李雪, 刘彩玲, 刘光宪, 等. 复合香辛料精油结合气调包装对三黄鸡冷藏期蛋白质氧化和挥发性风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 288−300. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040307

LI Xue, LIU Cailing, LIU Guangxian, et al. Effects of Compound Spice Essential Oil Combined with Modified Atmosphere Packaging on Protein Oxidation and Volatile Flavor Compounds in Sanhuang Chicken during Cold Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 288−300. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040307

· 包装与机械 ·

复合香辛料精油结合气调包装对三黄鸡冷藏期蛋白质氧化和挥发性风味物质的影响

李　雪, 刘彩玲, 刘光宪*, 王　丽, 董　博, 张　耀, 付冬文, 黄锦卿
（江西省农业科学院农产品加工研究所, 江西南昌 330200）

摘　要: 为探明复合香辛料精油（迷迭香精油和肉桂精油）结合气调包装处理（MEP）对三黄鸡冷藏过程中（4 ℃，1~10 d）肌原纤维蛋白氧化特性与挥发性风味物质的影响。以空气包装（CON）和气调包装（MAP）为参照，分析冷藏过程中（1~10 d）鸡胸肉肌原纤维蛋白羰基、巯基、表面疏水性和挥发性风味物质的变化。结果表明，随着冷藏时间的延长，3 种包装的肌原纤维蛋白羰基含量和表面疏水性均呈现逐渐上升趋势，巯基含量呈现逐渐降低趋势，冷藏第 10 d 时，MEP 组羰基含量较 CON 组和 MAP 组分别低 33.04% 和 22.82%，巯基含量下降率为 12.21%，显著低于 CON 组的 21.80%（P<0.05）。3 种不同包装的鸡胸肉在冷藏期间共鉴定出 71 种挥发性风味物质。其中，3-羟基-2-丁酮为 CON 组和 MAP 组冷藏中后期的关键腐败特征风味物质，二甲基三硫为 MEP 样品组的关键特征风味物质。相关性分析结果进一步证明 3-羟基-2-丁酮是鸡胸肉冷藏过程中肌原纤维蛋白氧化进程的潜在标志物。本研究结果可为禽肉储存过程中的质量控制提供理论支撑。

关键词: 三黄鸡, 复合香辛料精油, 气调包装, 蛋白质氧化, 挥发性风味物质
中图分类号: TS205.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0288−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040307
本文网刊:

Effects of Compound Spice Essential Oil Combined with Modified Atmosphere Packaging on Protein Oxidation and Volatile Flavor Compounds in Sanhuang Chicken during Cold Storage

LI Xue, LIU Cailing, LIU Guangxian*, WANG Li, DONG Bo, ZHANG Yao, FU Dongwen, HUANG Jinqing
(Institute of Agricultural Products Processing, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

Abstract: To investigate the effects of compound spice essential oils from rosemary and cinnamon combined with modified atmosphere packaging (MEP) on myofibrillar protein oxidation and volatile flavor compounds in Sanhuang chicken during refrigeration (4 ℃, 1~10 d). Air packaging (CON) and modified atmosphere packaging (MAP) were used as controls. Changes in carbonyl content, sulfhydryl content, surface hydrophobicity, and volatile flavor compounds in breast muscle myofibrillar proteins were analyzed during storage. The results showed that carbonyl content and surface hydrophobicity of myofibrillar proteins gradually increased, while sulfhydryl content decreased during refrigeration in all three packaging groups. On the 10th day of refrigeration, the carbonyl content in the MEP group was 33.04% and 22.82% lower than that in the CON and MAP groups, respectively. The reduction rate of sulfhydryl content in the MEP group was 12.21%, which was significantly lower than the 21.80% observed in the CON group (P<0.05). A total of 71 volatile flavor compounds were identified in chicken breast meat packaged in three different ways during refrigeration. Among them, 3-hydroxy-2-butanone

收稿日期: 2025−04−25
基金项目: 江西省农业科学院基础研究与人才培养项目（JXSNKYJCRC202618）; 江西省农业科学院基础研究与人才培养专项（JXSNKYJCRC202310）; 江西省重大科技研发专项“揭榜挂帅”项目（20213AAF02024）。
作者简介: 李雪（1991−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 畜禽加工与研究, E-mail: 1151433352@qq.com。
*** 通信作者:** 刘光宪（1982−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 畜禽加工与研究, E-mail: liugx178@163.com。

was the key flavor substance of chicken breast meat in CON and MAP, and dimethyl trisulfide was the key characteristic flavor substance of MEP sample group. Correlation analysis further confirmed that 3-hydroxy-2-butanone was a potential marker for myofibrillar protein oxidation process in chicken breast meat during refrigeration. These research findings can provide theoretical support for quality control during the storage of poultry meat.

Key words: Sanhuang chicken; compound spice essential oil; modified atmosphere packaging; protein oxidation; volatile flavor compounds

三黄鸡具有高蛋白质、低脂肪、风味浓郁和口感独特等优点，在我国南方地区深受消费者喜爱[1−2]。但三黄鸡宰后易变质，是腐败微生物的“天然培养基”，特别在储运过程中，鸡肉蛋白质易受到大量活性氧自由基的攻击，造成蛋白质氧化降解，从而造成肉品风味和食用品质的劣变[3]，这不仅影响肉品生产企业的经济效益，也对消费者的健康构成了潜在的威胁。针对这一问题，研究者们采用不同包装方式与天然抑菌剂相结合的手段来抑制肉品腐败变质，已逐渐成为国内外的研究热点[4−5]。

目前，肉品的包装方式主要有托盘包装、真空包装、气调包装和贴体包装等，其中气调包装（Modified atmosphere packaging，MAP）已经成为肉品领域重要的保鲜技术之一，主要通过改变食品包装内的气体组分（CO_2、N_2 和 O_2）来抑制微生物的生长，从而延长货架期。Cha 等[6] 研究了不同气体组分的气调包装对低温鸡肉品质特性的影响，发现 30% CO_2/70% N_2 的气体组分能有效抑制微生物的生长和维持产品品质。Yin 等[7] 探讨了自封袋密封包装、真空包装和 MAP 对贮藏过程中虹鳟鱼品质的影响，发现 MAP 可有效延缓虹鳟鱼蛋白质降解。

香辛料精油是一种具有抑菌、防腐和抗氧化功能的挥发性植物提取物，在肉品保鲜领域备受关注。其中，肉桂精油和迷迭香精油含有丰富的肉桂醛和萜烯类等生物活性化合物，具有广谱抗菌性和强抗氧化性，可有效抑制蛋白质氧化、自由基形成和肉品品质劣变[8]。因此，近些年研究人员尝试采用香辛料精油与 MAP 相结合的处理方式应用于肉品保鲜和病原微生物控制方面。余文志等[9] 的研究表明，固体精油保鲜剂结合 MAP 能有效抑制卤鸭脖常温贮藏期间的蛋白质和脂肪氧化，与空气包装相比，可延长货架期 4 d。Queiroga 等[10] 研究发现，大蒜精油和洋葱精油结合 MAP 能有效抑制虾的颜色变化和病原微生物的繁殖，在冷藏条件下可将保质期延长至 15 d 以上。但鲜有研究系统报道香辛料精油结合 MAP 处理对三黄鸡冷藏期间鸡胸肉肌原纤维蛋白氧化和挥发性风味物质的影响。

因此，本研究以三黄鸡鸡胸肉为研究对象，探究固载复合香辛料精油保鲜剂结合气调包装处理（MEP）对鸡胸肉冷藏期间肌原纤维蛋白氧化特性的影响，并采用气相色谱-离子迁移谱联用技术（Gas chromatography ion mobility spectroscopy，GC-IMS）分析不同包装处理的鸡胸肉在 4 ℃ 冷藏过程中挥发性风味物质的变化规律，筛选出不同包装的关键差异风味物质，再进一步探究关键差异风味物质与肌原纤维蛋白氧化之间的相关性，从而筛选出潜在腐败风味物质，为畜禽肉运输和储存过程中的质量控制提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

三黄鸡鸡胸肉　宁都鑫龙食品有限公司；磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、乙二胺四乙酸（EDTA）、氯化钠（NaCl）、5,5'-二硫代双（2-硝基苯甲酸）（DTNB）、溴酚蓝　北京索莱宝科技有限公司；纳米二氧化硅　江苏天行新材料有限公司；多孔淀粉　陕西博林生物技术有限公司；微晶纤维素　浙江一诺生物科技有限公司；迷迭香精油（食品级）、肉桂精油（食品级）　阿兰精油批发商城；蛋白质羰基含量测定试剂盒　南京建成生物工程研究所。

XL-80 旋转制粒机　常州市湘宏干燥制粒设备有限公司；JY260 气调锁鲜包装机　上海积亿机械有限公司；UV2800PC 紫外分光光度计　上海舍岩仪器有限公司；Flavour Spec® GC-IMS 仪　德国 G.A.S. 公司；MXT-WAX 色谱柱（15 m×0.53 mm×1.0 μm）　美国 Restek 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　保鲜剂的制备与样品处理　固载香辛料精油保鲜剂的制备：参照 Jiang 等[11] 的方法并稍作改动。分别将 35 g 多孔淀粉、20 g 纳米二氧化硅和 5 g 微晶纤维素混合均匀，逐滴加入 40 g 的 1∶1（w∶w）混合的肉桂精油和迷迭香精油，在室温下充分揉捏固化均匀，混匀过程中喷洒 10 g 蒸馏水。将混合后的物料倒入 16 目的旋转制粒机中，然后在 50 ℃ 烘箱中烘干 5 min，过 18 目筛，将所制备的固体保鲜剂以每包 3 g 的规格密封在无纺布袋（5 cm×7 cm）中，放入干燥器中备用。

样品处理：将集中屠宰分割的三黄鸡（120 日龄，大小均一）置于洁净的保鲜袋中，用放有冰袋的保温箱快速运至实验室。在无菌环境下用已消毒的手术刀具去除鸡胸肉表面的结缔组织和脂肪，并将其随机分成 3 组。所有样品均置于透明的 20 cm×14 cm×3.5 cm 聚丙烯盒内，用气调包装机和 PE-EVOH 薄膜（在 25 ℃ 和 0% 相对湿度下，氧气透过率为 15 $cm^3/m^2·d·atm$，二氧化碳渗透率为 64 $cm^3/m^2·d·atm$，水蒸气透过率为 16 $g/m^2·d$，厚度为 25 μm）密封。具体样



图 1 样品处理过程

Fig.1 Sample processing procedure

品处理过程如图 1 所示。空气包装组(CON)为盒内直接充入大气空气; 气调包装组(MAP)为盒内充入 70% N_2+30% CO_2; 气调保鲜剂组(MEP)为盒内充入 70% N_2+30% CO_2, 并放 3 g 固载香辛料精油保鲜剂。封口后的所有样品均置于 4 ℃ 下冷藏, 分别在第 1、3、5、7、10 d 取样。

1.2.2 肌原纤维蛋白提取 参照李可等[12] 的方法并稍作修改。取 5 g 鸡胸肉肉糜于 50 mL 离心管中, 加入预冷的 20 mL 10 mmol/L 磷酸盐缓冲溶液(含 0.1 mol/L NaCl, 1 mmol/L EDTA, pH7.0), 12000 r/min 匀浆 60 s, 5000 r/min 冷冻离心 10 min, 弃上清液, 重复 3 次。将沉淀分散在 20 mL 0.1 mol/L 的 NaCl 溶液中, 在上述条件下匀浆、冷冻离心, 重复 3 次, 最后一次用四层纱布过滤去除肌肉匀浆液中的结缔组织, 得到的滤浆即为肌原纤维蛋白。用 10 倍体积的 10 mmol/L 磷酸盐缓冲溶液(含 0.6 mol/L NaCl, pH7.0)溶解肌原纤维蛋白, 采用双缩脲法测定肌原纤维蛋白的质量浓度。

