花香[13]。通过厌氧发酵处理的 SY 和 NC 组苯甲醇(分别较 CK 提升 41.3% 和 23.1%)和苯乙醇(较 CK 提升 63.3% 和 71.8%)含量均提升, 可能是因为厌氧条件下促进了能够转化苯丙氨酸的微生物生长。

酮类物质是除去新植二烯以外含量最高的香味成分, 充入 CO_2 控温的 SY 组酮类物质总量较 CK 提升了 51.1%, 较 NC 组提升了 30.5%。其中甲基庚烯酮、6-甲基-5-烯-2-酮、异佛尔酮、大马士酮和茄酮在发酵前均未检出, 只在 SY 组检测出的甲基庚烯酮呈现出柠檬草香味含量为 1.54 $\mu\text{g/g}$, 6-甲基-5-烯-2-酮为柑橘香味, 含量为 0.28 $\mu\text{g/g}$ 。说明厌氧发酵能够显著提升酮类香气物质的含量。

吡啶是一种具有粪臭味且扩散性强的物质, 会影响雪茄烟的吸食体验。厌氧条件的 SY 和 NC 组吡啶含量分别下降了 36.3% 和 22.3%。说明厌氧发酵的方式能够降低吡啶的含量, 尤其是当发酵体系中充入 CO_2 时, 这可能是因为 CO_2 的充入不仅能够控制烟叶发酵的温度同时也能将一些杂气带出。

3.5. 氧化胁迫代谢产物浓度变化

在雪茄烟叶的厌氧发酵过程中, 氧化胁迫的改善可以通过过氧化氢(H_2O_2)和丙二醛(MDA)的浓度变化来衡量。 H_2O_2 是种常见的活性氧物质(ROS), 在微生物细胞中积累时会导致氧化损伤。而丙二醛是脂质过氧化的产物, MDA 浓度通常用作细胞膜脂氧化损伤的标志物, 反映了细胞膜的氧化应激程度。

H_2O_2 浓度变化如图 3(a)所示, 发酵初始时 H_2O_2 浓度为 1.29 mmol/L, SY 组过氧化氢浓度随着发酵时间的延长呈下降趋势, 发酵 35 天至 45 天时 H_2O_2 由 0.76 mmol/L 迅速降低至 0.31 mmol/L, 随后缓慢下降至发酵结束 0.16 mmol/L。NC 组发酵时仅为厌氧发酵, 未充入 CO_2 进行温度控制, H_2O_2 浓度缓慢下降至第 10 天, 为 1.25 mmol/L, 随后 H_2O_2 浓度小幅上升至 15 天的 1.3 mmol/L, 可能是由于发酵初期还有微量氧气在陶坛内部, 同时烟叶表面的微生物在面临环境变化时, 可能会产生应激反应, 短暂增加 H_2O_2 的生成。随后 H_2O_2 浓度一直下降至发酵结束为 0.88 mmol/L。

厌氧发酵环境有助于减少 H_2O_2 的积累, 因为在缺氧条件下, 细胞呼吸链的氧化还原反应减弱, 产生的 H_2O_2 量相应减少。同时, 厌氧发酵也可以调节抗氧化酶系, 如过氧化物酶、超氧化物歧化酶等的活性, 从而加速 H_2O_2 的降解。

MDA 浓度变化如图 3(b)所示, 发酵初始 MDA 浓度为 0.857 nmol/mg, SY 和 NC 组 MDA 浓度缓慢

下降 25 天, 分别为 0.715 nmol/mg 和 0.762 nmol/mg。25 天后 SY 组 MDA 浓度迅速下降至 0.29 nmol/mg, NC 组为 0.61 nmol/mg。MDA 浓度的降低表明厌氧发酵减少了膜脂的氧化损伤, 改善了细胞膜的完整性。这意味着厌氧发酵不仅减少了自由基的生成, 还降低了脂质过氧化的程度。

