梁佳慧, 乌素, 高爱武, 等. 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉的保鲜效果 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 407−419. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080114

LIANG Jiahui, WU Su, GAO Aiwu, et al. Effect of Mustard Essential Oil Pickering Emulsion on the Preservation of Chilled Mutton[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 407−419. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080114

· 贮运保鲜与冷链技术 ·

# 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉的保鲜效果

梁佳慧[1], 乌　素[1,2,*], 高爱武[1,2], 杨续金[1,2]

（1.内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018;
2.内蒙古农业大学杨续金创新工作室, 内蒙古呼和浩特 010018）

**摘　要:** 该研究旨在探究芥末精油构建的 Pickering 乳液用作涂膜液时的保鲜成效及延长冷鲜羊肉货架期的性能，为该类 Pickering 乳液在肉制品保鲜领域的实际应用提供数据支撑。实验采用芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉进行表面涂膜保鲜处理，通过测定芥末精油 Pickering 乳液的抗氧化活性、抑菌性能及羊肉品质指标，考察其对冷鲜羊肉的保鲜效果。结果显示，随着芥末精油浓度的增加，乳液的抑菌效果显著提升（$P$<0.05），且同一浓度下对不同细菌的抑制效果存在差异；当芥末精油浓度为 2.0% v/v 时，Pickering 乳液具备良好的抗氧化和抑菌能力，对四种致病菌的抑菌圈大小分别为 20.20±0.11、19.07±0.06、12.13±0.06 和 10.73±0.06 mm，对 DPPH 自由基、$ABTS^+$自由基和 OH 自由基的清除率分别达 89.45%、66.61% 和 94.5%。保鲜效果方面，浸泡组和喷涂组冷鲜羊肉的 pH、肉色、TVB-N 含量、TBARs 值、羰基及巯基含量、菌落总数和大肠菌群数等指标均显著优于空白组（$P$<0.05），其中两组 pH 在贮藏第 28 d 仍维持在鲜肉范围内，TBARs 值在 21 d 前处于可接受区间，贮藏期间羰基含量较空白组显著降低（$P$<0.05）；空白组样品第 7 d 即开始腐败变质，而喷涂组和浸泡组可分别将冷鲜羊肉贮藏期延长至 14 和 21 d。综上，芥末精油 Pickering 乳液可有效提升冷鲜羊肉的保鲜效果、延长货架期，其中 2.0% v/v 浓度的乳液抗氧化及抑菌性能最优，浸泡处理的保鲜成效优于喷涂处理，具备在肉制品保鲜领域推广应用的潜力。

**关键词:** 冷鲜羊肉, 芥末精油, Pickering 乳液, 保鲜效果, 抑菌特性

**中图分类号:** TS251.5+3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0407−13

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025080114　　本文网刊:

# Effect of Mustard Essential Oil Pickering Emulsion on the Preservation of Chilled Mutton

**LIANG Jiahui[1], WU Su[1,2,*], GAO Aiwu[1,2], YANG Xujin[1,2]**

（1.College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
2.Yang Xujin Innovation Studio, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China）

**Abstract:** This study explored the preservative effect and shelf-life extension of chilled mutton by coating with a mustard essential oil-based Pickering emulsion. It also provided data to support the practical application of such emulsions in meat preservation. The experiment involved applying a mustard essential oil Pickering emulsion as a surface coating on chilled mutton, and the study assessed the emulsion's antioxidant activity, antibacterial performance, and impact on mutton quality indicators. Results indicated that increasing the concentration of mustard essential oil significantly enhanced the emulsion's antibacterial effect ($P$<0.05), with varying inhibitory effects on different bacteria at the same concentration. At a 2.0% v/v concentration, the Pickering emulsion exhibited good antioxidant and antibacterial properties. The inhibition zones for four pathogenic bacteria measured 20.20±0.11, 19.07±0.06, 12.13±0.06, and 10.73±0.06 mm, respectively. The DPPH, $ABTS^+$,