1.2.3 羰基含量的测定 羰基含量的测定使用蛋白质羰基含量测试盒, 按其说明书进行冷藏鸡胸肉肌原纤维蛋白羰基含量测定。

1.2.4 巯基含量的测定 参照 Jiang 等[13] 的方法并稍作修改。取 1 mL 2 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液于 4 mL 50 mmol/L 磷酸盐缓冲溶液(0.6 mol/L NaCl、4 mmol/L EDTA、8 mmol/L 尿素, pH8.0)中, 混合均匀后再加入 50 μL 4 mg/mL 的 Ellman's 试剂(40 mg DTNB 溶于 10 mL 50 mmol/L 磷酸盐缓冲溶液, pH8.0), 37 ℃ 反应 15 min 后在 412 nm 波长处测定吸光值。肌原纤维蛋白的巯基含量按公式(1)计算。

$$\text{巯基含量}(\mu\text{mol/g}) = 73.5 \times \frac{A \times D}{C} \qquad \text{式（1）}$$

式中: A 为吸光度, C 为样品浓度(mg/mL), D 为稀释倍数。

1.2.5 表面疏水性的测定 参照 Lu 等[14] 的方法并进行微调。取 1 mL、2 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液, 加入 40 μL、1 mg/mL 溴酚蓝溶液, 混匀, 在室温下避光反应 15 min。反应结束后 5000 r/min 离心 15 min, 取上清稀释 4 倍在 595 nm 处测定吸光度(A_1)。空白用 1 mL 10 mmol/L 的磷酸盐缓冲溶液(pH7.0)代替肌原纤维蛋白溶液(A_0)。肌原纤维蛋白的表面疏水性以溴酚蓝结合量表示, 按式(2)计算:

$$\text{结合态溴酚蓝}(\mu\text{g}) = 40 \times \frac{A_0 - A_1}{A_0} \qquad \text{式（2）}$$

1.2.6 挥发性风味物质的测定 采用 FlavourSpec® GC-IMS 仪对 3 种不同包装冷藏时间为第 1、5、10 d 的鸡胸肉样品进行挥发性风味物质的测定。参数设置参考刘彩玲等[15] 的方法并稍作修改。顶空进样单元: 准确取 3.00 g 绞碎的鸡胸肉样品置于 20 mL 顶空瓶中, 每个样品重复 3 次, 孵育温度 60 ℃, 孵育时间 15 min, 进样针温度 65 ℃, 进样体积 0.5 mL, 孵化转速 500 r/min。GC 条件: 色谱柱为 MXT-WAX 柱(15 m×0.53 mm×1 μm), 柱温 40 ℃, 载气 N_2(纯度≥99.999%)。载气初始流速 2 mL/min, 保持 2 min, 2~10 min 流速为 10 mL/min, 10~30 min 流速为 100 mL/min。IMS 检测条件: 漂移气 N_2(纯度≥99.999%), 流速 150 mL/min, 分析时间 30 min, 漂移管长度 98 mm, 温度 45 ℃, 管内线性电压 500 V/cm。

定性定量分析: 采用 VOCal 软件中内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库对 3 种不同包装的鸡胸肉样品的挥发性化合物进行定性, 采用峰体积归一化法进行定量。

1.2.7 关键挥发性风味物质评价 采用相对气味活度值法(Relative odor activity value, ROAV)对鸡胸肉样品的关键挥发性风味物质进行评价[16]。设定对鸡胸肉风味贡献度最大化合物的 ROAV 为 100, 其他化合物的 ROAV 按如下公式计算:

$$\text{ROVA}_i = \frac{T_{stan}}{C_{stan}} \times \frac{C_i}{T_i} \times 100 \qquad \text{式（3）}$$

式中: C_i 和 T_i 分别为各挥发性风味物质的相对含量(%)和对应的感觉阈值(μg/kg); C_{stan} 和 T_{stan} 分别表示在鸡胸肉冷藏过程中对整体风味贡献度最大化合物的相对含量(%)和对应的感觉阈值(μg/kg)。

1.3 数据处理

所有实验重复 3 次, 结果以平均值±标准差表示。通过 IBM SPSS Statistics 24.0 软件中的单因素方差分析法(ANOVA)和 Duncan 检验对样品进行显著性分析(P<0.05 表示差异显著)。采用 SIMCA 14.1 对挥发性风味物质进行 OPLS-DA 分析, 利用 Origin 2021 软件绘制柱形图和相关性分析图。

2 结果与分析

2.1 羰基分析

鸡胸肉在冷藏过程中, 其肌原纤维蛋白分子易受到活性氧自由基的攻击, 导致蛋白质分子中的氨基酸残基转化为羰基, 因此羰基含量通常用来评估蛋白

质氧化程度[17]。3 种不同包装方式对鸡胸肉冷藏过程中肌原纤维蛋白羰基含量的影响如图 2 所示，从图中可以看出，随着冷藏时间的延长，CON 组、MAP 组和 MEP 组的肌原纤维蛋白羰基含量均呈现逐渐上升趋势，这表明鸡胸肉在 3 种不同冷藏环境下均发生了蛋白氧化，肌原纤维蛋白内部的氨基酸暴露，被活性氧自由基攻击，发生氧化脱酰胺反应，从而使羰基含量逐渐增加[13]。此外，从图 2 中还可看出，在鸡胸肉冷藏至第 10 d 时，MEP 组的羰基含量显著低于 CON 组和 MAP 组，分别低 33.04% 和 22.82%（P<0.05）。这表明固载香辛料精油保鲜剂协同气调包装能显著抑制冷藏过程中鸡胸肉肌原纤维蛋白羰基的生成。一方面可能是由于 MEP 组中的低氧环境（70% N_2+30% CO_2）减少了鸡胸肉与空气中 O_2 的接触，抑制了鸡肉中的脂质氧化，从而减少了活性氧自由基的生成，降低了活性氧自由基对鸡胸肉中肌原纤维蛋白分子的攻击[18−19]。另一方面，在固载精油保鲜剂中，肉桂精油中的主要挥发性成分肉桂醛和迷迭香精油中的主要挥发性成分丁香酚、β-蒎品烯、桉树醇等萜烯类化合物能有效阻断氧化链式反应，清除 MEP 组中的氧活性自由基，抑制蛋白质分子中的氨基酸残基转化为羰基，从而减少了鸡胸肉中肌原纤维蛋白的氧化劣变[20]。

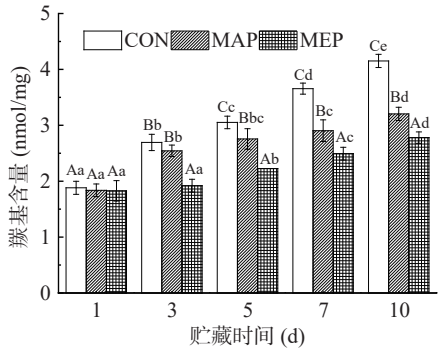


图 2　香辛料精油结合气调包装对肌原纤维蛋白羰基含量的影响

Fig.2　Effect of spice essential oils combined with modified atmosphere packaging on the carbonyl content of myofibrillar protein

注：不同小写字母表示不同冷藏时间差异显著，不同大写字母表示相同冷藏时间不同包装差异显著（P<0.05），图 3~图 4 同。

2.2　巯基分析

鸡胸肉肌原纤维蛋白含有丰富的巯基，在受到羟基自由基和脂质氧化产物的攻击后，易转化为分子间或分子内的二硫键，导致冷藏过程中鸡胸肉中的巯基含量流失。因此，通过测定肌原纤维蛋白的巯基含量可以反映鸡胸肉储藏过程中蛋白质的氧化程度[21−22]。冷藏过程中，香辛料精油结合气调包装对鸡胸肉巯基含量的影响如图 3 所示。从图 3 可知，随着冷藏时间的延长，3 种储藏方式下的鸡胸肉肌原纤维蛋白的巯基含量均呈现下降趋势。这与猪肉冷藏期间巯基含量呈下降趋势的结果一致[23]。这说明三黄鸡中的

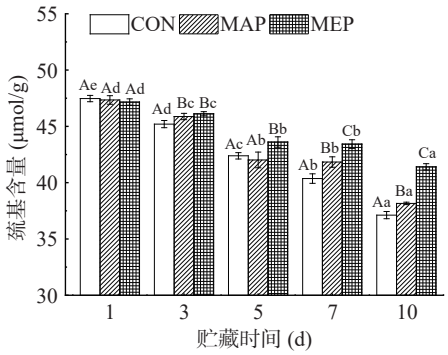


图 3　香辛料精油结合气调包装对肌原纤维蛋白巯基含量的影响

Fig.3　Effect of spice essential oils combined with modified atmosphere packaging on the sulfhdryl content of myofibrillar protein

蛋白质氧化程度随时间的延长而逐渐增加，本实验的羰基测量结果与之一致。在整个冷藏过程中，CON 组的巯基含量由 47.47 μmol/g 显著下降至 37.12 μmol/g，下降了 21.80%，而 MEP 组的巯基含量下降缓慢，由冷藏初期的 47.16 μmol/g 缓慢下降至冷藏末期的 41.41 μmol/g，下降了 12.21%。这说明 CON 处理的蛋白质氧化程度远大于 MEP 组，这可能是由于随着储藏时间的延长，空气包装中蛋白质分子内部的巯基大量暴露，被氧化为二硫键[24]。另一方面也说明固载香辛料保鲜剂中挥发出的肉桂精油和迷迭香精油能有效减缓鸡胸肉肌原纤维蛋白的氧化，这可能与肉桂精油中的主要抑菌物质肉桂醛[25] 以及迷迭香精油中的酚二萜等物质[26] 有关，这些活性物质与肌原纤维蛋白中的巯基相互竞争捕获活性氧自由基，从而对巯基的氧化起到了抑制作用[27]。此外，MEP 处理组中的气体环境能减少鸡胸肉中脂质氧化产物对肌原纤维蛋白质中含硫氨基酸（如肌球蛋白）的攻击，从而抑制了肌原纤维蛋白巯基的氧化[28]。

2.3　表面疏水性分析

溴酚蓝是一种常用的疏水性探针，可与蛋白质表面的疏水性氨基酸残基特异性结合，因此通过测定溴酚蓝与肌原纤维蛋白的结合程度来确定蛋白质表面疏水性强弱[29]。表面疏水性越高，蛋白质氧化变性程度越大。图 4 是香辛料精油结合气调包装对鸡胸肉肌原纤维蛋白表面疏水性含量的影响。由图 4 可知，在整个冷藏过程中，所有样品的表面疏水性均随冷藏时间的延长而逐渐升高，在鱼肉和猪肉的冷藏保鲜过程中也发现了类似的现象[30−31]。这种现象可能是由于在储藏初期，鸡胸肉中的疏水性氨基酸基团埋藏于蛋白质分子内部，而随着冷藏时间的延长，鸡胸肉中腐败微生物的滋生和内源酶的生成，使得肌原纤维蛋白的空间结构改变，导致原本藏于蛋白质分子内部的疏水性氨基酸（如色氨酸和苯丙氨酸）逐渐暴露至蛋白质分子表面，导致表面疏水性增加[32]。在整个冷藏过程中，CON、MAP 和 MEP 三个处理组的增长速率分别为 51.38%、34.46% 和 22.98%，MEP 处

