

低温等离子体协同复合精油对牛肉贮藏保鲜的影响

甘可凡, 钱婧, 章建浩, 严文静

Effect of Cold Plasma Synergistic Composite Essential Oils on Beef Storage and Freshness Preservation

GAN Kefan, QIAN Jing, ZHANG Jianhao, and YAN Wenjing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110230>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等离子体活化水作为解冻介质对牛肉杀菌效能及品质的影响

Effect of Plasma-activated Water as Thawing Media on the Sterilization and Quality of Beef

食品工业科技. 2022, 43(2): 338-345 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060219>

低温等离子体冷杀菌对盐水鸭货架期及风味品质的影响

Effects of Cold Plasma Sterilization on Shelf Life and Flavor Quality of Salted Duck

食品工业科技. 2021, 42(17): 70-77 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010031>

低温等离子体活化水对蓝莓表面微生物抑制作用及其贮藏品质的影响

Inhibitory Effect of Low Temperature Plasma-Activated Water on the Surface Microorganisms and the Quality Attributes of Blueberry

食品工业科技. 2023, 44(8): 359-365 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060084>

低温等离子体对糙米蒸煮品质和物化特性的影响

Effects of Low Temperature Plasma on Cooking Quality and Physicochemical Properties of Brown Rice

食品工业科技. 2020, 41(2): 9-15 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.002>

等离子体活化水对鲜切生菜杀菌效能及贮藏品质影响

Effect of Plasma Activated Water on Microbial Decontamination and Storage Quality of Fresh-cut Lettuce

食品工业科技. 2020, 41(21): 281-285,292 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019120106>

复合抗氧化剂处理对五香牛肉低温贮藏品质的影响

Effect of Compound Antioxidant Treatment on the Spiced Beef Under Low Temperature Storage Conditions

食品工业科技. 2021, 42(11): 204-210 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090015>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

甘可凡, 钱婧, 章建浩, 等. 低温等离子体协同复合精油对牛肉贮藏保鲜的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 292-301. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110230

GAN Kefan, QIAN Jing, ZHANG Jianhao, et al. Effect of Cold Plasma Synergistic Composite Essential Oils on Beef Storage and Freshness Preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 292-301. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110230

· 贮藏保鲜 ·

低温等离子体协同复合精油对牛肉贮藏保鲜的影响

甘可凡¹, 钱婧², 章建浩^{1,*}, 严文静^{1,*}

(1.南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095;

2.东南大学公共卫生学院, 江苏南京 210009)

摘要:本研究采用低温等离子体 (Cold Plasma, CP) 技术协同复合精油 (肉桂精油和丁香精油) 对生鲜牛肉进行保鲜处理, 并探究 CP 处理后复合精油抗氧化性的变化, 分析了协同处理对牛肉菌落总数、假单胞菌数、表观色泽、pH 值、总挥发性盐基氮含量 (Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N)、脂质氧化、质构及气味的影响。结果表明: CP 协同复合精油处理可有效降低贮藏期内牛肉表面的菌落总数和假单胞菌数, 将货架期延长 6 d; 同时, 复合精油的存在能够减缓 TVB-N 增加和脂质氧化, 协同处理组 a^* 值在贮藏中后期始终保持较高水平且显著高于对照组 ($P < 0.05$); 此外, CP 协同复合精油处理可较好地保持贮藏期内牛肉 pH 值在 5.6 左右; 在质构方面, 协同处理对牛肉内聚性和弹性无显著影响, 但会造成牛肉硬度和咀嚼性上升; 感官评价结果表明, 协同处理组牛肉整体可接受性最佳。综上, CP 协同复合精油处理可有效延长牛肉货架期, 且协同处理组能够保持较好的感官品质。

关键词:牛肉, 低温等离子体, 复合精油, 贮藏期, 品质

中图分类号: TS251.5⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)21-0292-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110230



本文网刊:

Effect of Cold Plasma Synergistic Composite Essential Oils on Beef Storage and Freshness Preservation

GAN Kefan¹, QIAN Jing², ZHANG Jianhao^{1,*}, YAN Wenjing^{1,*}

(1.College of Food Science and Technology, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China;

2.School of Public Health, Southeast University, Nanjing 210009, China)

Abstract: In this study, cold plasma (CP) technology combined with composite essential oils (cinnamon and clove essential oils) treatment was applied to preserve fresh beef. Changes in the antioxidant properties of composite essential oils after CP treatments were investigated. What's more, the effects of synergistic treatments on the total viable bacteria count, *Pseudomonas* spp. count, apparent color, pH value, total volatile basic nitrogen (TVB-N), lipid oxidation, texture, and odor of beef were analyzed. The results showed that the CP combined with essential oils treatment was effective in reducing the total number of colonies and *Pseudomonas* spp. on the surface of beef during the storage period, and extending the shelf life for 6 d. Moreover, the presence of essential oils led to a slower lipid oxidation rate and reduced TVB-N values. The a^* value in the synergistic treatment group was significantly higher than that in the control group in the middle and late storage period ($P < 0.05$). In addition, the synergistic treatment could better maintain the stability of the pH value of beef at about 5.6 during storage. In terms of texture, the synergistic treatment had no significant effect on the cohesion and elasticity of beef, but caused an increase in the hardness and chewiness. The results of the sensory evaluation indicated that the overall

收稿日期: 2023-11-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2100503); 国家重点研发计划项目 (2021YFD2100503); 烟台市科技计划项目 (2023ZDCX027)。

作者简介: 甘可凡 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工与质量控制, E-mail: gkfl18109@163.com。

* 通信作者: 章建浩 (1961-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工与质量控制, E-mail: nau_zjh@njau.edu.cn。

严文静 (1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: ywj1103@njau.edu.cn。

acceptability of beef after synergistic treatment was the best. In conclusion, the CP combined with composite essential oils treatment could effectively prolong the shelf-life of beef and maintain better sensory qualities.

Key words: beef; cold plasma; composite essential oil; storage period; quality

牛肉因其营养价值高和口感丰富等特点深受消费者喜爱,是目前我国肉品消费市场的主流肉类之一。然而牛肉水分含量较高,蛋白质和脂肪等营养物质丰富,在加工和运输过程中极易受到污染^[1],引起腐败菌的滋生,腐败菌除了破坏食品营养组分,导致食品感官性状异常之外,在其代谢过程中还会产生多种有毒物质,如胺类、吲哚、粪臭素和亚硝胺等,严重时还可导致急性中毒、伤口感染和脑膜炎等疾病,危害消费者健康^[2-3];同时,牛肉品质劣变导致货架期短,造成行业损失。因此,开发一种既能保证牛肉品质又能延长货架期的保鲜技术是市场的迫切需求^[4-6]。

低温等离子体(Cold Plasma, CP)技术作为一种新兴的广谱灭菌技术,其产生的活性成分主要有活性氧、活性氮、震动激发的分子和电子等^[7],能够有效杀灭多种类型的细菌、真菌类病原菌、芽孢、病毒和酵母菌^[8-11],具有温度低、效率高、操作简单等优点;同时,低温等离子体技术作为非热杀菌技术,在肉及肉制品加工中能最大程度地保证产品原有的品质和风味,延长保质期。然而,等离子体产生的活性物质可能会促进肉品的脂质氧化。植物精油和低温等离子体的结合可以减少处理时间、降低对产品品质的不良影响。Cui 等^[12]将低温等离子体与柠檬草精油结合应用于猪里脊肉保鲜,结果表明协同处理可显著降低猪肉表面单增李斯特菌数量,同时对猪肉的感官属性的潜在影响降至最低。植物精油是植物中天然存在的低分子质量活性物质的混合物,具有天然绿色和高挥发性等优点,抑菌效果良好,可在食品加工领域代替合成防腐剂^[13-14]。而单一精油成分作为食品防腐剂时通常效力低,目前有大量研究表明,许多精油在组合使用时表现出协同活性,具有更好的抑菌效果^[15]。杨柳等^[16]发现将肉桂精油和丁香精油 1:1 复配后对大肠杆菌和黑曲霉菌的抑菌效果极佳,且在相同的温度和 pH 条件下较单一精油的抑菌性能更稳定。