**收稿日期:** 2025−08−13

**基金项目:** 内蒙古自然科学基金（2025MS03105）; 内蒙古自治区科技计划项目（2025YFDZ0085）。

**作者简介:** 梁佳慧（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工与安全控制, E-mail: liangjiahui0224@163.com。

*** 通信作者:** 乌素（1986−）, 女, 硕士, 实验师, 研究方向: 畜产品加工与安全控制, E-mail: wusu6911660@163.com。

and OH radical scavenging activities were 89.45%, 66.61%, and 94.5%, respectively. Regarding preservation, indicators such as pH, meat color, TVB-N content, TBARs value, carbonyl and thiol content, total bacterial count, and coliform count in the soaking and spraying groups were significantly better than those in the control group ($P$<0.05). Notably, the pH in both groups remained within the fresh meat range on the 28th day of storage. The TBARs value remained within the acceptable range within 21 days, and the carbonyl content during storage was significantly lower than that in the control group ($P$<0.05). The control group samples began to deteriorate by the 7th day, while the soaking and spraying groups extended the storage period to 14 and 21 days, respectively. In conclusion, the mustard essential oil Pickering emulsion effectively improves the preservation of chilled mutton and extends its shelf life, with the 2.0% v/v concentration offering optimal antioxidant and antibacterial performance. The soaking treatment outperformed the spraying method, showing potential for broader application in meat product preservation.

**Key words:** chilled mutton; mustard essential oil; Pickering emulsion; preservation effect; antibacterial properties

羊肉脂肪中不饱和脂肪酸比例较高，在加工、贮藏、流通中易受到微生物、贮藏条件及外源污染物等因素的影响，导致其氧化速率更快，易产生哈喇味和不良风味，羊肉水分含量和 pH 更适合某些特定微生物繁殖，从而造成其货架期缩短和营养品质下降[1]。植物性天然保鲜剂具有资源广、成本低、安全性高、方便提取等较多优点[2]。王雅南等[3] 采用肉桂精油-羟丙甲基纤维素乳液对冷鲜肉进行涂膜处理，结果显示，经该方法处理的肉样，其汁液损失率、挥发性盐基氮（TVB-N）含量及 pH 均低于未处理的对照组。Ojagh 等[4] 的研究则发现，壳聚糖-肉桂精油复合膜能显著降低冷藏期间虹鳟鱼的硫代巴比妥酸（TBA）值与过氧化值，有效延缓脂质氧化进程。此外，Wang 等[5] 将肉桂精油与生姜精油共同包埋于壳聚糖薄膜中，该复合膜可有效抑制猪肉样品中总微生物的生长繁殖，同时减缓 pH 的升高速度，并对脂质氧化起到明显的抑制作用。以上结果证实植物精油的复合涂膜能有效延长贮存时间、提升食品保鲜效果。

芥末精油俗称芥末油、芥子油，大多由芥菜籽蒸馏而来，具有强刺激性气味，易挥发，主要成分是异硫氰酸烯丙酯（Allylisothiocyanate, AITC），具有广谱的抑菌性。生鲜食品中常用作调味品，食品工业和农业领域也会用于抑菌杀菌[6]。王世静等[7] 比较了 14 种精油对真空包装冷鲜羊肉中分离出的 19 株腐败菌的抑制效果，抑菌效果最佳的为芥末精油，其次是牛至精油，将两种精油复配后，随着复配浓度增加，抑菌性逐渐增加。张英萍等[8] 研究发现添加 0.5% 的芥末粗多糖可显著降低牛肉糜的 TBARS 值，抑制脂肪氧化，添加 2.5% 的芥末粗多糖可减缓牛肉糜红度的劣变，显著抑制 pH 上升，减缓总巯基含量的下降。但是由于芥末精油含有较高比例的不饱和脂肪酸，极易氧化变质，且流动性、溶解性和化学稳定性较差，难以有效分散或稳定存在于食品和化妆品体系中，很大程度上制约了其在相关领域的应用拓展与产业化开发[9−10]。当前肉制品保鲜多采用 Pickering 乳液、微胶囊、复合可食性涂膜等技术，可有效抑制脂质氧化、延缓微生物生长[11]。