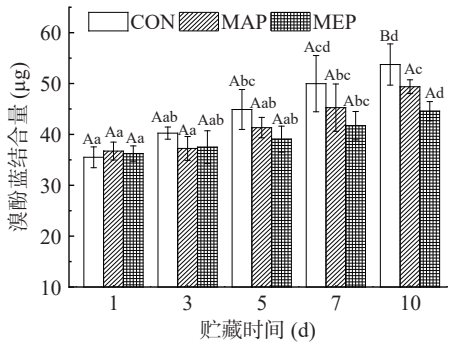


图 4　香辛料精油结合气调包装对肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

Fig.4　Effect of spice essential oils combined with modified atmosphere packaging on the surface hydrophobicity of myofibrillar protein

理组的表面疏水性增长速率最低。这说明 MAP 处理和 MAP 结合香辛料精油处理均可减少疏水性氨基酸残基的暴露，抑制三黄鸡鸡胸肉表面疏水性的增加，从而不同程度地减少了鸡胸肉中蛋白质的氧化变性。其中，气调包装处理能有效抑制鸡肉样品中的微生物活动和减少样品与氧气的接触，肉桂精油和迷迭香精油能有效清除自由基和螯合金属离子，从而减少了巯基和羰基的氧化，使冷藏过程中肌原纤维蛋白质的三维结构维持稳定，减少疏水性氨基酸的暴露。本实验结果与上述巯基和羰基的数据均印证肌原纤维蛋白在鸡胸肉冷藏过程中发生了氧化劣变，且 MEP 处理组的肌原纤维蛋白氧化速率显著低于 CON 组和 MAP 组。因此，气调包装与固载精油保鲜剂协同作用可有效实现蛋白质氧化的高效抑制。

2.4　GC-IMS 测定结果分析

2.4.1　指纹图谱分析　为了准确辨别样品间挥发性化合物的差异，通过 GC-IMS 系统内置的 Gallery Plot 插件绘制 3 种不同包装方式的鸡胸肉在 4 ℃ 冷藏过程中挥发性风味物质指纹图谱。在指纹图谱中，信号峰的亮度与对应化合物的含量呈正相关，颜色由蓝色到红色表示化合物含量由低到高[33]。如图 5 所示，共检测到 71 种挥发性风味物质。且不同包装和不同冷藏时间的鸡胸肉样品中挥发性风味物质的含量均发生了显著变化。随着冷藏时间的增加，与冷藏第 1 d 相比，3 种包装中的鸡胸肉挥发性风味化合物含量和种类均增多，这与赵志平等[34] 的研究一致。这主要与鸡胸肉冷藏过程中蛋白质、脂肪和还原糖等风味前体物质的氧化降解有关。图 5 中的 A 区域显示了所有样品共有的挥发性风味化合物，主要包括二烯丙基硫醚、乙酸乙酯(M)、2-丁酮、丁醛和乙酸(M)。B 区域为空气包装冷藏末期(第 10 d)的鸡胸肉中相对含量较高的风味化合物，主要包括 2-戊酮(M)、2-庚酮(D)、甲酸乙酯、2-甲基吡嗪和 4-甲基-1-戊醇等。气调包装组中的 MAP10 与 MAP5 和 MAP1 的差异化合物主要分布在 C 区域，包括 3-羟基-2-丁酮、2-甲基丙醛、(Z)-4-庚烯醛和羟基丙酮等。D 区域为 MEP5 样品含量较高的化合物，主要包括 α-蒎烯、2-辛醇(M)和己酸丁酯等 9 种风味物质。E 区域为 MEP10 样品含量较高的化合物，主要包括 2-庚醇、(E)-2-己烯-1-醇、2,6-二甲氧基苯酚等 24 种风味物质。

2.4.2　挥发性风味物质定性与定量分析　采用保留时间和离子迁移时间对挥发性风味物质进行定性分析，利用 GC-IMS 系统峰体积归一法进行定量分析。3 种不同包装的冷鲜鸡胸肉在冷藏过程中挥发性风味物质变化和相对含量结果如表 1 所示，共鉴

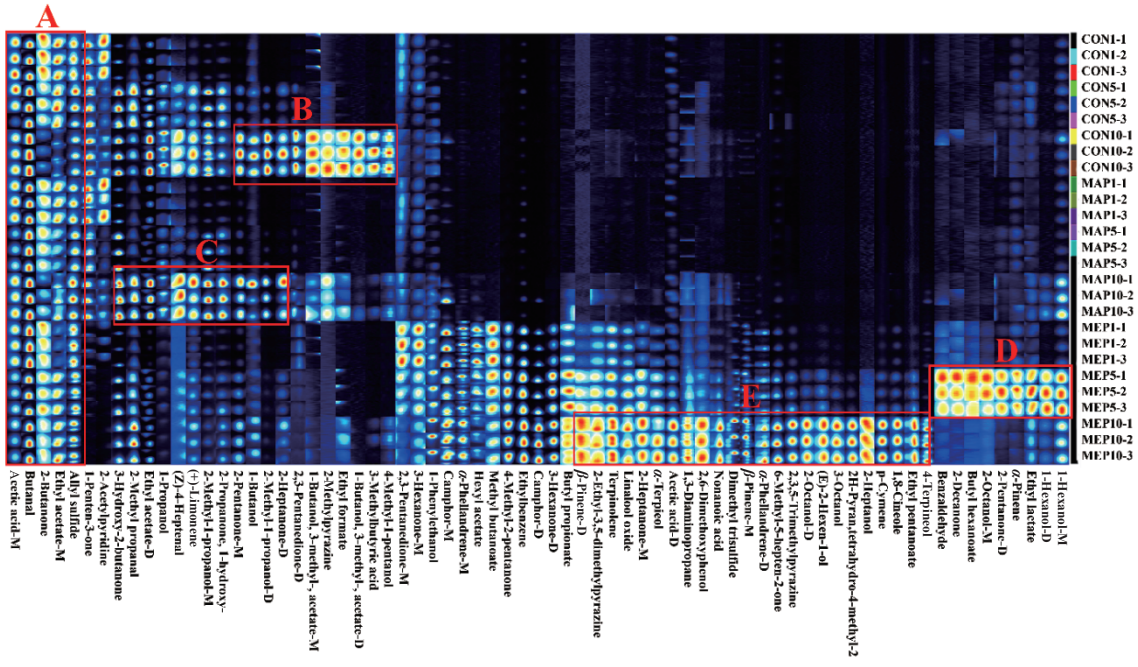


图 5　鸡胸肉冷藏过程中挥发性风味物质指纹图谱

Fig.5　Fingerprint profiles of volatile flavor compounds in chicken breast meat during refrigeration

表 1　鸡胸肉冷藏过程中挥发性风味物质鉴定结果

Table 1　Identification results of volatile flavor compounds in chicken breast meat during refrigeration