因此,本研究将复合精油与等离子体技术相结合,利用精油的抗氧化性质缓解等离子体对牛肉造成的脂质氧化。本文采用天然复合精油协同 CP 技术对生鲜牛肉进行保鲜处理,探究 CP 处理对复合精油的抑菌性能、总酚含量和 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除率的影响,并进一步对贮藏期内牛肉的菌落总数、假单胞菌菌落数、pH 值、色差、TBARS、TVB-N 和质构等指标进行测定,为植物精油与低温等离子体技术结合在肉品杀菌保鲜方向的应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牛背最长肌 购自南京市卫岗菜市场;假单胞菌菌种 由牛肉表面分离纯化鉴定获得;肉桂精油 上海源叶生物科技有限公司;丁香精油 上海麦克林科技有限公司;没食子酸 上海阿拉丁生物科技有限公司;DPPH 上海化成工业发展有限公司;PCA/TSA/TSB 培养基 青岛海博生物技术有限公司;CFC 假单胞菌选择性培养基 青岛海博生物技术有限公司。

CPCS-I 高压电场低温等离子体冷杀菌设备 南京苏曼等离子体科技有限公司;CR-400 滤镜式色差计 日本 Minolta 公司;数显式 pH 测试仪 梅特勒-托利多仪器有限公司;UV-2006 紫外分光光度计 日本岛津公司;KH-400KDB 型数控超声波清洗器 昆山禾创超声仪器公司;BSC-250 恒温培养箱 上海博讯实业有限公司;FOSS Kjeltac 8400 自动凯式定氮仪 丹麦福斯集团。

1.2 实验方法

1.2.1 肉桂、丁香复合精油浸泡液制备 参考钱婧等^[17]方法略作改进,用体积分数 20% 乙醇溶液分别配制 0.05%、0.10%、0.15%、0.20% 浓度的复合精油浸泡液。将肉桂精油和丁香精油以体积比 1:1 混合加入 20 mL 无水乙醇中,超声(频率 40 kHz,功率 400 W)至分散,再加入 80 mL 无菌去离子水,继续超声 10 min,直至精油完全分散。

1.2.2 CP 协同肉桂、丁香复合精油的抑菌实验 牛肉样品在 4 °C 条件下贮藏至腐败后,用生理盐水将其表面菌洗脱,选取合适稀释梯度后涂布于 PCA 培养基表面,28 °C 恒温培养箱中培养 48 h。挑选不同大小、形态、光泽及颜色不同的单菌落接种于 TSA 培养基中,28 °C 振荡培养 12 h,再次划线培养挑选单菌落,重复 2~3 次,最后将对数生长期菌液与等体积的 50%(体积分数)甘油水溶液混匀,置于-80 °C 冰箱中冻存保藏菌种。将样本菌液送至北京六合华大基因科技有限公司进行测序比对,确认该菌为莓实假单胞菌(*Pseudomonas fragi*)。

从-80 °C 冰箱中取出保藏的假单胞菌菌种在 TSA 培养基上划线培养活化(28 °C, 24 h),选取 3~5 个典型单菌落接种到 TSB 中,于 28 °C、180 r/min 的条件下摇床培养 12 h,取活化好的菌液在 4 °C 条件下 7500 r/min 离心 10 min,去除上清,用生理盐水重悬三次,将菌液浓度调整至约 10⁸ CFU/mL 备用。

将菌液转移至无菌 6 孔板中,菌液与复合精油按体积比 5:1 混合,轻微混匀后将孔板放入聚丙烯

包装盒(14 cm×8.5 cm×3.7 cm)内。将包装好的孔板置于低温等离子体设备内处理,处理电压为 160 kV,处理时间为 30 s。对照组为只用不同浓度精油处理,实验组为精油联合 CP 处理。处理完 2 h 后,进行假单胞菌菌落数测定。

1.2.3 CP 处理对复合精油总酚含量影响 参考 Ahmed 等^[18]和万文侠等^[19]方法略作改进,用 40%乙醇溶液配制 0.1 mg/mL 没食子酸,取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 配制好的没食子酸-乙醇溶液于具塞玻璃管中,分别加入 6 mL 超纯水和 0.5 mL 的 1 mol/L 福林酚试剂,振荡后避光静置 10 min。用 0.1 g/mL 的 Na₂CO₃ 溶液分别定容至 10 mL,混匀后置于暗室反应 2 h,测定其在 763 nm 波长处吸光度,绘制该浓度梯度下的标准曲线。

在 6 孔板中加入 5 mL 不同浓度的复合精油溶液,置于聚丙烯包装盒内,放入低温等离子体设备中处理,处理电压为 160 kV,处理时间为 30 s。吸取 0.1 mL 经等离子体处理后的复合精油,加入 6 mL 超纯水和 0.5 mL 福林酚试剂,振荡避光静置 10 min 后,用 0.1 g/mL 的 Na₂CO₃ 溶液定容至 10 mL,置于暗室使其充分反应 2 h,测定其吸光度值。样品所含总酚含量以每克样品所含没食子酸质量计。将只采取复合精油处理组标记为对照组,复合精油联合 CP 处理组标记为 CP 组。

1.2.4 CP 处理对复合精油 DPPH 自由基清除率的影响 参考 El Hachlafi 等^[20]的方法略作改进,称取 8 mg DPPH 溶于 100 mL 无水乙醇,即得 0.2 mmol/L 的 DPPH-乙醇溶液,即配即用。将 1 mL CP 处理前后的复合精油溶液与等体积的 DPPH 乙醇溶液混匀,暗反应 30 min 并测定 517 nm 处吸光度,同时测定 DPPH 溶液与空白溶剂混合后的吸光度值。将只采取复合精油处理组标记为对照组,复合精油联合 CP 处理组标记为 CP 组。清除率按式(1)计算:

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100$$

式中: A₁ 为精油溶液与 DPPH 溶液反应吸光度值, A₀ 为空白溶剂与 DPPH 溶液反应吸光度值

1.2.5 样品的处理 将牛肉切成 30 mm×20 mm×8 mm 左右的方块,随机分为 4 组,进行如下处理:第 1 组为对照组,不做任何处理,置于聚丙烯包装盒(14.0 cm×8.5 cm×3.7 cm)内,标记为 CK 组;第 2 组为等离子体处理组,在第 1 组包装基础上利用等离子体设备在 160 kV 电压下处理 5 min,标记为 CP 组;第 3 组为复合精油处理组,将分割好的牛肉在质量分数为 0.15%的肉桂、丁香复合精油中浸泡 1 min,沥干表面水分后置于聚丙烯包装盒中,标记为 EO 组;第 4 组为协同处理组,在第 3 组包装的基础上利用等离子体设备在 160 kV 电压下处理 5 min,标记为 CP+EO 组。按上述条件处理后将样品放入

4 °C 冰箱中贮藏,在贮藏期的第 1、4、7、10 和 13 d 每天随机抽取 3 盒样品进行各项指标检测。

1.2.6 菌落总数及假单胞菌计数 参照 GB 4789.2-2022《食品微生物学检验菌落总数测定》。样品处理后,在 4 °C 条件下贮藏,分别在 1、4、7、10、13 d 对样品的微生物进行检测。