Pickering 乳液是一种以固体颗粒稳定乳液的新型体系，可以有效包埋和保护活性物质，提高其稳定性和生物利用度[12]。王盼盼等[13] 以绿花菜为研究对象，采用 1-甲基环丙烯（1-Methylcyclo-propene, 1-MCP）、芥末精油（Mustard essential oil, MEO）、1-MCP 处理复合芥末精油（1-MCP+MEO）对新鲜绿花菜进行保鲜处理，考察其对绿花菜贮藏期间品质的影响。结果表明 1-MCP+MEO 处理后绿花菜贮藏效果最优，有效地维持了绿花菜外观，避免了黄变和霉斑的出现，减缓叶绿素含量和维生素 C 降解速率。Pedro 等[14] 将 AITC 微胶囊应用于牛肉贮藏中，研究微胶囊对大肠杆菌的抗菌作用，结果表明添加 AITC 微胶囊能显著延长牛肉制品的保质期。陆宽等[15] 研究了 AITC 包合物和壳聚糖涂膜液制成的保鲜纸对冷鲜肉的保鲜效果。结果表明，含有 AITC 包合物的壳聚糖涂膜液对冷鲜肉的保鲜效果优于壳聚糖涂膜液及空白组，有效延缓挥发性盐基氮（TVB-N）和硫代巴比妥酸反应物值（TBARs）的上升，控制冷鲜肉 pH 上升，有效地抑制冷鲜肉的细菌总数增长。相比直接添加精油或单一乳液保鲜，芥末精油 Pickering 乳液可提高抑菌剂的稳定性和缓释性，延长作用时间，同时降低对羊肉感官的负面影响。

本文研究不同浓度芥末精油 Pickering 乳液的抗氧化活性和抑菌特性，针对性解决羊肉保鲜中氧化快、微生物难控制等核心痛点，为冷鲜羊肉保鲜提供新的解决方案，为 Pickering 乳液在肉制品保鲜领域的应用提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

芥末精油（精油纯度≥98%，货号 S27503）、低酯苹果果胶　上海源叶生物科技有限公司；食品级大豆分离蛋白　山东华一生物科技；羊后腿肉　呼和浩特市和林格尔县蒙赛特定点屠宰场，选取生长发育良好、健康无病、6 月龄羔羊（蒙古羊×小尾寒羊）进行屠宰。宰前禁食 12 h，禁水 3 h，屠宰后排酸处理 48 h，取后腿肉，置于4 ℃ 保温盒中，3 h 内运回实验室；金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*, *S. a*, CMCC26003）、沙门氏菌（*Salmonella*, CMCC50071）、单增李斯特菌（*Listeria monocytogenes*, CMCC54002）、

大肠杆菌（*Escherichia coli*, *E. c*, ATCC25922）　内蒙古农业大学食品科学与工程学院微生物实验室提供；增菌液、培养基　环凯微生物；5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)(98%)　索莱宝试剂公司；牛血清白蛋白　北京酷来搏科技有限公司；其他试剂均为分析纯。

SQP 万分之一电子天平　赛多利斯仪器有限公司；DGX-9143BC 电热鼓风干燥箱、HH-2 水浴锅　上海福玛实验设备有限公司；Allegrax-30R 高速冷冻离心机　贝克曼库尔特有限公司；VORTEX2 旋涡振荡器、Allbasic 研磨杯、HS4 磁力搅拌器　德国 IKA 公司；FSH-2 可调高速匀浆机　常州国华电器有限公司；SYNERGYH1 酶标仪　美国伯腾仪器有限公司；DW-SGL388A 超低温冰箱　青岛海尔特种电器有限公司；U-2910 紫外-可见分光光度计　日本 Hitachi 公司；pH-STAR 直插式 pH 计　天翔飞域国际有限公司；K9860 全自动凯氏定氮仪　海能未来技术集团股份有限公司；CR-20 色差仪　KONICAMINOLTA；SPX-150C 恒温培养箱　上海博讯实验有限公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　芥末精油 Pickering 乳液的制备