类别	编号	化合物中文名	化合物英文名	CAS号	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	相对含量(%)								
								CON1	CON5	CON10	MAP1	MAP5	MAP10	MEP1	MEP5	MEP10
								27.19±1.04^{g}	23.66±0.67^{f}	20.78±2.21^{e}	29.44±1.11^{h}	27.97±1.13^{gh}	18.87±1.53^{d}	17.15±0.21^{c}	9.78±0.69^{b}	5.68±2.23^{a}
醛类	1	苯甲醛	Benzaldehyde	100-52-7	1510.9	1133.616	1.46916	0.34±0.03^{a}	0.26±0.03^{a}	0.31±0.19^{a}	0.32±0.01^{b}	0.35±0.03^{b}	0.22±0.06^{a}	0.55±0.02^{b}	0.95±0.11^{c}	0.09±0.01^{a}
	2	(Z)-4-庚烯醛	(*Z*)-4-Heptenal	6728-31-0	1217.2	534.948	1.61908	0.42±0.01^{a}	0.82±0.04^{b}	1.45±0.02^{c}	0.46±0.02^{a}	0.68±0.05^{b}	1.28±0.17^{c}	0.10±0.01^{a}	0.17±0.01^{b}	0.09±0.01^{a}
	3	丁醛	Butanal	123-72-8	860.5	242.865	1.11616	24.94±0.92^{b}	18.39±0.68^{a}	17.67±0.53^{a}	27.38±0.92^{b}	25.70±0.82^{b}	14.65±1.45^{a}	15.70±0.23^{c}	7.39±0.47^{b}	4.59±0.05^{a}
	4	2-甲基丙醛	2-Methyl propanal	78-84-2	809.3	224.086	1.08719	1.49±0.14^{a}	4.19±0.05^{b}	1.36±0.18^{a}	1.27±0.22^{a}	1.23±0.36^{a}	2.71±0.23^{b}	0.80±0.07^{a}	1.27±0.12^{b}	0.92±0.15^{a}
								9.93±0.74^{c}	10.19±0.29^{c}	15.19±2.73^{e}	8.71±0.13^{b}	10.55±1.24^{c}	12.26±0.54^{d}	6.14±0.09^{a}	8.62±0.14^{b}	18.82±5.58^{f}
醇类	5	4-萜烯醇	4-Terpineol	562-74-3	1600.7	1407.038	1.21686	3.28±0.97^{b}	1.86±0.28^{a}	1.59±0.13^{a}	2.22±0.24^{a}	2.32±0.31^{a}	1.93±1.07^{a}	2.43±0.12^{b}	1.82±0.06^{a}	10.73±0.36^{c}
	6	3-辛醇	3-Octanol	589-98-0	1433.5	940.818	1.78116	0.24±0.03^{a}	0.30±0.06^{a}	0.24±0.06^{a}	0.25±0.02^{b}	0.36±0.05^{c}	0.13±0.00^{a}	0.18±0.00^{a}	0.49±0.06^{b}	1.21±0.03^{c}
	7	(E)-2-己烯-1-醇	(E)-2-Hexen-1-ol	928-95-0	1433.5	940.846	1.83194	0.21±0.03^{b}	0.19±0.02^{ab}	0.16±0.02^{a}	0.22±0.02^{b}	0.27±0.03^{c}	0.10±0.01^{a}	0.16±0.01^{a}	0.50±0.03^{b}	0.92±0.02^{c}
	8	2-辛醇(D)	2-Octanol-D	123-96-6	1409.9	888.937	1.77707	1.02±0.07^{c}	0.84±0.07^{b}	0.66±0.07^{a}	1.09±0.02^{b}	1.20±0.04^{b}	0.50±0.08^{a}	0.54±0.03^{a}	0.71±0.06^{b}	1.98±0.09^{a}
	9	2-辛醇(M)	2-Octanol-M	123-96-6	1410.7	890.649	1.44065	0.06±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}	0.07±0.01^{b}	0.09±0.00^{c}	0.03±0.00^{a}	0.06±0.00^{a}	0.25±0.06^{b}	0.03±0.00^{a}
	10	正己醇(D)	1-Hexanol-D	111-27-3	1368.2	804.036	1.6431	0.07±0.01^{a}	0.09±0.03^{a}	0.07±0.02^{a}	0.08±0.02^{a}	0.09±0.01^{a}	0.21±0.08^{b}	0.04±0.01^{a}	0.49±0.04^{b}	0.08±0.01^{a}
	11	正己醇(M)	1-Hexanol-M	111-27-3	1368.4	804.493	1.32767	0.76±0.03^{a}	0.49±0.21^{a}	0.61±0.22^{a}	0.73±0.01^{a}	0.53±0.08^{a}	1.38±0.29^{b}	0.40±0.00^{a}	1.54±0.05^{b}	0.44±0.01^{a}
	12	2-庚醇	2-Heptanol	543-49-7	1319.3	714.799	1.72899	0.12±0.01^{b}	0.10±0.02^{ab}	0.08±0.01^{a}	0.12±0.00^{b}	0.15±0.00^{c}	0.06±0.01^{a}	0.05±0.00a	0.09±0.01^{b}	0.26±0.01^{c}
	13	*α*-松油醇	*α*-Terpieol	10482-56-1	1209.8	523.174	1.78748	0.25±0.05^{a}	0.25±0.05^{a}	0.19±0.05^{a}	0.22±0.00^{a}	0.27±0.03^{a}	0.18±0.09^{a}	0.67±0.02^{a}	0.95±0.06^{b}	0.84±0.17^{a}
	14	1,8-桉叶油醇	1,8-Cineole	470-82-6	1181.1	480.728	1.72029	0.22±0.02^{b}	0.19±0.03^{ab}	0.16±0.02^{a}	0.20±0.02^{b}	0.28±0.03^{c}	0.15±0.01^{a}	0.39±0.03^{a}	0.60±0.06^{b}	1.61±0.07^{c}
	15	正丁醇	1-Butanol	71-36-3	1175.2	472.678	1.18589	0.80±0.06^{b}	0.62±0.08^{a}	1.32±0.11^{c}	0.54±0.05^{a}	0.47±0.01^{a}	0.83±0.53^{a}	0.31±0.02^{b}	0.24±0.01^{a}	0.26±0.00^{a}
	16	2-甲基丙醇(D)	2-Methyl-1-propanol-D	78-83-1	1105.6	386.693	1.36658	0.18±0.02^{a}	0.66±0.17^{b}	3.85±0.13^{c}	0.14±0.01^{a}	0.43±0.14^{b}	1.63±0.20^{c}	0.11±0.02^{a}	0.20±0.02^{b}	0.11±0.02^{a}
	17	2-甲基丙醇(M)	2-Methyl-1-propanol-M	78-83-1	1107.1	388.425	1.17172	0.61±0.05^{a}	2.66±0.17^{b}	3.31±0.18^{c}	0.65±0.04^{a}	2.21±0.58^{b}	2.93±0.26^{b}	0.39±0.02^{b}	0.48±0.03^{c}	0.23±0.02^{a}
	18	氧化芳樟醇	Linalool oxide	1365-19-1	1074.5	358.576	1.26051	0.08±0.01^{a}	0.07±0.01^{a}	0.29±0.26^{a}	0.08±0.01^{a}	0.08±0.00^{a}	0.71±0.85^{a}	0.06±0.00^{b}	0.04±0.00^{a}	0.05±0.00^{b}
	19	1-丙醇	1-Propanol	71-23-8	1048.1	337.759	1.11067	2.01±0.15^{a}	1.82±0.04a	2.37±0.16^{b}	2.09±0.12^{a}	1.77±0.30^{a}	1.41±0.52^{a}	0.36±0.02^{c}	0.21±0.03^{b}	0.06±0.00^{a}
	20	4-甲基-1-戊醇	4-Methyl-1-pentanol	626-89-1	830.9	231.835	1.32246	0.02±0.00^{a}	0.02±0.00a	0.24±0.03^{b}	0.02±0.00^{a}	0.02±0.00^{a}	0.08±0.04^{b}	0.01±0.00^{a}	0.01±0.00^{a}	0.02±0.01^{b}
								7.83±0.14^{c}	10.5±1.42^{d}	14.14±1.1^{e}	7.36±0.17^{c}	6.76±0.40^{c}	10.85±1.35^{d}	2.49±0.12^{a}	4.43±0.15^{b}	2.83±0.93^{b}
酯类	21	己酸丁酯	Butyl hexanoate	626-82-4	1433.7	941.441	1.45954	0.06±0.01^{a}	0.05±0.01^{ab}	0.03±0.01^{a}	0.06±0.01^{b}	0.06±0.01^{b}	0.03±0.00^{a}	0.05±0.00^{b}	0.13±0.02^{c}	0.02±0.00^{a}
	22	乙酸己酯	Hexyl acetate	142-92-7	1269	624.359	1.41563	0.75±0.04^{a}	0.79±0.67^{a}	0.49±0.02^{a}	0.82±0.08^{b}	1.75±0.17^{c}	0.29±0.05^{a}	0.22±0.01^{c}	0.11±0.02^{b}	0.02±0.00^{a}
	23	丙酸丁酯	Butyl propionate	590-01-2	1165.6	459.761	1.28562	0.13±0.01^{b}	0.08±0.00^{a}	0.08±0.00^{a}	0.10±0.01^{a}	0.11±0.00^{a}	0.25±0.20^{a}	0.41±0.02^{b}	0.51±0.02^{c}	0.25±0.03^{a}

续表 1

类别	编号	化合物中文名	化合物英文名	CAS号	保留指数	保留时间（s）	迁移时间（ms）	相对含量(%)								
								CON1	CON5	CON10	MAP1	MAP5	MAP10	MEP1	MEP5	MEP10
	24	戊酸乙酯	Ethyl pentanoate	539-82-2	1123	406.599	1.68702	0.49±0.02^{b}	0.38±0.04^{a}	0.38±0.01^{a}	0.49±0.04^{b}	0.49±0.06^{b}	0.22±0.02^{a}	0.29±0.03^{a}	0.58±0.02^{b}	0.95±0.02^{c}
	25	3-甲基-1-丁醇乙酸酯(D)	1-Butanol,3-methyl-, acetate-D	123-92-2	1128.6	413.244	1.74382	0.06±0.02^{a}	0.05±0.00^{a}	0.61±0.01^{b}	0.05±0.01^{a}	0.07±0.01^{a}	0.08±0.05^{a}	0.03±0.00^{b}	0.03±0.00^{a}	0.01±0.00^{a}
	26	3-甲基-1-丁醇乙酸酯(M)	1-Butanol,3-methyl-, acetate-M	123-92-2	1129.5	414.323	1.30476	0.30±0.05^{b}	0.09±0.01^{a}	0.73±0.05^{c}	0.13±0.02^{a}	0.10±0.00a	0.33±0.13^{b}	0.10±0.02^{b}	0.05±0.00^{a}	0.03±0.01^{a}
	27	丁酸甲酯	Methyl butanoate	623-42-7	1021.5	317.984	1.45198	0.04±0.01^{b}	0.04±0.00^{a}	0.02±0.00^{a}	0.03±0.00^{a}	0.05±0.01^{b}	0.02±0.01^{a}	0.42±0.01^{c}	0.25±0.03^{b}	0.10±0.01^{a}
	28	乙酸乙酯(D)	Ethyl acetate-D	141-78-6	903.4	259.812	1.33473	4.28±0.16^{a}	7.79±0.72^{b}	11.08±0.14^{c}	4.12±0.11^{a}	3.12±0.21^{a}	8.84±1.34^{b}	0.50±0.06^{a}	1.94±0.11^{c}	1.12±0.05^{b}
	29	乙酸乙酯(M)	Ethyl acetate-M	141-78-6	893.7	255.865	1.09562	1.50±0.05^{c}	1.02±0.15^{b}	0.33±0.05^{a}	1.36±0.01^{c}	0.86±0.06^{b}	0.56±0.17^{a}	0.31±0.02^{b}	0.41±0.02^{c}	0.21±0.02^{a}
	30	甲酸乙酯	Ethyl formate	109-94-4	826.5	230.219	1.21898	0.02±0.00^{a}	0.02±0.00a	0.29±0.02^{b}	0.02±0.00^{a}	0.04±0.01^{a}	0.09±0.07^{a}	0.01±0.00^{a}	0.03±0.00^{b}	0.03±0.01^{b}
	31	乳酸乙酯	Ethyl lactate	97-64-3	825	229.696	1.13919	0.19±0.01^{b}	0.19±0.02^{b}	0.10±0.00^{a}	0.16±0.06^{a}	0.11±0.02^{a}	0.14±0.01^{a}	0.15±0.02^{b}	0.4±0.03c	0.08±0.01^{a}
								21.49±1.02^{a}	36.91±0.45^{c}	33.12±2.11^{b}	23.37±1.51^{a}	33.37±1.08^{b}	39.55±2.74^{d}	41.42±0.66^{de}	43.28±1.18^{e}	42.13±1.28^{e}
	32	2-莰酮(M)	Camphor-M	76-22-2	1511.3	1134.704	1.34411	2.73±0.22^{a}	1.82±0.29^{a}	2.42±1.58^{a}	3.57±0.15^{a}	2.00±0.05^{a}	4.82±4.14^{a}	14.27±0.23^{c}	9.38±0.26^{b}	7.04±0.11^{a}
	33	2-莰酮(D)	Camphor-D	76-22-2	1504.6	1116.482	1.85357	2.43±0.20^{b}	2.34±0.25^{ab}	1.89±0.32^{a}	2.65±0.08^{a}	3.51±0.10^{a}	2.74±2.40^{a}	14.70±0.51^{a}	17.47±0.52^{b}	24.21±0.27^{c}
	34	2-癸酮	2-Decanone	693-54-9	1488.7	1074.486	1.46901	0.06±0.01^{a}	0.04±0.01^{a}	0.05±0.04^{a}	0.06±0.01a	0.06±0.00^{b}	0.04±0.02^{b}	0.10±0.01^{b}	0.15±0.03^{c}	0.01±0.00^{a}
	35	6-甲基-5-庚烯-2-酮	6-Methyl-5-hepten-2-one	110-93-0	1350.2	769.938	1.17602	1.15±0.03^{b}	0.99±0.43^{ab}	0.50±0.05^{a}	1.06±0.11^{c}	0.83±0.09^{b}	0.60±0.12^{a}	1.39±0.03^{a}	2.22±0.17^{b}	2.86±0.05^{c}
	36	3-羟基-2-丁酮	3-Hydroxy-2-butanone	513-86-0	1302.8	686.936	1.33023	4.74±1.05^{a}	19.18±0.89^{c}	12.29±0.73^{b}	5.03±0.88^{a}	16.14±0.67^{b}	17.24±1.77^{b}	2.16±0.39^{a}	5.27±0.98^{b}	3.21±0.05^{a}
	37	羟基丙酮	2-Propanone, 1-hydroxy-	116-09-6	1297.5	678.186	1.23609	1.15±0.24^{a}	5.09±0.31^{c}	2.87±0.19^{b}	1.15±0.18^{a}	3.72±0.39^{b}	4.70±0.45^{c}	0.47±0.06^{a}	1.07±0.29^{b}	0.60±0.01^{a}
	38	2-庚酮(D)	2-Heptanone-D	110-43-0	1192	496.126	1.62952	0.11±0.02^{a}	0.54±0.19^{a}	1.66±0.58^{b}	0.13±0.03^{a}	0.17±0.02^{a}	1.37±0.76^{b}	0.08±0.01^{a}	0.29±0.04^{b}	0.21±0.09^{b}
酮类	39	2-庚酮(M)	2-Heptanone-M	110-43-0	1198.9	506.373	1.65714	0.14±0.01^{b}	0.10±0.01^{a}	0.09±0.01^{a}	0.14±0.03^{b}	0.14±0.01^{b}	0.08±0.02^{a}	0.39±0.03^{a}	0.61±0.04^{b}	0.43±0.01^{a}
	40	3-己酮(D)	3-Hexanone-D	589-38-8	1060.4	347.273	1.47033	0.16±0.02^{b}	0.14±0.03^{a}	0.08±0.01^{a}	0.16±0.02^{b}	0.17±0.02^{b}	0.08±0.01^{a}	0.70±0.07^{a}	1.07±0.17^{b}	0.58±0.01^{a}
	41	3-己酮(M)	3-Hexanone-M	589-38-8	1059.9	346.901	1.1726	0.43±0.04^{b}	0.27±0.09^{b}	0.15±0.01^{a}	0.43±0.03^{b}	0.21±0.13^{ab}	0.19±0.06^{a}	0.69±0.01^{c}	0.33±0.01^{b}	0.12±0.00^{a}
	42	2,3-戊二酮(M)	2,3-Pentanedione-M	600-14-6	1020.1	316.927	1.23573	0.44±0.02^{c}	0.17±0.06^{b}	0.09±0.01^{a}	0.39±0.05^{a}	0.20±0.06^{b}	0.16±0.01^{b}	0.41±0.05^{c}	0.16±0.02^{b}	0.04±0.00^{a}
	43	2,3-戊二酮(D)	2,3-Pentanedione-D	600-14-6	1046.5	336.515	1.25746	0.37±0.03^{a}	0.69±0.08^{b}	3.24±0.06^{c}	0.37±0.01^{a}	0.55±0.06^{a}	1.20±0.56^{b}	1.05±0.01^{c}	0.36±0.01^{b}	0.12±0.01^{a}
	44	4-甲基-2-戊酮	4-Methyl-2-pentanone	108-10-1	1018.4	315.718	1.48079	0.20±0.01^{b}	0.14±0.01^{a}	0.12±0.03^{a}	0.16±0.03^{b}	0.19±0.02^{b}	0.09±0.00^{a}	1.85±0.15^{b}	1.92±0.25^{b}	1.06±0.01^{a}
	45	2-戊酮(M)	2-Pentanone-M	107-87-9	995.7	300.346	1.36854	0.25±0.02^{a}	1.26±0.28^{b}	4.40±0.62^{c}	0.52±0.01^{a}	0.83±0.16^{a}	3.29±0.87^{b}	0.32±0.04^{a}	0.97±0.10^{c}	0.83±0.03^{b}
	46	2-戊酮(D)	2-Pentanone-D	107-87-9	995.4	300.22	1.39211	0.04±0.00^{a}	0.09±0.01^{b}	0.05±0.01^{a}	0.06±0.02^{a}	0.11±0.01^{b}	0.06±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}	0.34±0.03^{b}	0.02±0.01^{a}
	47	1-戊烯-3-酮	1-Penten-3-one	1629-58-9	1029.8	324.022	1.08673	5.24±0.16^{c}	2.62±0.09^{b}	1.68±0.06^{a}	5.69±0.67^{c}	2.99±0.27^{b}	1.44±0.16^{a}	0.49±0.06^{c}	0.17±0.01^{b}	0.05±0.01^{a}
	48	1-苯乙酮	1-Phenylethanol	98-86-2	1049	338.448	1.1897	0.93±0.05^{b}	1.07±0.10^{a}	1.44±0.08^{a}	1.04±0.21^{a}	0.89±0.16^{a}	1.30±0.44^{a}	1.94±0.04^{c}	1.28±0.05^{b}	0.65±0.02^{a}