将 10 g 待测样品与 90 mL 无菌生理盐水置于无菌密封袋中,用拍打式均质器匀速拍打 1 min 后,取混合液按梯度进行 10 倍稀释,选取合适梯度吸取 1 mL 菌液,分别加入平板计数琼脂和 CFC 假单胞菌选择性培养基混匀,在 37 °C 下培养 48 h 后进行菌落总数和假单胞菌计数。

1.2.7 色差的测定 参照 Qian 等^[7]方法测定,选用 CIE 标准光源 D65,用标准白板瓷砖校准(L*=95.35, a*=0.01, b*=2.30),每个样品测定三次并记录 L*、a*、b*值的平均值。

1.2.8 pH 值的测定 按照国标 GB 5009.237-2016《食品 pH 值的测定》进行测定。

1.2.9 挥发性盐基氮(TVB-N)测定 按照国标 GB 5009.228-2016《食品中挥发性盐基氮的测定》中自动凯式定氮仪进行测定。

1.2.10 硫代巴比妥酸值(TBARS)测定 按照 GB 5009.181-2016《食品中丙二醛的测定》中分光光度法测定。

1.2.11 质构 参照吴梦迪等^[21]的方法略作改进,将贮藏第 1 d 的牛肉样品剪成 1 cm³ 的方块,选用 TMS 38.1 mm perspex 圆柱形探头,TPA 模式,测试速度 60 mm/min,形变量 40%,测定不同处理组牛肉的硬度、内聚性、弹性和咀嚼性。

1.2.12 电子鼻 参照郭进等^[22]方法略作改进,称取 5±0.1 g 样品,绞碎置于 20 mL 顶空瓶中,于 37 °C 顶空萃取 30 min。洗气时间 120 s,自动调零 5 s,进样时间 100 s,气体流速 400 mL/min,每个样品平行测定 3 次。

1.2.13 感官评定 参考 GB/T 22210-2008《肉和肉

表 1 牛肉品质感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation standards of beef quality

| 指标 | 评定标准 | 得分 |
|--------|----------------|------|
| 色泽 | 肌肉色泽鲜艳有光泽 | 8~10 |
| | 色泽较鲜红或较有光泽 | 4~7 |
| | 色泽暗红或无光泽 | 1~3 |
| 气味 | 有牛肉特有的气味,无其他异味 | 8~10 |
| | 有牛肉的一般气味,稍有异味 | 4~7 |
| | 有异味,不可接受 | 1~3 |
| 组织状态 | 按压后马上恢复原状 | 8~10 |
| | 按压后一段时间可慢慢恢复 | 4~7 |
| | 按压后凹凸明显不可恢复 | 1~3 |
| 整体可接受度 | 整体可接受度高 | 8~10 |
| | 整体可接受度较高 | 4~7 |
| | 整体不可接受 | 1~3 |

制品感官评定规范》,评审总人数 12 人,其中男女各 6 人,按表 1 标准对样品进行感官评定。

1.3 数据处理

所有实验重复 3 次,采用 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行单因素方差分析及相关性分析。采用 Duncan's 多重比较法进行显著性分析($P<0.05$),总酚含量和 DPPH 自由基清除率结果采用 t 检验法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 低温等离子体协同复合精油对假单胞菌的抑菌效果

由图 1 可知,当复合精油浓度为 0%(溶液介质为 20% 乙醇)时,该处理未对假单胞菌菌落数造成影响,且联合等离子体处理仅降低其菌落数 0.63 lg CFU/g。随着复合精油浓度的提高,假单胞菌存活率逐渐降低,但当复合精油浓度增至 0.2% 时,菌落数仅降低了 2.24 lg CFU/g。当 0.1% 复合精油协同低温等离子体处理后,假单胞菌菌落数由 8.10 lg CFU/g 降至 3.52 lg CFU/g;随着复合精油浓度增至 0.15%~0.2% 时,未有菌落数检出,表明 0.15% 以上浓度的精油协同低温等离子体处理可完全杀灭假单胞菌,故选取 0.15% 复合精油用于后续试验。Cui 等^[12]发现 10 mg/mL 柠檬草精油可以破坏单增李斯特菌的细胞膜,导致细胞内成分的损失,包括 DNA、蛋白质和 ATP;此外,将 5 mg/mL 柠檬草精油和低温氮气等离子体联合处理猪里脊肉后,可使其表面接种的单增李斯特菌菌落数降低 2.8 lg CFU/g,呈现较好的抗菌效果。因此,等离子体的协同处理可降低精油浓度且提高杀菌效率。

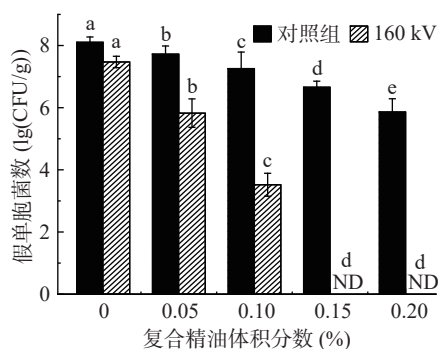


图 1 CP+EO 处理对假单胞菌抑菌效果的影响

Fig.1 Inhibitory effect of CP+EO treatment on *Pseudomonas* spp.

注:不同字母表示不同精油浓度、协同处理在 $P<0.05$ 有显著性差异;ND 表示未检出。

2.2 CP 处理对复合精油总酚含量及 DPPH 自由基清除率的影响

由表 2 可知,精油的总酚含量和 DPPH 自由基清除率(即抗氧化能力)随着复合精油浓度的增加而提高,且二者之间呈正比关系,与 Liu 等^[23]在研究红豆杉针叶精油总酚含量和抗氧化活性中的结论一

致。当精油经 CP 处理后,其总酚含量从 0.25~0.75 mg/g 降至 0.19~0.67 mg/g,其 DPPH 自由基清除率从 93.28%~97.48% 降至 92.48%~95.29%,发现等离子体处理并不会对 0.15% 精油的总酚含量和 DPPH 自由基清除率造成显著影响($P>0.05$)。Yoo 等^[24]发现当采用丁香油和等离子体对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌进行协同杀菌时,等离子体处理并未对丁香油活性成分和抗氧化性能造成影响,这与本文结论一致。但 Hemmati 等^[25]发现绿茶粉经大气低温等离子体处理后其总酚含量显著降低,并指出等离子体中活性氧物质如臭氧会通过破坏芳香环以降解酚类化合物,随着处理时间的增加其抗氧化活性降低。这可能归因于不同等离子体设备处理功率有所差异,且处理时间对抗氧化活性物质影响较大。在本研究中,CP 处理未对 0.15% 复合精油中的总酚含量和 DPPH 自由基清除率造成显著影响,且协同处理显著提高杀菌效率,进一步证实了 CP 协同复合精油处理的可行性。

表 2 CP 处理对复合精油总酚含量和 DPPH 自由基清除率的影响

Table 2 Effect of CP treatment on total phenolic content and DPPH radical scavenging of composite essential oils

| 复合精油体积数(%) | 总酚含量(mg/g) | | DPPH自由基清除率(%) | |
|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 对照组 | CP组 | 对照组 | CP组 |
| 0.05 | 0.25±0.01 ^a | 0.19±0.01 ^a | 93.28±0.23 ^a | 92.48±0.34 ^a |
| 0.1 | 0.47±0.01 ^a | 0.41±0.02 ^a | 94.84±0.18 ^a | 93.75±0.17 ^b |
| 0.15 | 0.59±0.02 ^a | 0.53±0.01 ^a | 95.61±0.47 ^a | 94.71±0.82 ^a |
| 0.2 | 0.75±0.02 ^a | 0.67±0.01 ^b | 97.48±1.06 ^a | 95.29±0.66 ^b |