1.2.1.1　大豆分离蛋白及苹果果胶储备液的制备　参考 Geng 等[16] 的方法，略有修改。取 0.6 g 大豆分离蛋白，将其均匀分散于去离子水中。随后在常温条件下使用磁力搅拌器以 800 r/min 的速率持续搅拌 120 min，形成 0.6%(w/v)的溶液，最后置于 4 ℃ 冷藏环境中静置过夜，使其充分水合。

取 2.0 g 苹果果胶，将其均匀分散于 100 mL 去离子水中。随后在常温条件下使用磁力搅拌器以 800 r/min 的速率持续搅拌 120 min，形成 2.0%(w/v)的溶液，最后置于 4 ℃ 冷藏环境中静置过夜，使其充分水合。

1.2.1.2　Pickering 乳液的制备　参考袁楚珊等[17] 的方法，稍作修改。将 5 mL 配制好的大豆分离蛋白储备液与 5 mL 苹果果胶储备液混合，通过磁力搅拌器 650 r/min 搅拌 5 min，使两相均匀混合，逐滴加入 100、200、300、400、500 和 600 μL 的芥末精油后再逐滴加入 9.9、9.8、9.7、9.6、9.5、9.4 mL 的蒸馏水，磁力搅拌器 650 r/min 搅拌 30 min，得到浓度为 1.0%、2.0%、3.0%、4.0%、5.0% 的乳液。使用匀浆机在 11000 r/min 下匀浆 2 min，得到粗乳液，随后用超声细胞破碎机在 550 W 超声功率下进行超声处理（工作 4.0 s，间隔 2.0 s），工作时间为 10 min，制备成纳米级 Pickering 乳液。

1.2.2　芥末精油 Pickering 乳液抗氧化活性测定

1.2.2.1　DPPH 自由基清除能力的测定　参考 Liang 等[18] 的方法并进行修改。将 1 mL 芥末精油 Pickering 乳液加入离心管中，然后加入 4 mL 0.1 mmol/L DPPH 乙醇工作液，旋涡振荡器混合均匀，室温避光放置半小时。将样品混合溶液在 6000 r/min 的条件下离心 10 min 后，取上清液在波长 517 nm 处测定吸光度，重复测定三次。空白对照组：1 mL 同浓度乳液样品+4 mL 无水乙醇（用乙醇代替 DPPH 溶液）；阳性对照组：1 mL 0.2 mg/mL BHT 乙醇标准溶液+4 mL 0.1 mmol/L DPPH 乙醇溶液。DPPH 自由基清除率通过下式计算：

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

式中：$A_i$：样品和 DPPH 乙醇溶液的吸光度值；$A_j$：样品和乙醇溶液的吸光度值；$A_0$：无水乙醇和 DPPH 乙醇溶液的吸光度值。

1.2.2.2　$ABTS^+$自由基清除能力的测定　根据 Liu 等[19] 的方法并适当调整。首先，将 7.40 mmol/L ABTS 母液与等体积 2.6 mmol/L 过硫酸钾溶液充分混匀，置于暗处反应 12~16 h 使其充分氧化。然后，用无水乙醇稀释该溶液，使其在 734 nm 处的吸光值达到 0.70±0.02。取 5 mL 稀释液与 0.5 mL 待测样品于离心管中涡旋混匀，避光孵育 6 min 后，以 6000 r/min 离心处理 10 min 完成反应。最后，采用紫外-可见分光光度计测量上清液在 734 nm 处的吸光度。实验以 BHT 作为阳性对照。$ABTS^+$自由基的清除活性通过下式计算：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_s - A_0}{A_c}\right) \times 100$$