续表 1

类别	编号	化合物中文名	化合物英文名	CAS号	保留指数	保留时间（s）	迁移时间（ms）	相对含量(%)								
								CON1	CON5	CON10	MAP1	MAP5	MAP10	MEP1	MEP5	MEP10
	49	2-丁酮	2-Butanone	78-93-3	911.6	263.159	1.05964	0.90±0.03^{c}	0.38±0.03^{b}	0.11±0.00^{a}	0.75±0.03^{c}	0.61±0.02^{b}	0.18±0.05^{a}	0.37±0.02^{c}	0.22±0.01^{b}	0.10±0.01^{a}
								11.27±0.75^{b}	5.59±1.89^{a}	5.93±1.31^{a}	10.51±0.34^{b}	5.69±0.72^{a}	5.41±0.28^{a}	5.51±0.14^{a}	4.65±0.20^{a}	4.58±0.07^{a}
	50	乙酸(M)	Acetic acid-M	64-19-7	1477.9	1046.969	1.05139	8.66±0.54^{b}	3.62±1.96^{a}	3.37±0.39^{a}	8.23±0.22^{a}	3.76±0.66^{b}	3.09±0.44^{b}	3.43±0.08^{c}	1.44±0.05^{b}	0.65±0.08^{a}
酸类	51	乙酸(D)	Acetic acid-D	64-19-7	1473.1	1034.853	1.15831	1.99±0.24^{c}	1.32±0.14^{b}	0.97±0.12^{a}	1.68±0.09^{b}	1.20±0.07^{a}	1.36±0.12^{a}	1.48±0.06^{a}	1.76±0.11^{b}	2.21±0.15^{c}
	52	壬酸	Nonanoic acid	112-05-0	1298.6	679.993	1.5517	0.55±0.14^{a}	0.59±0.05^{a}	0.68±0.11^{a}	0.53±0.03^{a}	0.66±0.02^{ab}	0.83±0.21^{c}	0.56±0.08^{a}	1.43±0.17^{b}	1.67±0.03^{c}
	53	3-甲基丁酸	3-Methylbutyric acid	503-74-2	825.5	229.88	1.49688	0.06±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}	0.90±0.18^{b}	0.07±0.01^{a}	0.06±0.01^{a}	0.13±0.08^{a}	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}	0.04±0.02^{a}
								5.08±0.22^{c}	3.99±0.30^{b}	3.70±0.06^{ab}	5.08±0.20^{c}	5.01±0.45^{c}	3.24±0.21^{a}	17.79±0.54^{e}	19.12±0.73^{f}	14.68±2.20^{d}
	54	伞花烃	p-Cymene	99-87-6	1285.8	656.474	1.18837	0.34±0.02^{c}	0.24±0.03^{b}	0.16±0.01^{a}	0.34±0.02^{b}	0.32±0.02^{b}	0.12±0.02^{a}	0.23±0.01^{a}	0.34±0.03^{b}	0.98±0.02^{c}
	55	萜品油烯	Terpinolene	586-62-9	1286.2	657.224	1.21857	0.21±0.01^{b}	0.16±0.02^{a}	0.15±0.01^{a}	0.18±0.00^{a}	0.19±0.02^{a}	0.15±0.03^{a}	0.75±0.05^{b}	0.74±0.06^{b}	0.58±0.01^{a}
	56	α-水芹烯(M)	α-Phellandrene-M	99-83-2	1182.6	482.905	1.21774	0.92±0.01^{c}	0.88±0.10^{ab}	0.79±0.04^{a}	0.95±0.04^{a}	0.89±0.09^{a}	0.79±0.09^{a}	6.09±0.15^{c}	4.15±0.24^{b}	2.66±0.07^{a}
	57	(+)-柠檬烯	(+)-Limonene	138-86-3	1199.1	506.71	1.65748	0.13±0.01^{b}	0.09±0.00^{a}	0.08±0.01^{a}	0.12±0.03^{b}	0.14±0.01^{b}	0.06±0.01^{a}	0.37±0.03^{a}	0.54±0.02^{b}	0.38±0.01^{a}
烃类	58	α-水芹烯(D)	α-Phellandrene-D	99-83-2	1166	460.296	1.67843	0.76±0.02^{b}	0.63±0.04^{a}	0.53±0.09^{a}	0.72±0.05^{b}	0.85±0.09^{b}	0.40±0.07^{a}	1.56±0.08^{a}	1.83±0.11^{b}	1.94±0.07^{b}
	59	乙基苯	Ethylbenzene	100-41-4	1145.1	433.395	1.44672	1.11±0.04^{b}	0.77±0.28^{ab}	0.50±0.13^{a}	1.20±0.22^{a}	1.02±0.36^{a}	0.71±0.16^{a}	5.80±0.24^{b}	7.14±0.58^{c}	4.63±0.05^{a}
	60	β-蒎烯(M)	β-Pinene-M	127-91-3	1116.3	398.808	1.21492	1.28±0.15^{b}	0.95±0.06^{a}	1.28±0.09^{b}	1.27±0.06^{b}	1.21±0.20^{b}	0.86±0.10^{a}	2.70±0.12^{a}	3.66±0.09^{c}	3.27±0.07^{b}
	61	β-蒎烯(D)	β-Pinene-D	127-91-3	1105	385.982	1.29628	0.10±0.01^{b}	0.09±0.01^{ab}	0.08±0.01^{a}	0.09±0.00^{b}	0.12±0.03^{b}	0.06±0.01^{a}	0.14±0.01^{a}	0.28±0.02^{c}	0.20±0.02^{b}
	62	α-蒎烯	α-Pinene	80-56-8	999.5	302.455	1.28851	0.22±0.05^{b}	0.17±0.02^{ab}	0.12±0.00^{a}	0.21±0.05^{b}	0.28±0.02^{c}	0.09±0.04^{a}	0.16±0.02^{b}	0.43±0.03^{c}	0.02±0.00^{a}
								17.21±0.66^{f}	9.16±0.53^{b}	7.15±0.95^{a}	15.53±1.06^{e}	10.65±0.37^{cd}	9.83±0.64^{bc}	9.51±0.19^{b}	10.12±0.17^{bc}	11.28±0.61^{d}
	63	2,3,5-三甲基吡嗪	2,3,5-Trimethyl-pyrazine	14667-55-1	1439.9	955.532	1.16764	0.20±0.02^{a}	0.53±0.43^{a}	0.22±0.03^{a}	0.23±0.02^{b}	0.41±0.04^{c}	0.15±0.01^{a}	0.54±0.03^{a}	1.20±0.13^{b}	1.75±0.12^{c}
	64	2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪	2-Ethyl-3,5-dimethyl-pyrazine	13925-07-0	1430.9	935.077	1.23251	0.14±0.01^{c}	0.11±0.01^{b}	0.08±0.01^{a}	0.16±0.02^{a}	0.16±0.02^{a}	0.15±0.11^{a}	0.47±0.02^{b}	0.55±0.02^{c}	0.35±0.02^{a}
	65	玫瑰醚	2H-Pyran,tetrahydro-4-methyl-2	16409-43-1	1389.6	846.483	1.79852	0.26±0.02^{c}	0.22±0.05^{ab}	0.19±0.02^{a}	0.27±0.03^{b}	0.35±0.04^{c}	0.14±0.02^{a}	0.15±0.02^{a}	0.30±0.02^{b}	1.43±0.07^{c}
其他	66	二甲基三硫	Dimethyl trisulfide	3658-80-8	1389.9	847.168	1.30555	1.31±0.03^{ab}	1.12±0.03^{a}	1.51±0.21^{c}	1.48±0.13^{a}	1.58±0.30^{a}	2.40±0.50^{b}	2.09±0.10^{a}	2.82±0.04^{b}	3.78±0.19^{c}
	67	2,6-二甲氧基苯酚	2,6-Dimethoxyphenol	91-10-1	1326.4	727.018	1.20682	0.04±0.00^{a}	0.08±0.01^{c}	0.06±0.01^{b}	0.05±0.01^{a}	0.05±0.00^{a}	0.09±0.01^{b}	0.08±0.00^{a}	0.09±0.01^{a}	0.12±0.00^{b}
	68	1,3-丙二胺	1,3-Diaminopropane	109-76-2	1321.1	717.927	1.29542	0.75±0.05^{a}	1.37±0.10^{b}	1.46±0.19^{b}	0.70±0.04^{a}	1.15±0.14^{a}	2.20±0.39^{b}	1.99±0.14^{a}	2.84±0.23^{b}	2.71±0.29^{b}
	69	2-甲基吡嗪	2-Methylpyrazine	109-08-0	1257.3	602.891	1.09652	0.05±0.01^{a}	0.06±0.00^{a}	0.22±0.05^{b}	0.05±0.01^{a}	0.06±0.01^{a}	0.17±0.03^{b}	0.02±0.00^{c}	0.01±0.00^{b}	0.00±0.00^{a}
	70	二烯丙基硫醚	Allyl sulfide	592-88-1	1148.3	437.363	1.11595	8.44±0.25^{c}	4.50±1.09^{b}	2.55±0.16^{a}	7.16±0.52^{a}	5.85±0.11^{b}	3.66±0.40^{c}	3.71±0.14^{c}	2.22±0.05^{b}	1.09±0.01^{a}
	71	2-乙酰基吡啶	2-Acetylpyridine	1122-62-9	1039.1	330.939	1.12738	6.03±0.45^{b}	1.18±0.09^{a}	0.86±0.08^{a}	5.42±1.41^{b}	1.04±0.16^{a}	0.87±0.24^{a}	0.47±0.02c	0.08±0.01^{b}	0.04±0.00^{a}