注:同行小写字母不同,表示对照组与CP组之间差异显著($P<0.05$)。

2.3 CP+EO 处理对牛肉贮藏过程中菌落总数和假单胞菌菌落数的影响

微生物是衡量生鲜肉品质的重要指标,细菌的增长繁殖不仅会分解肉中的蛋白质等营养成分,降低营养价值,还会产生硫化氢等刺激性物质,破坏感官品质,故抑制细菌生长对延长生鲜肉货架期具有重要意义^[26]。由图 2 可知,在贮藏第 1 d,CK 组牛肉菌落总数为 4.23 lg CFU/g,经 EO、CP 和 CP+EO 处理后分别降至 3.77、3.52 和 2.80 lg CFU/g,各处理组之间均有显著差异($P<0.05$)。根据健康肉全链条质量管理规范规定,生鲜牛肉菌落总数要求低于 6 lg CFU/g,但当贮藏至第 4 d 时,CK 组菌落总数达到 5.82 lg CFU/g,即将超出规范要求,EO 组和 CP 组菌落总数则分别在贮藏期第 7 和 10 d 时增至 6.45 和 6.51 lg CFU/g,已超出标准。CP+EO 组牛肉贮藏至第 10 d 时,其菌落总数为 5.69 lg CFU/g,仍低于标准界限,直至第 13 d 才超过标准限定值,与对照组相比延长货架期 6 d 以上。此外,在贮藏第 1 d 时(图 3),CK 组牛肉中假单胞菌数为 3.57 lg CFU/g,经协同处理后,显著降至 2.64 lg CFU/g。且协同处理在贮藏过程中呈现更佳的抑菌性能,在贮藏末期第 13 d 时,

CK 组、EO 组、CP 组和 CP+EO 组牛肉的假单胞菌数分别为 7.22、7.16、6.61 和 5.93 lg CFU/g。综上所述,CP 和 EO 处理虽会抑制牛肉中微生物的生长,但二者协同处理效果更显著。

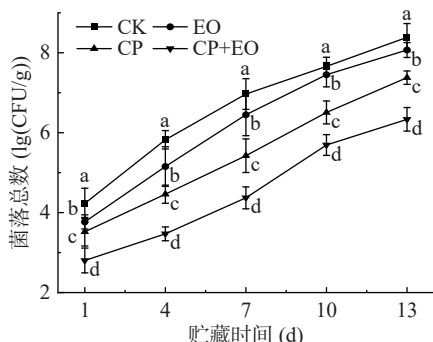


图 2 CP 协同复合精油处理对贮藏期内牛肉菌落总数的影响

Fig.2 Effect of CP combined with essential oil blend on the total bacterial count of beef during storage

注:不同字母表示同一贮藏时间、不同处理组在 $P<0.05$ 水平下有显著性差异,图 3~图 6 同。

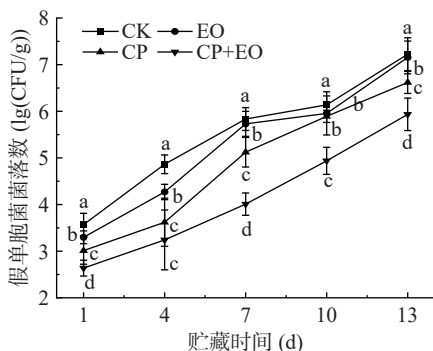


图 3 CP 协同复合精油处理对贮藏期内牛肉假单胞菌菌落数的影响

Fig.3 Effect of CP combined with essential oil blend on *Pseudomonas* count of beef during storage

2.4 CP+EO 处理对牛肉表面色差的影响

从表 3 中可知,CK 组 L^* 值在第 1 至 10 d 内呈

下降趋势,在贮藏期第 13 d 有所回升,这可能归因于贮藏后期 CK 组样品表面微生物生长繁殖情况严重,测定时受到样品腐败的干扰。EO 组 L^* 值在贮藏前 7 d 保持稳定,随后快速降低,CP 组则在贮藏中期呈现该特点,协同处理组 L^* 值在整个贮藏期保持稳定。 L^* 值受肉样表面水分含量的影响,样品表面水分含量较多时 L^* 值较大,随着水分减少慢慢降低^[27]。 a^* 值则与样品中的肌红蛋白密切相关^[28],在贮藏前期,CK 组和 EO 组 a^* 值无显著差异 ($P>0.05$),而 CP 组 a^* 值显著低于 CK 组、EO 组和 CP+EO 组 ($P<0.05$),表明等离子体处理对牛肉颜色产生了较为明显的影响,肌红蛋白会与等离子体产生的活性物质过氧化氢反应生成胆红蛋白或巯基肌红蛋白,从而导致低温等离子体处理过程中红度值的下降^[29];在贮藏中后期,CK 组和 EO 组的 a^* 值迅速降低,而 CP 组和 CP+EO 组能较好地保持肉色,且贮藏中后期的 CP+EO 组样品 a^* 值始终显著高于 CP 组 ($P<0.05$)。此外,CK 组 b^* 值在贮藏过程中呈现降低趋势,而 EO、CP 和 CP+EO 组 b^* 值在贮藏期内有先增加再降低的趋势。有文献指出, b^* 值出现此变化的原因可能是在低 pH 值状态下 Fe^{2+} 会加速向 Fe^{3+} 转化,一些配体(如 NO^- 、 N_3^- 、 Cl^-)可与 Fe^{3+} 结合,不同配体的结合产生不同颜色,中心铁原子失去产生电子的肌红蛋白后被氧化 (Fe^{3+}),铁血红蛋白 ($MbFe^{3+}$) 在 550 nm(黄色光谱区)的吸收峰减少,在视觉上与 b^* 值相关^[30],因此处理时间越长黄度值下降越明显^[31]。

2.5 CP+EO 处理对牛肉 pH 值的影响

pH 值可作为评价牛肉新鲜程度的重要参考指标,故进一步测定不同处理组牛肉在贮藏过程中的 pH 值变化^[32]。从图 4 中可知,在贮藏第 1 d,CK 组、EO 组、CP 组和 CP+EO 组牛肉的 pH 值分别为 5.45、5.43、5.44 和 5.39,CP+EO 组显著低于 CK 组 ($P<0.05$),有研究表明^[33],pH 值的降低归因于等离子体处理产生的酸性物质,如 NO_x 。此外,复合精油中肉桂酸等