式中：$A_s$：样品与 ABTS 工作液混合的吸光度；$A_0$：样品与去离子水混合的吸光度；$A_c$：无水乙醇与 ABTS 工作液混合的吸光度。

1.2.2.3　OH 自由基清除能力的测定　参考 Jiang 等[20] 的方法，稍作修改。将 0.6 mL 的 $FeSO_4$ 溶液（6.0 mmol/L）与 0.6 mL $H_2O_2$ 溶液（6.0 mmol/L）在涡旋振荡器上混合均匀，加入 0.6 mL 水杨酸乙醇溶液（6.0 mmol/L）继续混合均匀，再向混合液中加入 2 mL 芥末精油 Pickering 乳液混合均匀。37 ℃ 反应 30 min 后，6000 r/min 离心 10 min，取上清液在 510 nm 处测定吸光度值。同样，制备不含样品的空白组和不含过氧化氢的对照组。在 510 nm 处测定吸光度值，代入以下公式计算羟基自由基清除率。

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

式中：$A_0$、$A_s$、$A_c$ 分别代表空白组、样品组、对照组的吸光度值。

1.2.3　芥末精油 Pickering 乳液抑菌性测定

1.2.3.1　菌悬液的制备　首先从−80 ℃ 超低温冰箱中取出冻存菌种，置于常温环境中缓慢解冻。随后分别以 2% 的体积比将菌种接入 LB 和 TSB 液体培养基中，置于 37 ℃ 恒温培养箱中培养 24 h 后，用无菌接种环蘸取少量菌悬液在固体培养基表面划线涂布。将已涂布的固体培养基放置于恒温培养箱（37 ℃）中

培养 24 h, 挑取形态良好的单菌落继续接种至液体培养基中, 37 ℃ 恒温培养箱中培养 24 h。培养完成后, 将菌液转移至 50 mL 无菌离心管中, 使用 4 ℃ 冷冻离心机以 8000 r/min 离心 5 min, 去除上清液收集沉淀。取沉淀加入无菌生理盐水中, 洗涤三次后, 将菌体混悬于无菌生理盐水中, 采用平板计数法测定菌悬液浓度。经平板计数后稀释至 $10^7$ CFU/mL 作为试验菌液备用。

1.2.3.2 抑菌圈(DIZ)的测定 参考吴晨光[21] 的方法并进行适当调整, 进行抑菌圈的测定, 实验过程中的所有操作均在无菌条件下进行。采用一次性塑料材质的培养皿(规格: 直径 90 mm), 向其中倾注厚度为 3 mm 的固体培养基底层并使其均匀分布。待其凝固后, 添加 200 μL 细菌悬浮液(浓度约 $10^7$ CFU/mL)。将牛津杯置于已凝固的培养基表面, 并向孔内滴入 100 μL 含不同浓度芥末精油 Pickering 乳液。随后将培养皿置于恒温培养箱内进行孵育。24 h 后, 采用十字交叉法测定抑菌圈的直径, 该操作重复三次。以无菌水作为空白对照实验。

1.2.4 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉品质指标测定

1.2.4.1 样品处理 将刀具与砧板经 75% 酒精消毒处理, 保鲜膜、托盘以及喷壶采用紫外线杀菌。于无菌超净工作台处, 剔除冷鲜羊肉表层脂肪及结缔组织, 随后将肉块均匀切分(每块约重 25 g, 每组 50 块)。把切分好的肉块置于已消毒的托盘之中, 并随机划分为三组实验样本, 即空白组、浸泡处理组与喷涂处理组, 以供后续实验使用。根据 1.2.2 抗氧化活性的测定, 综合选择最优的芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉进行表面涂膜处理。将浸泡组样品分别放入芥末精油 Pickering 乳液中浸泡 5 min; 喷涂组样品分别使用芥末精油 Pickering 乳液进行喷涂, 均匀喷涂两次, 每次间隔 5 min; 空白组不做任何处理。各组处理完毕后, 将每组样品于无菌室内进行双面风干处理 1 h, 随后将其密封于聚乙烯保鲜袋内, 于 4 ℃ 环境下贮藏 28 d, 分别在 0、7、14、21、28 d 随机取样进行品质分析。