注：不同上标小写字母表示不同冷藏时间差异显著（P<0.05）。

定出 71 种挥发性风味物质，其中醛类 4 种、醇类 16 种、酯类 11 种、酮类 18 种、酸类 4 种、烃类 9 种和其他类 9 种。在分离过程中，2-辛醇、正己醇、2-甲基丙醇、3-甲基-1-丁醇乙酸酯、乙酸乙酯、2-荚酮、2-庚酮、3-己酮、2,3-戊二酮、2-戊酮、乙酸、α-水芹烯和 β-蒎烯以单体和二聚体的形式存在。

肉品中的醛类物质主要来源于脂质氧化，具有独特的气味特征(脂肪味、芳香味和花香味)对肉品的整体风味影响较大[33]。由表 1 可知，共检测出醛类物质 4 种，分别是苯甲醛、(Z)-4-庚烯醛、丁醛和 2-甲基丙醛。随着冷藏时间的延长，3 种不同包装的鸡胸肉中挥发性醛类化合物的相对含量均呈现下降趋势，CON 组的醛类相对含量由 27.19% 降低至 20.78%，MAP 组的醛类相对含量由 29.44% 降低至 18.87%，MEP 组的醛类相对含量由 17.15% 降低至 5.68%。这可能是由于脂质氧化产生的醛类化合物不稳定，易与鸡胸肉中的蛋白质发生反应形成加合物[35]。

酮类物质是鸡胸肉腐败过程中重要的挥发性风味化合物，其主要来源于脂肪酸的自动氧化、醇类物质的氧化、酯类化合物的降解以及革兰氏阴性菌的作用[36]。由表 1 可知，3 种不同包装的鸡胸肉在冷藏 1~10 d 过程中共检测出 18 种酮类物质，占挥发性化合物总含量的 21.49%~43.28%，是鸡胸肉腐败过程中种类和含量最丰富的挥发性化合物。其中，2-戊酮(M)具有刺激性和不愉快的气味，在肉类腐败过程中起着关键作用，是鸡胸肉腐败气味的重要贡献者[34]。从表 1 可知，3 种不同包装的鸡胸肉在冷藏过程中 2-戊酮(M)含量均显著上升，且 CON、MAP 和 MEP 处理组的鸡胸肉在冷藏第 10 d 时，2-戊酮(M)的相对含量分别为 4.40%、3.29% 和 0.83%，MEP 处理组的 2-戊酮(M)含量最低。这可能是由于气调包装中的低氧环境和固载精油保鲜剂中的活性成分能有效抑制鸡胸肉中脂肪的氧化和腐败微生物的繁殖，从而抑制肉品腐败气味的生成。

酯类化合物一方面来源于肉品中醇和游离脂肪酸的酯化反应，另一方面也可来源于甘油三酯中的脂肪酸与乙醇的酯交换反应[37]。3 个处理组的鸡胸肉样品共检测出 11 种酯类物质，相对含量在 2.49%~14.14%，其中乙酸乙酯(D)是鸡胸肉冷藏过程中含量最多的酯类化合物。乙酸乙酯具有水果香味，在空气包装和气调包装中的含量均随着鸡胸肉冷藏时间的增加而显著上升，并在冷藏第 10 d 时其含量分别达到 11.08% 和 8.84%，与郭依萍等[38] 研究生鲜猪肉的冷藏结果一致。乙酸乙酯是由于鸡肉中的内源酶分解产生和微生物生长代谢引发的肉类腐败气味，其含量随着肉品腐败程度的增加而增加，且酯类物质的积累是导致肉品冷藏后期异味的主要来源之一[39]。但值得注意的是，MEP 组中的乙酸乙酯(D)含量呈现先增加后降低的趋势，这可能是由于在鸡胸肉冷藏末期(第 10 d)，精油保鲜剂缓释出的挥发性风味成分增加，其强烈的精油气味掩盖了乙酸乙酯的检测信号；也可能是在鸡胸肉冷藏末期，MEP 组中的优势微生物利用乙酸乙酯(D)作为供其生长繁殖的碳源，从而导致了鸡胸肉在第 10 d 时乙酸乙酯(D)含量降低。

肉品冷藏过程醇类物质的来源途径多样，主要包括碳水化合物发酵、氨基酸代谢、脂质氧化以及微生物代谢等[40]，但由于其阈值相对较高，对鸡胸肉的整体风味贡献较小。由表 1 可知，鸡胸肉在冷藏过程中共检测到 16 种醇类化合物，且醇类化合物总量在 3 种不同包装方式鸡胸肉冷藏过程中均不同程度升高。这可能是由于腐败微生物在鸡胸肉冷藏过程中迅速繁殖并发酵所导致。乙酸(M)是酸类化合物中相对含量最高的风味物质，其相对含量均随着冷藏时间的延长而降低，这可能是由于鸡胸肉在冷藏过程中乙酸(M)在一定条件下形成了烃类物质[39]。

2.4.3 挥发性风味物质 OPLS-DA 及模型验证 为探究不同包装处理冷藏鸡胸肉风味物质的差异，以鉴别出的 71 种化合物为因变量，3 种不同包装的鸡胸肉分别冷藏 1、5、10 d 的 9 个样品为自变量，进行正交偏最小二乘判别分析(Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis，OPLS-DA)分析。由图 6A 可知，所有组间样品的距离都比较相近，说明样品的重复性良好。此外还可看出，在不同冷藏时间下，除 CON1 和 MAP1 样品聚集于一处外，其他 7 组样品的鸡胸肉区分明显，说明随着冷藏时间的延长，3 种包装的鸡胸肉挥发性风味物质均发生了变化。此外，MEP 组的样品均分布在 Y 轴左边，而 CON 组和 MAP 组均分布在 Y 轴的右边，这可能是由于固载精油保鲜剂挥发出的精油导致其与 CON 组和 MAP 组的风味相差较大。图 6A 的模型中，R^2X=0.964，R^2Y=0.952，Q^2=0.83，R^2 和 Q^2 均超过 0.5，表明该模型拟合结果可接受且比较合理。同时，本研究对鸡胸肉挥发性风味物质的 OPLS-DA 模型进行了 200 次置换检验以评估其是否过度拟合(图 6B)。经过 200 次交叉验证后，R^2 和 Q^2 两条回归线与 Y 轴分别相交于(0.0, 0.319)和(0.0, −0.574)，表明该模型不存在过拟合，可用于不同包装处理鸡胸肉冷藏过程中香气物质的判别分析[41]。

通过 VIP 对不同处理的冷藏鸡胸肉的特征风味物质进行筛选，结果如图 6C 所示。通常将 VIP>1 作为筛选条件，VIP 值越大，说明该风味物质在 3 种包装中的差异越显著[42]。由图 6C 可知，VIP>1 的挥发性风味物质共有 25 种，分别为 2-甲基丙醛、乙酸己酯、氧化芳樟醇、正己醇(M)、正丁醇、乳酸乙酯、乙酸(D)、α-蒎烯、2-乙酰基吡啶、羟基丙酮、3-羟基-2-丁酮、3-甲基-1-丁醇乙酸酯(M)、二甲基三硫、1-苯乙酮、正己醇(D)、3-甲基-1-丁醇乙酸酯(D)、3-甲基丁酸、己酸丁酯、2-辛醇(M)、2,3-戊二酮(M)、2-戊酮(D)、乙酸(M)、3-己酮(M)、丁酸甲酯和 1-戊烯-3-酮，这 25 种风味物质可用于区别不同组别鸡胸肉风味的差异成分。

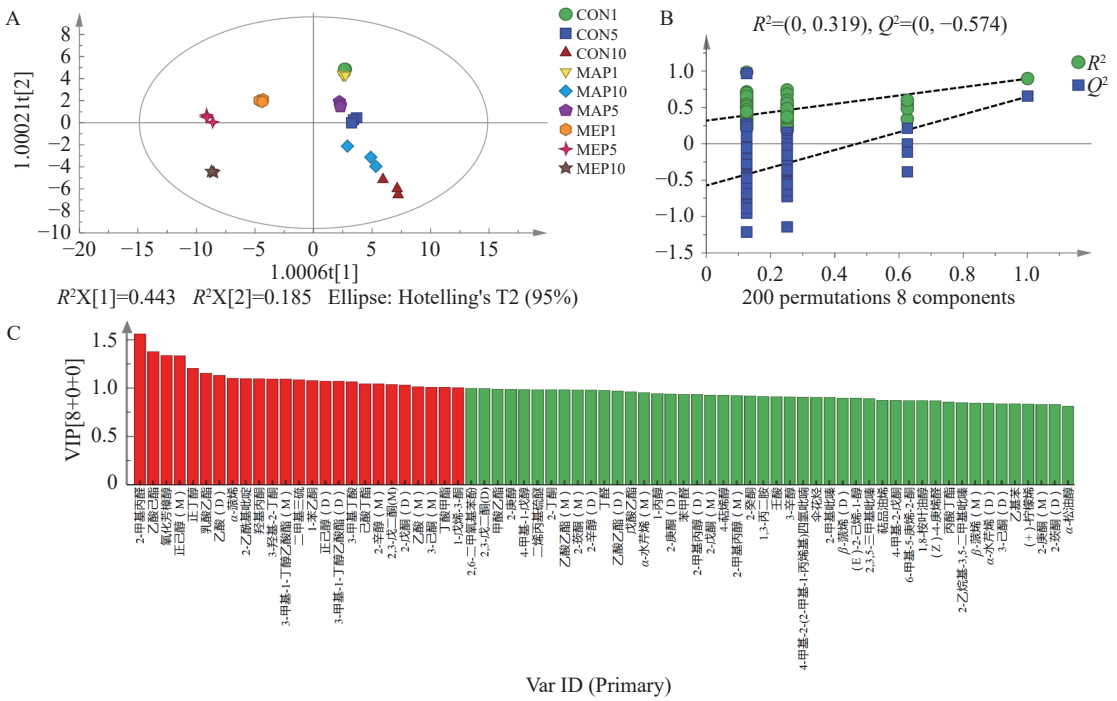


图 6　鸡胸肉冷藏过程中挥发性风味物质的 OPLS-DA 得分图(A)、置换检验图(B)和 VIP 图(C)