表 3 CP 协同复合精油处理对贮藏期牛肉颜色的影响

Table 3 Effect of CP combined with essential oil blend on aberration of color of beef during storage

| 指标 | 处理组 | 贮藏时间(d) | | | | |
|-------|-------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 1 | 4 | 7 | 10 | 13 |
| L^* | CK | 37.71±0.24 ^b | 31.99±0.18 ^c | 29.46±0.15 ^c | 24.98±0.75 ^d | 27.00±0.31 ^c |
| | EO | 36.60±0.11 ^c | 35.40±0.23 ^a | 35.77±0.57 ^a | 27.96±0.26 ^c | 29.19±0.53 ^b |
| | CP | 39.00±0.64 ^a | 32.47±0.27 ^b | 35.09±0.08 ^{ab} | 31.84±0.47 ^b | 26.20±0.23 ^c |
| | CP+EO | 36.15±0.89 ^c | 35.50±0.14 ^a | 34.69±0.67 ^b | 37.38±0.08 ^a | 33.31±0.68 ^a |
| a^* | CK | 20.38±0.30 ^a | 18.83±0.31 ^a | 12.54±1.18 ^c | 6.13±0.91 ^c | 3.82±0.20 ^d |
| | EO | 20.65±0.49 ^a | 19.06±0.67 ^a | 18.07±1.06 ^a | 8.52±0.16 ^b | 8.41±0.48 ^c |
| | CP | 12.40±1.10 ^c | 12.85±0.55 ^c | 11.44±0.54 ^c | 8.03±0.48 ^b | 12.88±0.3 ^b |
| | CP+EO | 16.69±0.25 ^b | 17.32±0.13 ^b | 14.73±0.18 ^b | 16.65±0.21 ^a | 14.62±0.48 ^a |
| b^* | CK | 11.48±0.26 ^a | 10.87±0.24 ^a | 9.31±0.29 ^b | 5.58±0.43 ^d | 5.58±0.18 ^c |
| | EO | 10.63±0.16 ^b | 11.05±0.41 ^a | 12.15±0.12 ^a | 7.15±0.43 ^c | 5.50±0.43 ^c |
| | CP | 8.46±0.10 ^c | 9.11±0.13 ^b | 10.10±1.09 ^a | 8.67±0.21 ^b | 8.59±0.34 ^b |
| | CP+EO | 5.78±0.15 ^d | 10.68±0.49 ^a | 9.35±0.27 ^b | 10.57±0.29 ^a | 10.47±0.39 ^a |

注:每列中不同小写字母表示同一贮藏时间下不同处理组样品存在显著性差异 ($P<0.05$),表 4 同。

酸性物质对牛肉样品 pH 值也有一定影响。随着贮藏时间的延长,CK 组 pH 值明显上升,在第 4、7、10 和 13 d 分别增至 5.64、5.99、6.48 和 7.32,但 EO 组、CP 组和 CP+EO 组样品在贮藏末期仍保持在 5.67、5.65 和 5.53。这可能归因于微生物在牛肉贮藏过程中滋长,将肉中蛋白质分解成碱性含氮物质,导致 pH 值升高^[34]。

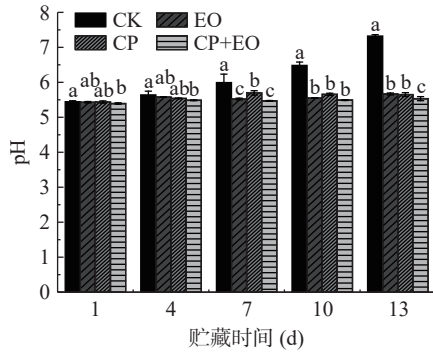


图 4 CP 协同复合精油处理对贮藏期内牛肉 pH 值的影响
Fig.4 Effect of CP combined with essential oil blend on pH value of beef during storage

2.6 CP+EO 处理对牛肉贮藏期内 TVB-N 含量的影响

在生鲜肉新鲜程度的评价指标中,TVB-N 是具有重要意义的指标之一,一般鲜肉中 TVB-N 含量小于 15 mg/100 g,介于 15~20 mg/100 g 则为次鲜肉,超过 20 mg/100 g 可判定为腐败变质肉,不可食用^[35]。由图 5 可知,随着贮藏时间的延长,各组 TVB-N 含量随之增加。在贮藏第 1 d,CK 组、EO 组、CP 组和 CP+EO 组 TVB-N 含量分别为 4.11、3.99、3.54 和 3.14 mg/100 g;在贮藏过程中,EO 组和 CP 组 TVB-N 含量始终显著低于 CK 组 ($P<0.05$),CP+EO 组 TVB-N 含量始终显著低于其他组 ($P<0.05$)。肉制品在贮藏过程中由于微生物的脱羧、脱氨基等作用,产生大量的游离氨基酸以及挥发性盐基氮等物质,从而导致腐败^[36],其整体变化与菌落总数呈现相同趋势。CP 和 EO 以及协同处理均可抑制牛肉中微生物的生长繁殖,抑制牛肉中 TVB-N 含量上升^[37]。CK 组、EO 组和 CP 组在贮藏第 10 d 时超过或即将达到国

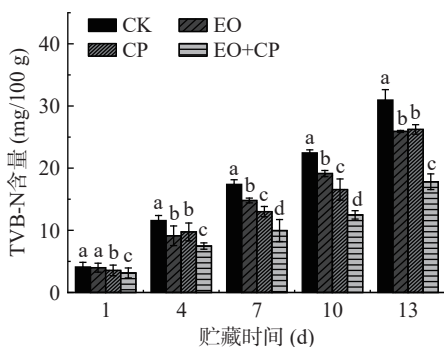


图 5 CP 协同复合精油处理对贮藏期内牛肉 TVB-N 含量的影响

Fig.5 Effect of CP combined with essential oil blends on TVB-N of beef during storage

家限定标准,CP+EO 组则在贮藏期第 13 d 仍未超过限量标准,与 CK 组相比货架期延长 6 d 以上。

2.7 CP+EO 处理对牛肉贮藏期内 TBARS 值的影响

脂质氧化是肉类食品酸败和风味变差的主要原因^[32],丙二醛(Malondialdehyde, MDA)是脂质氧化的主要二次产物,因此测定 TBARS 值评估 CP 处理协同复合精油对牛肉脂质氧化的影响。如图 6 所示,在贮藏第 1 d 时,CK 组、EO 组、CP 组和 CP+EO 组样品的 TBARS 值分别为 0.23、0.21、1.38 和 0.76 mg MDA/kg,在整个贮藏期间,所有组 TBARS 值均在积累增加。Ripoll 等^[38]提出 TBARS 值对腐败酸味的阈值在 2.5 mg/kg 以上,本研究中,EO 组始终未超过阈值,CP 组在贮藏第 7 d 时超过阈值,在贮藏前 10 d,CK 组 TBARS 值显著低于 CP+EO 组 ($P<0.05$),但在第 13 d,两组 TBARS 值分别达到 2.45 和 2.44 mg MDA/kg,无显著差异且均将达到腐败酸味阈值 ($P>0.05$)。此外,CP 组 TBARS 值始终显著高于其他组 ($P<0.05$),而 EO 组 TBARS 值始终显著低于其他组 ($P<0.05$),CP+EO 组相较于单纯 CP 处理组脂质氧化得到明显缓解,这表明 CP 处理会加速牛肉的脂质氧化,而精油的存在可促使脂质氧化现象减弱。Zhu 等^[39]在研究肉豆蔻精油和冷源氮气等离子体联合处理猪肉糜时发现,冷源氮气等离子体工艺会加速肉糜脂质氧化,二者协同作用后此现象得到显著改善,且同时发现肉豆蔻精油包封脂质体的抗氧化作用提高,表明精油可延缓脂质氧化,这与本研究结果一致。

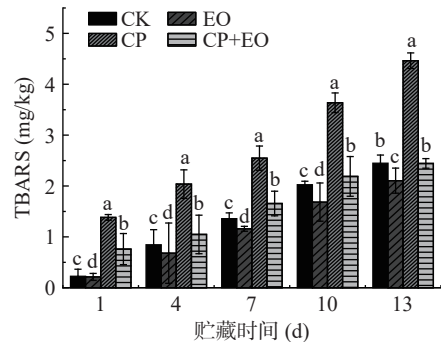


图 6 CP 协同复合精油处理对贮藏期内牛肉 TBARS 值的影响

Fig.6 Effect of CP combined with essential oil blends on TBARS of beef during storage