1.2.4.2 pH 测定 参照 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准食品 pH 值的测定》对样品 pH 进行测定。

1.2.4.3 色泽测定 参照 Wang 等[5] 方法并进行适当调整, 利用色差仪测量样品的亮度 $L^*$值、红度 $a^*$值及黄度 $b^*$值的。在测量之前, 先用色差仪附带配套的黑白校正板进行校准。先将样品表面的水分擦干, 再将其置于色差杯中进行检测。每个样品选取三个不同位置进行测量, 并对五个样品重复此过程, 最终结果取平均值。

1.2.4.4 挥发性盐基氮测定 参照 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》。

1.2.4.5 TBARs 值的测定 参考 Wang 等[22] 的方法并进行适当调整。称取 5.0 g 待测样品, 将其剪碎后放入 100 mL 烧杯内。向烧杯中加入 25 mL 浓度为 7.5% 的三氯乙酸水溶液, 用磁力搅拌器持续混匀 30 min(烧杯用封口膜密封)。采用双层定性滤纸对混合物多次过滤。把 5 mL 滤液同 0.02 mol/L 的 2-硫代巴比妥酸(TBA)溶液相混合, 随后将其置于 95 ℃ 的恒温水浴环境中反应 30 min。待反应结束, 把该混合物冷却至室温(约 20 ℃)。转移至 50 mL 离心管, 在 5000×g 条件下离心 20 min, 收集上清液用于后续分析。分别在波长为 532 nm 和 600 nm 处测定吸光度, 每组平行测定 3 次。

$$\text{TBARs值(mg/kg)} = \frac{A_{532\,nm} - A_{600\,nm}}{155} \times \frac{1}{10} \times 72.6 \times 100$$

式中: $A_{532\,nm}$、$A_{600\,nm}$ 为波长在 532、600 nm 处的吸光度值。

1.2.4.6 蛋白质羰基含量的测定 基于 Liu 等[23] 的方法并适当修改。称取 1.0 g 待测样品置于 15 mL 离心管中, 加入 10 mL 浓度为 0.15 mol/L 的氯化钾溶液, 使用高速匀浆机以 10000 r/min 的速度进行三次间歇处理(每次持续 10 s)。将 100 μL 匀浆液加入 2 mL 离心管内, 接着添加 1 mL 质量分数为 10% 的三氯乙酸水溶液。将此混合物以 2000×g 离心 10 min, 弃上清液。向沉淀物中加入 1 mL 溶解于 2 mol/L 盐酸溶液的 0.2% 2,4-二硝基苯肼(DNPH)及 1 mL 2 mol/L 盐酸(对照实验), 室温避光反应 60 min, 期间每隔 10 min 涡旋振荡 30 s。反应完成后, 再加 1 mL 10% 三氯乙酸溶液, 充分振荡 30 s 后 2000×g 离心 10 min。弃上清, 加入 1.5 mL 由无水乙醇和乙酸乙酯按 1∶1 体积比配制的洗色液, 混匀后在 15000×g 的条件下离心 5 min, 此洗色过程重复两次。最后, 向沉淀加入 1.5 mL 的 6 mol/L 盐酸胍溶液(溶于 20 mmol/L $KH_2PO_4$, pH6.5), 涡旋混匀后, 在 4000×g 条件下离心 3 min。上清液于 370 nm 处测定羰基含量, 280 nm 处测定蛋白含量(以牛血清白蛋白为标准蛋白, 溶于 6 mol/L 盐酸胍溶液做标准曲线), 计算公式如下:

$$\text{羰基含量(nmol/mg pro)} = \frac{A_{370\,nm} \times 10^6}{22000 \times \text{蛋白浓度}}$$