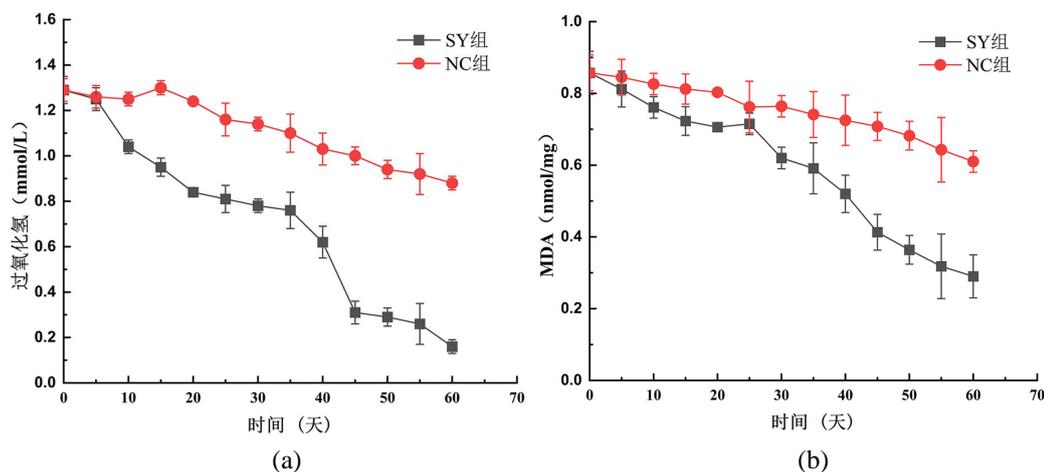


Figure 3. (a) Changes in hydrogen peroxide concentration during cigar tobacco fermentation process; (b) Changes in MDA concentration during cigar tobacco fermentation process

图 3. (a) 雪茄烟叶发酵过程过氧化氢浓度变化; (b) 雪茄烟叶发酵过程 MDA 浓度变化

4. 结论

本研究采用陶坛厌氧方式发酵雪茄烟叶, 并分析了发酵前后的多项指标。结果显示, 该方式能显著提升雪茄烟叶品质。一、基础化学指标方面, 厌氧发酵能改善烟叶的基础化学指标, 如降低烟碱含量、促进还原糖和总糖利用、提高钾氯比、降低总氮含量, 其中充入 CO_2 的 SY 组效果最佳。二、感官评价方面, 厌氧处理的 NC 组和 SY 组各有优势, NC 组在丰富度、舒适度和燃烧性上表现更佳, SY 组则在醇和、香气、甜润及减少刺激性杂气上更优。三、在挥发性香味物质含量方面, 厌氧发酵显著提升了雪茄烟叶的挥发性香味物质含量, SY 组在新植二烯、美拉德反应产物、苯丙氨酸转化产物、酮类香气物质上含量更高, 且不良物质吡啶含量降低。同时, 厌氧发酵结合 CO_2 控温有效降低了雪茄烟叶的 H_2O_2 和 MDA 浓度, 减少了氧化胁迫, SY 组表现优于 NC 组。综上所述, 陶坛厌氧发酵方式结合 CO_2 控温能够提高雪茄烟叶品质。

参考文献

- [1] 刘峰峰, 方欣, 李林林, 等. 雪茄茄衣深度发酵过程中挥发性成分的变化[J]. 广东农业科学, 2022, 49(2): 158-164.
- [2] 周恒, 谢彦杰. 植物氧化胁迫信号应答的研究进展[J]. 生物技术通报, 2023, 39(11): 36-43.
- [3] 杜佳. 雪茄茄衣在有氧和厌氧发酵条件下质量变化规律研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2017.
- [4] Tsikas, D. (2017) Assessment of Lipid Peroxidation by Measuring Malondialdehyde (MDA) and Relatives in Biological Samples: Analytical and Biological Challenges. *Analytical Biochemistry*, **524**, 13-30. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2016.10.021>
- [5] Bucher, M., Brändle, R. and Kuhlemeier, C. (1994) Ethanol Fermentation in Transgenic Tobacco Expressing Zymomonas Mobilis Pyruvate Decarboxylase. *The EMBO Journal*, **13**, 2755-2763. <https://doi.org/10.1002/j.1460-2075.1994.tb06569.x>
- [6] Yang, J., Xue, F., Li, D., Chen, J., Shi, G., Song, G., et al. (2024) Oxygen Regulation of Microbial Communities and Chemical Compounds in Cigar Tobacco Curing. *Frontiers in Microbiology*, **15**, Article 1425553. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1425553>

-
- [7] 张彤彤, 赵君, 余君, 等. 贝莱斯芽孢杆菌提升雪茄茄衣烟叶发酵品质机制研究[J]. 轻工学报, 2023, 38(6): 93-101.
- [8] 胡志忠, 姜宇, 龙章德, 等. 利用产香酵母发酵技术改善烟叶品质[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 200-204.
- [9] 张倩颖, 罗诚, 李东亮, 等. 雪茄烟叶调制及发酵技术研究进展[J]. 中国烟草学报, 2020, 26(4): 1-6.
- [10] 闫铁军, 丁宁, 王剑, 等. 雪茄烟马杜罗茄衣化学品质指数与中性香气物质的关系[J]. 南方农业学报, 2022, 53(6): 1543-1551.
- [11] 郭文龙, 丁松爽, 刘路路, 等. 翻堆对初次发酵过程中雪茄茄芯烟叶质量变化的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(2): 365-373.
- [12] 时向东, 王旭锋, 林开创, 等. 雪茄外包皮烟堆积发酵中主要中性香气物质的变化[J]. 西北农业学报, 2013, 22(7): 114-119.
- [13] 施友志, 潘勇, 杜甫, 等. 基于 SHS/GC-IMS、OAV 值结合多元统计学的不同品种雪茄烟叶特征香气构成差异解析[J]. 分析测试学报, 2023, 42(6): 674-683.