2.8 CP+EO 处理对牛肉质构特性的影响

从表 4 中可知,不同处理组牛肉的内聚性和弹性无显著差异 ($P>0.05$)。在肌肉硬度方面,CP 组牛肉硬度显著高于 EO 组 ($P<0.05$),但与 CK 组无显著差异 ($P>0.05$);此外 CP+EO 组与 CP 组硬度值也无显著差异 ($P>0.05$)。咀嚼性是指拒绝一个固体食物时从咀嚼开始到吞咽为止所做的功,其变化趋势与硬度值相似,因此等离子体处理会促使牛肉硬度增大,咀嚼性上升,但与 CK 组相比无显著变化 ($P>0.05$)。孙运金等^[40]发现当等离子体处理牛肉 120 s 后,牛

肉的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性没有显著变化,这可能与等离子体是表面处理有关,不会对牛肉内部结构产生显著影响。

表4 CP协同复合精油处理对贮藏期内牛肉质构的影响
Table 4 Effect of CP combined with essential oil blends on structure of beef during storage

| 处理组 | 硬度(N) | 内聚性 | 弹性(mm) | 咀嚼性(mJ) |
|-------|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| CK | 16.58±3.58 ^{bc} | 0.49±0.06 ^a | 2.13±0.07 ^a | 16.24±4.63 ^{ab} |
| EO | 15.15±0.23 ^c | 0.45±0.04 ^a | 1.94±0.38 ^a | 13.63±0.81 ^b |
| CP | 20.23±3.37 ^{ab} | 0.46±0.03 ^a | 2.06±0.15 ^a | 18.52±3.43 ^{ab} |
| CP+EO | 21.11±0.90 ^a | 0.49±0.05 ^a | 2.15±0.37 ^a | 20.98±3.57 ^a |

2.9 CP+EO 处理对牛肉气味的影响

电子鼻主要是利用其特殊的气体传感器对样品中的气体分子进行识别与分析,模拟人的嗅觉,定性分析测定食品的风味。图7为贮藏期第1d的气味分析图,其中图7A为电子鼻检测传感器数据雷达图,4组样品的W5S、W1S、W1W、W2S、W2W传感器响应值变化显著,分别对氮氧化物、甲烷类、无机硫化物、醇类和醛酮类以及有机硫化物敏感。其中W5S、W2S传感器响应值差异最明显,表明EO和CP+EO处理后氮氧化物和醇类、醛酮类物质增加。如图7B所示,第1和第2主成分贡献率分别为98.73%和1.16%,总贡献率达99.89%,涵盖了样品的大部分信息,可代表不同处理组牛肉样品的电子鼻整体信息。从覆盖区域看,CK组与CP处理组几近重叠,EO处理组与CP+EO处理组也有重叠,表明CP处理对牛肉样品气味变化影响不显著。而CK组与EO组和CP+EO组完全区分,表明精油的添加对牛肉的气味有显著影响。黄名正等^[41]研究发

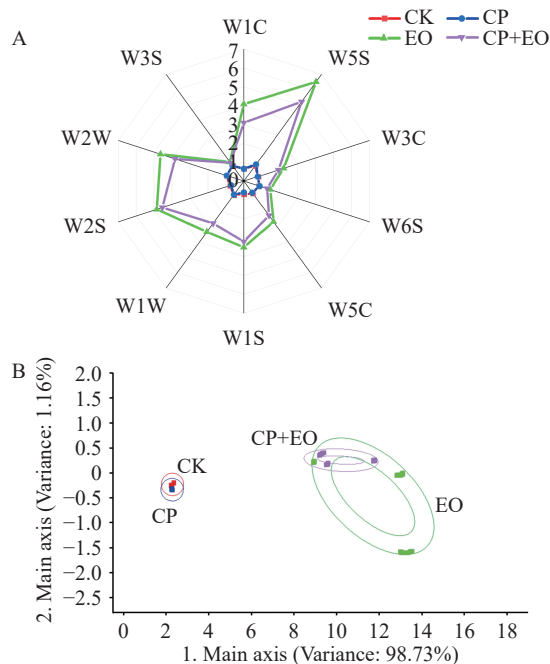


图7 不同处理组牛肉气味电子鼻PCA分析
Fig.7 PCA analysis of beef odor e-nose in different treatment groups

现,采用生姜精油对鸡肉进行保鲜时,未涂膜组和涂膜组样品气味有显著差异($P<0.05$),但涂膜处理更有利于贮藏期内鸡肉风味和口感的保持。综上CP协同复合精油处理对牛肉风味有一定影响,相关成分含量变化有待后续进一步研究。

2.10 CP+EO 处理对牛肉贮藏过程中感官品质的影响

由图8可知,在贮藏期第1d,CP处理和EO处理分别对牛肉色泽和气味评分造成一定影响,但总体各组间感官评分差异较小,各处理组牛肉能保持较好

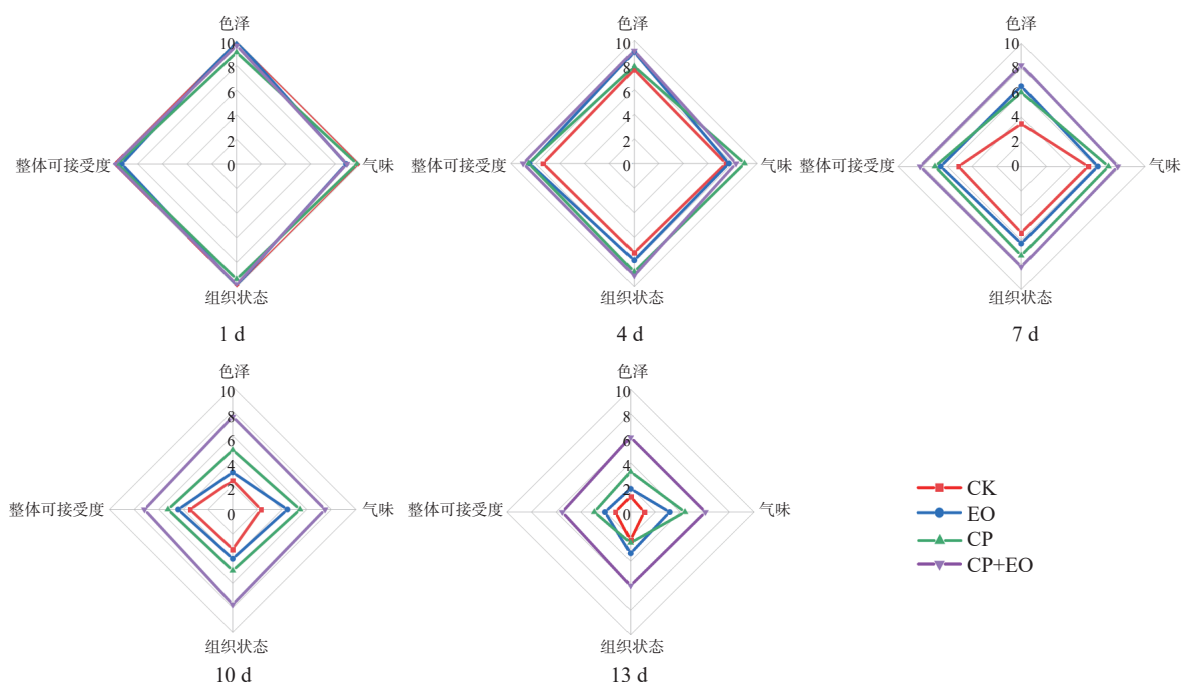


图8 不同处理对牛肉贮藏期间感官品质的影响

Fig.8 Effect of different treatments on the sensory quality of beef during storage