式中: 22000 代表吸光系数, $mol^{-1} \cdot cm^{-1}$; $A_{370\,nm}$ 为波长在 370 nm 处的吸光度值; 蛋白浓度, mg/mL。

1.2.4.7 总巯基含量的测定 参考胡婷等[24] 的方法, 稍加修改。称取 1.0 g 待测样品, 加入 9 mL 浓度为 0.6 mol/L 的氯化钾溶液, 使用高速匀浆机以 10000 r/min 的转速间歇处理样品 3 次(每次 10 s)。将匀浆液经双层无菌脱脂纱布过滤后, 移取 100 μL 滤液, 与 2.5 mL 含 8 mol/L 尿素的磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L 磷酸二氢钾/磷酸氢二钾, 1 mmol/L 乙二胺四乙酸, pH8.0)混合, 随后加入 50 μL 浓度为

10 mmol/L 的 5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)(DTNB)溶液。充分涡旋振荡后，避光反应 15 min，以 4500×g 处理 5 min，收集上清液于 412 nm 波长处测定其吸光值。总巯基含量计算公式如下：

$$\text{总巯基含量(nmol/mg pro)} = \frac{A_{412\,nm}}{13600 \times \text{蛋白浓度}} \times 11 \times 10^6$$

式中：13600 为摩尔吸光系数，L·(mol·cm)$^{-1}$；$A_{412nm}$ 为波长在 412 nm 处的吸光度值。

1.2.4.8　微生物指标　菌落总数的测定参照 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定》测定。

大肠菌群计数的测定参照 GB 4789.3-2016《食品安全国家标准食品微生物学检验大肠菌群计数》测定。

冷鲜肉不得检出的致病菌，包括沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、志贺氏菌、致泻大肠埃希氏菌，分别参照 GB 4789.4-2024《食品安全国家标准食品微生物学检验沙门氏菌检验》、GB 4789.10-2016《食品安全国家标准食品微生物学检验金黄色葡萄球菌检验》第二法、GB 4789.5-2012《食品安全国家标准食品微生物学检验志贺氏菌检验》和 GB 4789.6-2016《食品安全国家标准食品微生物学检验致泻大肠埃希氏菌检验》测定。

### 1.3　数据处理

数据以平均值±标准差($\overline{X}$±SD)表示，使用 IBM SPSS Statistics24 软件进行单因素方差分析(ANOVA)，以此判定是否存在显著差异($P$<0.05 意味着具有统计学显著性)，最后运用 Origin 2021 软件绘图并拟合分析。

## 2　结果分析

### 2.1　芥末精油 Pickering 乳液的抗氧化活性评价

2.1.1　芥末精油 Pickering 乳液对 DPPH 自由基的清除效果　p-$\pi$ 共轭体系中的单电子是由苯环和 DPPH 自由基相互作用形成的。当这些含氮自由基与抗氧化剂发生反应时，会被清除，通过监测吸光度的变化，来评估芥末精油 Pickering 乳液对 DPPH 自由基的清除能力[25–26]。BHT(丁基化羟基甲苯)是一种具有强抗氧化能力、有效的自由基清除剂，常用作食品添加剂，本研究用作芥末精油 Pickering 乳液的阳性对照。如图 1 所示，BHT 的添加量达到国家标准允许的最大限量(0.2 g/kg)时，DPPH 自由基的清除率为 72.29%。由图 1 可知，随着芥末精油浓度的增加，芥末精油 Pickering 乳液清除 DPPH 自由基的能力呈现先上升后下降的趋势；当芥末精油浓度为 1.5% v/v 时，其清除效果为 93.77%，比 BHT 自由基清除率增加了 21.48%，上述现象可能的原因是该乳液具有较小的液滴尺寸和油滴外致密的保护层，从而提高了抗氧化活性[27]，这与陈云洁等[28] 的研究结果一致。