Fig.6　OPLS-DA score plot (A), permutation test plot (B), and VIP diagram (C) of volatile flavor compounds in chicken breast meat during refrigeration

2.4.4　关键风味物质分析　为进一步确定样品间挥发性风味物质的差异，采用 ROAV 法来评价鉴定出的 71 种挥发性风味物质对不同包装环境下鸡胸肉整体风味的贡献程度，这个贡献程度是由挥发性风味物质的相对含量和其对应的阈值共同决定的。一般来说，当 0.1≤ROAV≤1 时，该香气化合物被认为是鸡胸肉的重要挥发性风味物质，对样品的整体风味具有修饰作用；而 ROAV>1 则认为该香气成分为不同包装处理鸡胸肉冷藏过程中的关键挥发性风味物质。因此，本研究将相对含量与阈值比值最高的二甲基三硫的 ROAV 定义为 100，然后对其他化合物进行 ROAV 分析。表 2 为鸡胸肉中 ROAV≥0.1 的挥发性化合物，共有 16 种，其中 ROAV>1 的关键挥发性风味物质共有 11 种，分别是丁醛、1,8-桉叶油醇、戊酸乙酯、乙酸乙酯(D)、乙酸乙酯(M)、3-羟基-2-丁酮、2-庚酮(D)、2-庚酮(M)、α-水芹烯(M)、(+)-柠檬烯、α-蒎烯、2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙酰基吡啶、2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪、二甲基三硫、二烯丙基硫醚。

表 2　鸡胸肉冷藏过程中挥发性物质的 ROAV 值

Table 2　ROAV of volatile compounds in chicken breast during refrigeration

编号	物质名称	阈值(μg/kg)	ROAV								
			CON1	CON5	CON10	MAP1	MAP5	MAP10	MEP1	MEP5	MEP10
1	丁醛	8.2	23.22	20.02	14.27	22.56	19.84	7.44	9.16	3.20	1.48
2	1,8-桉叶油醇	1.3	1.29	1.30	0.82	1.04	1.36	0.48	1.44	1.64	3.28
3	戊酸乙酯	0.58	6.45	5.85	4.34	5.71	5.35	1.58	2.39	3.55	4.33
4	乙酸乙酯(D)	5	6.53	13.91	14.68	5.57	3.95	7.37	0.48	1.38	0.59
5	乙酸乙酯(M)	5	2.29	1.82	0.44	1.84	1.09	0.47	0.30	0.29	0.11
6	3-羟基-2-丁酮	14	2.58	12.23	5.81	2.43	7.30	5.13	0.74	1.33	0.61
7	2-庚酮(D)	9	0.09	0.54	1.22	0.10	0.12	0.63	0.04	0.11	0.06
8	2-庚酮(M)	9	0.12	0.10	0.07	0.11	0.10	0.04	0.21	0.24	0.13
9	α-水芹烯(M)	40	0.18	0.20	0.13	0.16	0.14	0.08	0.73	0.37	0.18
10	(+)-柠檬烯	10	0.10	0.08	0.05	0.08	0.09	0.03	0.18	0.19	0.10
11	α-蒎烯	6	0.28	0.25	0.13	0.24	0.30	0.06	0.13	0.25	0.01
12	2,3,5-三甲基吡嗪	23	0.07	0.21	0.06	0.07	0.11	0.03	0.11	0.19	0.20
13	2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪	0.04	26.72	24.55	13.25	27.03	25.32	15.63	56.22	48.76	23.15
14	二甲基三硫	0.1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
15	二烯丙基硫醚	1	64.43	40.18	16.89	48.38	37.03	15.25	17.75	7.87	2.88
16	2-乙酰基吡啶	19	2.42	0.55	0.30	1.93	0.35	0.19	0.12	0.01	0.01

注：阈值参考《化合物嗅觉阈值汇编(原书第二版)》空气中嗅觉的觉察阈值[44]。

硫、二烯丙基硫醚、2-乙酰基吡啶。为进一步明确不同包装处理鸡胸肉冷藏过程中的关键挥发性风味物质，本研究将 ROAV 与 VIP 均大于 1 的挥发性风味物质进行整体分析与比对，得出 3-羟基-2-丁酮、二甲基三硫和 2-乙酰基吡啶为鸡胸肉 3 种不同包装冷藏过程中的关键特征挥发性风味物质[43]。

2.4.5 不同包装方式与关键特征风味物质相关性分析 对筛选出的 3 种关键特征风味物质与不同包装冷藏过程中的样品进行相关性分析，结果如图 7 所示。图 7 中 PC1 和 PC2 的贡献率分别为 52.8% 和 40.9%，总贡献率为 93.7%，表明这两个主成分能够有效代表 3 种不同包装鸡胸肉冷藏过程中关键特征挥发性风味物质的主要特征。图 7 中红色三角形表示鸡胸肉在 3 种包装中分别冷藏 1、5、10 d 的 9 个样品，关键特征挥发性风味物质的分布位置及其与鸡胸肉样品的相对距离，反映了不同包装和不同冷藏时间下，这些物质对鸡胸肉风味的影响趋向和大小[43]。从图 7 可以看出，2-乙酰基吡啶与 MAP1 和 CON1 均落在 PCA 图的第四象限，表明 2-乙酰基吡啶是气调包装和空气包装冷藏初期的关键特征风味物质。3-羟基-2-丁酮与 CON5、CON10、MAP5、MAP10 样品均分布在 X 轴的上面，说明 3-羟基-2-丁酮对鸡胸肉在空气包装和气调包装冷藏中后期的腐败风味贡献较大，推动了鸡胸肉异味的生成。3-羟基-2-丁酮是氨基酸和油酸的氧化产物[45]，通常被认为是肉品冷藏过程中的重要腐败风味化合物[46]。二甲基三硫与 MEP 组的样品均分布在第三象限，说明二甲基三硫对鸡胸肉在固载精油协同气调包装冷藏过程中的风味贡献较大。二甲基三硫是鸡胸肉在冷藏过程中含硫氨基酸降解产生不愉悦的气味[47]。

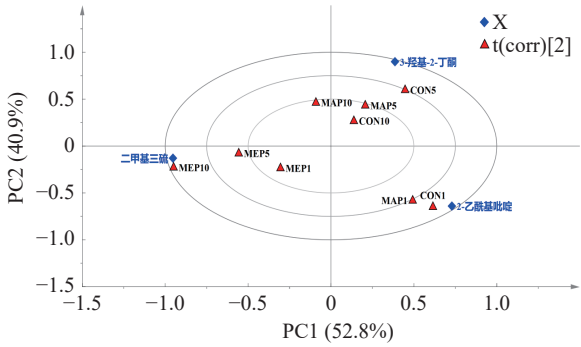


图 7 不同包装方式中关键特征挥发性风味物质 PCA 图

Fig.7 PCA plot of key characteristic volatile flavor compounds in the different packaging methods

2.4.6 蛋白氧化指标与关键特征风味物质相关性分析 为进一步探究鸡胸肉冷藏过程中肌原纤维蛋白氧化与筛选出的 3 个关键特征挥发性风味物质之间的关系，本研究将羰基、巯基、表面疏水性和 ROAV 与 VIP 均大于 1 的挥发性风味物质进行 Spearman 相关性分析。结果如图 8 所示，红色代表正相关，蓝色代表负相关，颜色越深表示相关性越强。表面疏水性与巯基呈显著负相关，与羰基呈显著正相关。3-羟基-2-丁酮与羰基和表面疏水性均呈显著正相关。这说明肌原纤维蛋白的氧化对 3-羟基-2-丁酮的产生有正向影响。因此，3-羟基-2-丁酮可作为冷藏鸡胸肉在空气包装、气调包装和固载精油结合气调包装中肌原纤维蛋白氧化进程的潜在标志物。

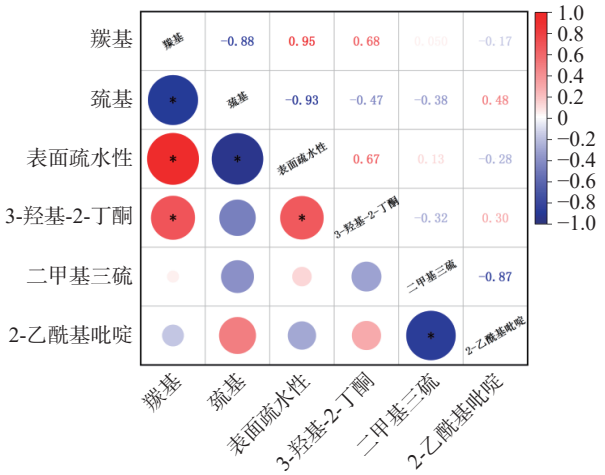


图 8 肌原纤维蛋白氧化指标与关键差异挥发性风味物质的相关性分析

Fig.8 Correlation analysis between oxidation indices of myofibrillar protein and key characteristic volatile flavor compounds

注：“*”表示显著相关(P<0.05)。

3 结论

本研究探究了 3 种不同包装处理对三黄鸡冷藏过程中肌原纤维蛋白氧化特性和挥发性风味物质的影响。CON 组、MAP 组和 MEP 组的肌原纤维蛋白羰基和表面疏水性均随着冷藏时间的延长而增加，巯基含量随着冷藏时间的延长而降低。与 CON 组和 MAP 组相比，MEP 处理组能有效抑制鸡胸肉肌原纤维蛋白羰基的生成，巯基的氧化以及表面疏水性的增加。三组样品冷藏过程中共鉴定出 71 种挥发性物质，其中 3-羟基-2-丁酮、二甲基三硫和 2-乙酰基吡啶为 ROAV 与 VIP 均大于 1 的共有挥发性风味物质。二甲基三硫为 MEP 组的关键特征风味物质，3-羟基-2-丁酮为鸡胸肉空气包装和气调包装冷藏中后期的关键腐败风味物质。并通过 Spearman 相关性分析发现 3-羟基-2-丁酮为 3 种包装中鸡胸肉冷藏过程中肌原纤维蛋白氧化进程的潜在标志物。为此，本研究可为三黄鸡的冷藏保鲜提供理论依据。

© 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] LÜ Jingxiu, MA Jingjing, LIU Yu, et al. Lipidomics analysis of Sanhuang chicken during cold storage reveals possible molecular mechanism of lipid changes[J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135914.