表 5 CP 协同复合精油处理牛肉品质指标的相关性

Table 5 Correlation of beef quality indexes in synergistic CP treatment with composite essential oils

| 指标 | 菌落总数 | a^* | pH | TVB-N | TBARS | 感官评价 | 硬度 | 内聚性 | 弹性 | 咀嚼性 |
|-------|------|-------|--------|---------|--------|----------|---------|--------|--------|---------|
| 菌落总数 | 1 | 0.203 | 0.658* | 0.816** | -0.441 | -0.900** | -0.581* | -0.085 | -0.072 | -0.538 |
| a^* | | 1 | 0.288 | 0.623* | 0.506 | -0.26 | 0.331 | 0.04 | 0.279 | 0.319 |
| pH | | | 1 | 0.650* | -0.085 | -0.549 | -0.442 | 0.174 | 0.064 | -0.363 |
| TVB-N | | | | 1 | 0.109 | -0.686* | -0.219 | -0.075 | -0.11 | -0.307 |
| TBARS | | | | | 1 | 0.597* | 0.727** | -0.123 | 0.059 | 0.418 |
| 感官评价 | | | | | | 1 | 0.555 | -0.128 | -0.001 | 0.325 |
| 硬度 | | | | | | | 1 | 0.096 | 0.285 | 0.832** |
| 内聚性 | | | | | | | | 1 | 0.175 | 0.259 |
| 弹性 | | | | | | | | | 1 | 0.214 |
| 咀嚼性 | | | | | | | | | | 1 |

注: *在0.05水平(双尾)显著相关;**在0.01水平(双尾)极显著相关。

的色泽及气味等感官品质。贮藏 4 d 后, CK 组感官品质下降严重, 其余组总体评分相近; 贮藏 7 d 后, CK 组牛肉表面产生明显菌斑, 气味刺鼻, 色泽严重变暗, 感官品质劣变明显, 已不被消费者接受, 而 EO 组和 CP 组整体品质相近, EO 组整体可接受度略低于 CP 组, CP+EO 组总体评价较高, 各项仍保持在 8 分以上。直至贮藏末期第 13 d, 除 CP+EO 组外, 各组整体接受度均降至 4 分以下, CP+EO 组各项评分仍保持在 6 分左右, 其色泽、气味、组织状态和整体可接受度均明显优于其他处理组, CK 组、EO 组和 CP 组均已腐败。结合微生物数量、TBARS 值、TVB-N 值和感官评价结果, 认为 CP+EO 处理可将牛肉货架期延长 6 d。

2.11 相关性分析

本研究通过计算相关系数评价两个变量之间的线性关系, 从而衡量两个因素的相关密切程度, 为等离子体协同复合精油处理在牛肉保鲜上的应用提供理论依据。从表 5 可知, TVB-N 含量与菌落总数呈极显著正相关($P < 0.01$), 相关性系数为 0.816, 与 pH 值呈显著正相关($P < 0.05$), 相关性系数为 0.650, 与感官评分呈显著负相关($P < 0.05$), 相关性系数为 -0.686; 挥发性盐基氮等物质是由于微生物在肉样表面大量生长繁殖, 分解蛋白质所产生的, 微生物的生长又严重影响样品的 pH 值与感官, 因此采用等离子体协同复合精油处理控制样品表面微生物对牛肉保鲜具有重要意义。

等离子体处理后样品 TBARS 值有明显增加, 同时发现咀嚼性和 TBARS 值与硬度值呈极显著正相关($P < 0.01$), 相关性系数分别为 0.832 和 0.727, 这表明 TBARS 值可能是导致牛肉变硬的原因之一, 因此复合精油的加入缓解了等离子体处理对牛肉脂质氧化, 也在一定程度上改善了牛肉的硬度和咀嚼性。

3 结论

复合精油协同 CP 处理具有显著抑菌效果, 且通过测定经 CP 处理后的复合精油总酚含量和 DPPH 自由基清除率发现 CP 处理并未对复合精油的抗氧化性能造成影响。协同处理可有效抑制牛肉

贮藏期间菌落总数的上升, 延长牛肉贮藏期 6 d, 在贮藏末期牛肉样品 TVB-N 含量由对照组的 30.97 mg/100 g 降低至 17.87 mg/100 g, 同时 pH 值始终维持在 5.6 左右。协同处理对 CP 处理造成的脂质氧化现象也有所改善, 且牛肉的质构及外观品质未发生明显变化, 保持较好的感官品质; 电子鼻结果表明, 复合精油的存在会促使牛肉气味发生变化, 后续将进一步优化 CP 处理参数和精油浓度, 以降低精油对风味带来的影响。

© The Author(s) 2024. 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] TURGIS M, HAN J, BORSA J, et al. Combined effect of natural essential oils, modified atmosphere packaging, and gamma radiation on the microbial growth on ground beef[J]. *Journal of Food Protection*, 2008, 71(6): 1237-1243.
- [2] 张雨霏. 冷鲜猪肉优势菌群分析及噬菌体防腐效果评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [ZHANG Y P. Analysis of dominant bacteria in chilled pork and evaluation of bacteriophage anti-septic effect[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.]
- [3] MORTAZAVI S M H, KAUR M, FARAHNAKY A, et al. The pathogenic and spoilage bacteria associated with red meat and application of different approaches of high CO₂ packaging to extend product shelf-life[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(12): 1733-1754.
- [4] LIAO X, LIU D, XIANG Q, et al. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review[J]. *Food Control*, 2017, 75: 83-91.
- [5] HUANG M, ZHANG M, BHANDARI B. Recent development in the application of alternative sterilization technologies to prepared dishes: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(7): 1188-1196.
- [6] DEL RIO D, STEWART A J, PELLEGRINI N. A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress[J]. *Nutrition, Metabolism, and Cardiovascular Diseases: NMCD*, 2005, 15(4): 316-328.
- [7] QIAN J, ZHAO Y, YAN L, et al. Improving the lipid oxidation of beef patties by plasma-modified essential oil/protein edible

- composite films[J]. *LWT*, 2022, 154: 112662.
- [8] GURURANI P, BHATNAGAR P, BISHT B, et al. Cold plasma technology: Advanced and sustainable approach for wastewater treatment[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(46): 65062–65082.
- [9] AFSHARI R, HOSSEINI H. Non-thermal plasma as a new food preservation method, its present and future prospect[J]. *Archives of Advances in Biosciences*, 2014, 5(1): 116–120.
- [10] JOSHI S G, COOPER M, YOST A, et al. Nonthermal dielectric-barrier discharge plasma-induced inactivation involves oxidative DNA damage and membrane lipid peroxidation in *Escherichia coli*[J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 2011, 55(3): 1053–1062.
- [11] MISRA N N, JO C. Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 64: 74–86.
- [12] CUI H, WU J, LI C, et al. Promoting anti-listeria activity of lemongrass oil on pork loin by cold nitrogen plasma assist[J]. *Journal of Food Safety*, 2017, 37(2): e12316.
- [13] 杜杰, 王银桂. 植物精油在肉类保藏中的应用[J]. *肉类工业*, 2016(3): 39–44. [DU J, WANG Y G. Application of plant essential oils in meat preservation[J]. *Meat Industry*, 2016(3): 39–44.]
- [14] 张鹏禹, 任小云, 肖作兵, 等. 植物精油在肉制品中的抑菌应用研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(2): 107–110. [ZHANG P Y, REN X Y, XIAO Z B, et al. Research progress on antibacterial application of plant essential oil in meat products[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(2): 107–110.]
- [15] CALO J R, CRANDALL P G, O'BRYAN C A, et al. Essential oils as antimicrobials in food systems—A review[J]. *Food Control*, 2015, 54: 111–119.
- [16] 杨柳, 张一, 王磊, 等. 香辛料精油复配抑菌效果研究[J]. *中国调味品*, 2016, 41(4): 57–60. [YANG L, ZHANG Y, WANG L, et al. Study on antibacterial effect of spice essential oil compound[J]. *China Condiment*, 2016, 41(4): 57–60.]
- [17] 钱婧, 王晨, 严文静, 等. 天然精油协同等离子体对盐水鸭杀菌保鲜及脂质氧化的调控[J]. *肉类研究*, 2022, 36(11): 23–28. [QIAN J, WANG C, YAN W J, et al. Regulation of natural essential oil synergistic plasma on sterilization and preservation and lipid oxidation of saltwater duck[J]. *Meat Research*, 2022, 36(11): 23–28.]
- [18] AHMED A F, ATTIA F A K, LIU Z, et al. Antioxidant activity and total phenolic content of essential oils and extracts of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) plants[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2019, 8(3): 299–305.
- [19] 万文侠, 曾林, 叶兆伟, 等. 不同生长时期迷迭香精油及抗氧化剂含量变化研究[J]. *信阳农林学院学报*, 2022, 32(2): 98–102. [WAN W X, ZENG L, YE Z W, et al. Changes in rosemary essential oil and antioxidant content at different growth stages[J]. *Journal of Xinyang Agriculture and Forestry University*, 2022, 32(2): 98–102.]
- [20] EL HACHLAFI N, BENKHAIRA N, AL-MIJALLI S H, et al. Phytochemical analysis and evaluation of antimicrobial, antioxidant, and antidiabetic activities of essential oils from Moroccan medicinal plants: *Mentha suaveolens*, *lavandula stoechas*, and *ammi visnaga*[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2023, 164: 114937.
- [21] 吴梦迪, 马海乐, 刘会敏. 不同模式超声波辅助低温腌制对牛肉品质的影响[J]. *食品与机械*, 2023, 39(9): 177–182, 233. [WU M D, MA H L, LIU H M. Effect of different modes of ultrasonic-assisted low-temperature curing on beef quality[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(9): 177–182, 233.]
- [22] 郭进, 孙学颖, 杜梅, 等. 不同腌牛肉加工产品中挥发性风味成分分析[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(12): 177–184. [GUO J, SUN X Y, DU M. Analysis of volatile flavor components in different veal processed products[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(12): 177–184.]
- [23] LIU Z, FAN W, XIE Q. Chemical composition, total phenolic content, and antioxidant activity of the essential oils extracted from the needle of ten *Pinus taxa*[J]. *Journal of Chemistry*, 2022, 2022: e7440906.
- [24] YOO J H, BAEK K H, HEO Y S, et al. Synergistic bactericidal effect of clove oil and encapsulated atmospheric pressure plasma against *Escherichia coli* O157: H7 and *Staphylococcus aureus* and its mechanism of action[J]. *Food Microbiology*, 2021, 93: 103611.
- [25] HEMMATI V, GARAVAND F, KHORSHIDIAN N, et al. Impact of cold atmospheric plasma on microbial safety, total phenolic and flavonoid contents, antioxidant activity, volatile compounds, surface morphology, and sensory quality of green tea powder[J]. *Food Bioscience*, 2021, 44: 101348.
- [26] ABDEL-NAEEM H H S, EBAID E M S M, KHALEL K H M, et al. Decontamination of chicken meat using dielectric barrier discharge cold plasma technology: The effect on microbial quality, physicochemical properties, topographical structure, and sensory attributes[J]. *LWT*, 2022, 165: 113739.
- [27] 王安然. 超声处理对牛肉品质的影响及机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018. [WANG A R. Effect and mechanism of ultrasonic treatment on beef quality[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.]
- [28] 明丹丹, 张一敏, 董鹏程, 等. 牛肉肉色的影响因素及其控制技术的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 284–291. [MING D D, ZHANG Y M, DONG P C, et al. Research progress on influencing factors of beef meat color and its control technology[J]. *Food Science*, 2020, 41(1): 284–291.]
- [29] WANG X, WANG Z, ZHUANG H, et al. Changes in color, myoglobin, and lipid oxidation in beef patties treated by dielectric barrier discharge cold plasma during storage[J]. *Meat Science*, 2021, 176: 108456.
- [30] BREWER S. Irradiation effects on meat color—A review[J]. *Meat Science*, 2004, 68(1): 1–17.
- [31] YONG H I, LEE S H, KIM S Y, et al. Color development, physicochemical properties, and microbiological safety of pork jerky processed with atmospheric pressure plasma[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 53: 78–84.
- [32] SUWANDY V, CARNE A, VAN DE VEN R, et al. Effect of pulsed electric field treatment on the eating and keeping qualities of cold-boned beef loins: Impact of initial pH and fibre orientation[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(6): 1355–1365.
- [33] XU H, ZHU Y, YU B, et al. Comparative analysis of helium and air surface micro-discharge plasma treatment on the microbial reduction and quality attributes of beef slices[J]. *Meat Science*, 2023, 204: 109259.
- [34] LUO J, XU W, LIU Q, et al. Dielectric barrier discharge cold plasma treatment of pork loin: Effects on muscle physicochemical properties and emulsifying properties of pork myofibrillar protein[J]. *LWT*, 2022, 162: 113484.
- [35] 章建浩, 乔维维, 黄明明, 等. 低温等离子体处理对牛肉品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(11): 194–199, 150. [ZHANG J H, QIAO W W, HUANG M M, et al. Effect of low temperature

plasma treatment on beef quality[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(11): 194-199,150.]

[36] 黄明明, 乔维维, 章建浩, 等. 低温等离子体冷杀菌对生鲜牛肉主要腐败菌及生物胺抑制效应研究[J]. *食品科学技术学报*, 2018, 36(4): 17-23. [HUANG M M, QIAO W W, ZHANG J H, et al. Study on the inhibitory effect of low-temperature plasma cold sterilization on the main spoilage bacteria and biogenic amines in fresh beef[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 36(4): 17-23.]

[37] 李欣欣, 李天宇, 赵子瑞, 等. 低温等离子体处理功率对酱牛肉贮藏品质的影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(5): 1934-1940. [LI X X, LI D Y, ZHAO Z R, et al. Effect of low temperature plasma treatment power on storage quality of sauce beef [J]. *Journal of Jilin University(Engineering Science)*, 2020, 50(5): 1934-1940.]

[38] RIPOLL G, ALCALDE M J, HORCADA A, et al. Suckling kid breed and slaughter weight discrimination using muscle colour

and visible reflectance[J]. *Meat Science*, 2011, 87(2): 151-156.

[39] ZHU Y, LI C, CUI H, et al. Plasma enhanced-nutmeg essential oil solid liposome treatment on the gelling and storage properties of pork meat batters[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 266: 109696.

[40] 孙运金, 仇俊, 翟国臻, 等. 等离子体处理对生鲜牛肉杀菌保鲜效果及营养品质的影响[J]. *印刷与数字媒体技术研究*, 2022(2): 122-131. [SUN Y J, QIU J, ZHAI G Z, et al. Effect of plasma treatment on sterilization and preservation effect and nutritional quality of fresh beef[J]. *Printing and Digital Media Technology Study*, 2022(2): 122-131.]

[41] 黄名正, 莫皓然, 李鑫, 等. 生姜精油-明胶涂膜对鸡肉贮藏期风味品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(14): 136-143. [HUANG M Z, MO H R, LI X, et al. Effect of ginger essential oil-gelatin coating on the flavor quality of chicken during storage[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(14): 136-143.]