［2］ JASPAL M H, IJAZ M, HAQ H A U, et al. Effect of oregano essential oil or lactic acid treatments combined with air and modified atmosphere packaging on the quality and storage properties of chicken breast meat[J]. LWT, 2021, 146: 111459.
［3］ AZADI A, RAFIEIAN F, SAMI M, et al. Investigating the effects of chitosan/tragacanth gum/polyvinyl alcohol composite coating incorporated with cinnamon essential oil nanoemulsion on safety and quality features of chicken breast fillets during storage in the refrigerator[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126481.
［4］ SHAFIEI N, MOOSAVI-NASAB M, KHALESI M, et al. Effect of vacuum packaging combined with edible basil seed gum coating containing lemon essential oil on shelf life extension of refrigerated shrimp (*Penaeus indicus*)[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(2): 1328−1337.
［5］ PIUS BASSEY A, PEI Pei liu, CHEN Jiahui, et al. Antibacterial efficacy of phenyllactic acid against *Pseudomonas lundensis* and *Brochothrix thermosphacta* and its synergistic application on modified atmosphere/air-packaged fresh pork loins[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137002.
［6］ CHA Hanying, LIANG Shuangmin, SHI Kaiyin, et al. Effect of modified atmosphere packaging on the quality characteristics and bacterial community succession of super-chilled chicken meat in biopreservation[J]. LWT, 2023, 189: 115547.
［7］ YIN Cheng, WANG Jia, QIAN Jing, et al. Quality changes of rainbow trout stored under different packaging conditions and mathematical modeling for predicting the shelf life[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 32: 100824.
［8］ LIU Fei, YU Chunhua, GUO Shiliang, et al. Extending shelf life of chilled pork meat by cinnamaldehyde nano emulsion at non-contact mode[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 37: 101067.
［9］ 余文志, 田雨晴, 周磊, 等. 固态植物精油保鲜剂特性表征及其对气调包装卤鸭脖耐贮性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(5): 346−358. ［YU Wenzhi, TIAN Yuqing, ZHOU Lei, et al. Effects of characterization of solid plant essential oil preservative and its storability on pot-stewed duck neck in modified atmosphere packaging[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(5): 346−358.］
［10］ QUEIROGA I M B N, CAVALCANTI M T, de LIRA ANDRADE M, et al. Performance of *Allium cepa* and *Allium sativum* essential oils on the quality of marine shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) under MAP packaging[J]. Food Control, 2023, 152: 109885.
［11］ JIANG Fenghua, ZHOU Lei, ZHOU Wei, et al. Effect of modified atmosphere packaging combined with plant essential oils on preservation of fresh-cut lily bulbs[J]. LWT, 2022, 162: 113513.
［12］ 李可, 张怡雪, 王艳秋, 等. 超声波处理对低盐条件下鸡肉肌原纤维蛋白结构和氧化性质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(16): 177−187. ［LI Ke, ZHANG Yixue, WANG Yanqiu, et al. Effect of ultrasonic treatment on the structural and oxidation properties of chicken myofibrillar protein under low-salt conditions[J]. Food Science, 2024, 45(16): 177−187.］
［13］ JIANG Shanshan, DENG Yuchen, SHUI Shanshan, et al. Study on the changes of muscle quality and flavor during cold storage of two Sepiidae species (*Sepiella maindroni* and *Sepia* esculenta)[J]. LWT, 2025, 215: 117179.
［14］ LU Minxin, ZHANG Chang, MA Linyin, et al. Cryoprotective effect of magnetic field-assisted freezing in combination with curdlan on myofibrillar protein of *Litopenaeus vannamei*: Oxidative aggregation, protein structure and thermal stability[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110730.
［15］ 刘彩玲, 李雪, 刘光宪, 等. 4 种江西不同地方鸡品种对鸡汤滋味及挥发性风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 71−83. ［LIU Cailing, LI Xue, LIU Guangxian, et al. Effects of four different chicken breeds from different regions of Jiangxi on the taste and volatile flavor of chicken soup[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 71−83.］
［16］ 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法：“ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370−374. ［LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. “ROAV” method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370−374.］
［17］ TURGUT S S, SOYER A, IŞıKÇı F. Effect of pomegranate peel extract on lipid and protein oxidation in beef meatballs during refrigerated storage[J]. Meat Science, 2016, 116: 126−132.
［18］ 全爽, 顾泽茂, 王陈, 等. 不同包装方式对香酥虾球品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 296−307. ［QUAN Shuang, GU Zemao, WANG Chen, et al. Effect of different packaging methods on the quality of crispy shrimp balls[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 296−307.］
［19］ HE Yanfu, HUANG Hui, LI Laihao, et al. The effects of modified atmosphere packaging and enzyme inhibitors on protein oxidation of tilapia muscle during iced storage[J]. LWT, 2018, 87: 186−193.
［20］ 王泽富. 兔肉脂质氧化对肌原纤维蛋白氧化作用与外源调控研究[D]. 重庆：西南大学, 2021. ［WANG Zefu. Study on the effect of lipid oxidation in rabbit meat on myofibrillar protein oxidation and external intervention[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.］
［21］ ZHANG Longteng, SHAN Yuankai, HONG Hui, et al. Prevention of protein and lipid oxidation in freeze-thawed bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) fillets using silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fin hydrolysates[J]. LWT, 2020, 123: 109050.
［22］ LEI Yongdong, DENG Xiaorong, ZHANG Zhiwei, et al. Effects of oxidation on the physicochemical properties and degradation of mutton myofibrillar proteins[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(7): 2932−2942.
［23］ KHODER R M, DENG Xinqun, ZHANG Liangzi, et al. Effect of cinnamaldehyde and tannic acid nano-emulsions on meat quality and protein oxidation during cold storage[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 48: 101462.
［24］ LIU Xiumei, BAO Xiaokai, WANG Xumin, et al. Time-dependent immune injury induced by short-term exposure to nanoplastics in the *Sepia* esculenta larvae[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2023, 132: 108477.
［25］ BEYAZ M O, YETIMAN A E, DOĞAN M, et al. Examining the possibility of producing natural microbicides and antioxidant agents for food and cosmetic uses from the essential oils of *Laurus nobilis* (laurel), *Syzygium aromaticum* (clove), and *Cinnamomum verum* (cinnamon)[J]. Food Bioscience, 2025, 69: 106840.
［26］ YANG Jun, GOKSEN G, ZHANG Wanli. Rosemary essential oil: Chemical and biological properties, with emphasis on its delivery systems for food preservation[J]. Food Control, 2023, 154: 110003.
［27］ JIA Na, KONG Baohua, LIU Qian, et al. Antioxidant activity of black currant (*Ribes nigrum* L.) extract and its inhibitory effect on lipid and protein oxidation of pork patties during chilled stor-

age[J]. Meat Science, 2012, 91(4): 533−539.
[28] 韦诚, 朱丽娟, 谢月英, 等. 蛋白质在肉类加工保藏中的氧化及其不利影响的研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 314−321. [WEI Cheng, ZHU Lijuan, XIE Yueying, et al. Progress in protein oxidation during meat processing and preservation and its adverse health effects[J]. Food Science, 2017, 38(9): 314−321.]
[29] ZHAO Shengming, YANG Liu, HEI Mengran, et al. Conformation and functional modification of porcine myofibrillar protein by pepper leaf polyphenols under oxidative condition[J]. LWT, 2024, 198: 116017.
[30] 张容. 调理黑鱼片冷藏保鲜研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023. [ZHANG Rong. Study on fresh-keeping of prepared snakehead fish fillets during chilling storage[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2023.]
[31] WANG Cong, ZHANG Li, HAN Ling, et al. The mechanism of peanut shell flavonoids inhibiting the oxidation of myofibrillar protein: An elucidation of the antioxidative preservation action of peanut shell flavonoids on chilled pork[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283: 137900.
[32] NUERJIANG M, LI Ying, YUE Xiaoxiang, et al. Analysis of inhibition of guava (*Psidium guajava* L.) leaf polyphenol on the protein oxidative aggregation of frozen chicken meatballs based on structural changes[J]. Food Research International, 2023, 164: 112433.
[33] ZHANG Qi, DING Yicheng, GU Saiqi, et al. Identification of changes in volatile compounds in dry-cured fish during storage using HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2020, 137: 109339.
[34] 赵志平, 张盛源, 陈泓帆, 等. 基于 GC-IMS 和电子鼻分析牛肉腐败进程中挥发性风味物质的变化[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 235−244. [ZHAO Zhiping, ZHANG Shengyuan, CHEN Hongfan, et al. Changes of volatile flavor substances of beeves in spoilage process based on gas chromatography–ion mobility spectrometry and electronic nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 235−244.]
[35] ZHOU Hui, CUI Wei, GAO Yafei, et al. Analysis of the volatile compounds in Fuliji roast chicken during processing and storage based on GC-IMS[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1484−1493.
[36] WANG Fang, GAO Yaqin, WANG Hongbo, et al. Analysis of volatile compounds and flavor fingerprint in Jingyuan lamb of different ages using gas chromatography–ion mobility spectrometry (GC–IMS)[J]. Meat Science, 2021, 175: 108449.
[37] LIU S Q, HOLLAND R, CROW V L. Esters and their biosynthesis in fermented dairy products: A review[J]. International Dairy Journal, 2004, 14(11): 923−945.
[38] 郭依萍, 栗婧文, 窦晗, 等. 精准温控对冰温贮藏生鲜猪肉保鲜效果的影响[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(1): 150−158. [GUO Yiping, LI Jingwen, DOU Han, et al. Effect of precise temperature control on the preservation effect of fresh pork during ice-temperature storage[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(1): 150−158.]
[39] 刘俊霞, 赵萍, 金晶, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱结合化学计量学分析大鲵肉冷藏期间挥发性成分[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 269−278. [LIU Junxia, ZHAO Ping, JIN Jing, et al. Analysis of volatile components in giant salamander meat during cold storage based on gas chromatography-ion mobility spectrometer and chemometrics[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(22): 269−278.]
[40] SIDIRA M, KANDYLIS P, KANELLAKI M, et al. Effect of immobilized *Lactobacillus casei* on the evolution of flavor compounds in probiotic dry-fermented sausages during ripening[J]. Meat Science, 2015, 100: 41−51.
[41] WANG Yin, WANG Xian, HUANG Yuanyuan, et al. Identification and biotransformation analysis of volatile markers during the early stage of *Salmonella* contamination in chicken[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137130.
[42] KANG Chaodi, ZHANG Yingying, ZHANG Mingyue, et al. Screening of specific quantitative peptides of beef by LC–MS/MS coupled with OPLS-DA[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132932.
[43] 高子武, 何金华, 侯馨宁, 等. 顶空-气相色谱-离子迁移谱结合多元统计学解析烤鸭坯冻融次数对烤鸭中香气物质的影响规律[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 183−191. [GAO Ziwu, HE Jinhua, HOU Xinning, et al. Effect of varying freeze-thaw cycles on volatile compounds in roast duck: An investigation using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2025, 46(6): 183−191.]
[44] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 1−206. [LEO van Hemert. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Beijing: Science Press, 2018: 1−206.]
[45] 吴利真, 廖志强, 史阳凯, 等. 冷鲜鹅胸肉微生物群落分析及其对挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 87−96. [WU Lizhen, LIAO Zhiqiang, SHI Yangkai, et al. Microbial community of chilled goose breast and its effect on volatile flavor components [J]. Food Science, 2024, 45(6): 87−96.]
[46] PAVLIDIS D E, MALLOUCHOS A, ERCOLINI D, et al. A volatilomics approach for off-line discrimination of minced beef and pork meat and their admixture using HS-SPME GC/MS in tandem with multivariate data analysis[J]. Meat Science, 2019, 151: 43−53.
[47] 郑小善. 基于脂质热降解解析热风干制凡纳滨对虾香气化合物的形成特性[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2023. [ZHENG Xiaoshan. Analysis of the formation characteristics of aroma compounds in hot air-dried shrimp (*Litopenaeus vannamei*) based on lipid thermal degradation[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2023.]