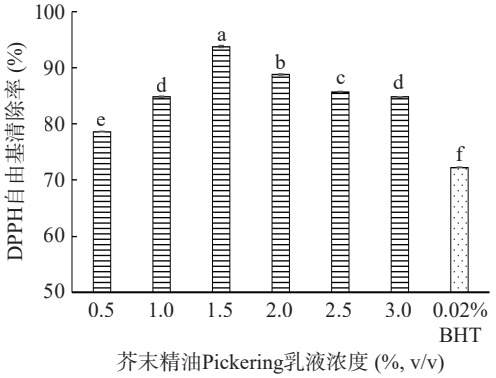



图 1　芥末精油 Pickering 乳液的 DPPH 自由基清除率

Fig.1　DPPH free radical clearance of mustard essential oil Pickering emulsion

注：不同小写字母表示显著性差异($P$<0.05)，图 2、图 3 同。

2.1.2　芥末精油 Pickering 乳液对 ABTS$^+$自由基的清除效果　如图 2 所示，芥末精油 Pickering 乳液对 ABTS$^+$自由基的清除能力随芥末精油浓度的增加而增强。在芥末精油浓度处于 0.5% v/v 到 2.5% v/v 之间时，BHT 对 ABTS$^+$自由基的清除效率更高。当芥末精油浓度高于 2.5% v/v 时，芥末精油 Pickering 乳液对 ABTS$^+$自由基的清除效果明显优于 BHT，芥末精油浓度为 3.0% v/v 时，该 Pickering 乳液对 ABTS$^+$自由基的清除率达到了 77.29%。说明芥末精油浓度达到某一特定阈值之后，芥末精油 Pickering 乳液对 ABTS$^+$自由基的清除能力显著提升($P$<0.05)，表现出更佳的效果。

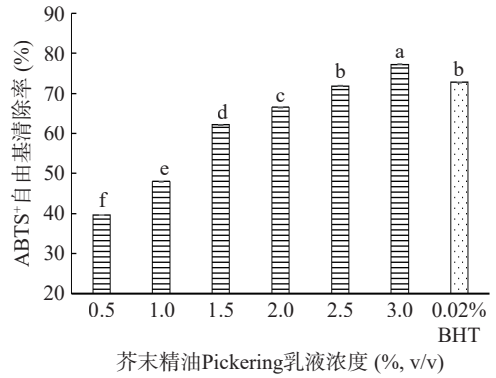



图 2　芥末精油 Pickering 乳液的 ABTS$^+$自由基清除率

Fig.2　ABTS$^+$ free radical clearance of mustard essential oil Pickering emulsion

2.1.3　芥末精油 Pickering 乳液对 OH 自由基的清除效果　如图 3 所示，随芥末精油浓度逐步上升，芥末精油 Pickering 乳液对羟基自由基的清除率随之提高，且不同浓度芥末精油 Pickering 乳液的 OH 自由基清除率均优于 BHT。当芥末精油在 Pickering 乳液中的添加量达到 1.5% v/v 时自由基清除率达到最大值 95.07%，而后随着芥末精油浓度的增加自由基清除率呈下降的趋势，可能是因为乳液粒径的增大导致自由基清除率有所下降。有研究发现，减小乳液液滴尺寸能够加速对自由基的吸收，从而有效降低氧化

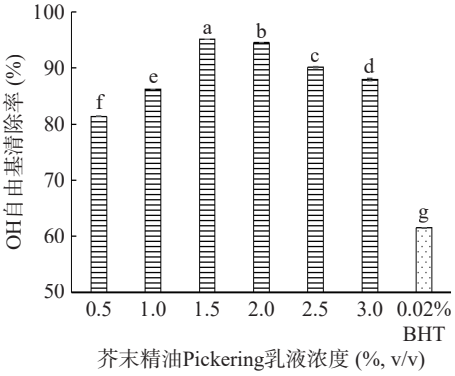



图 3 芥末精油 Pickering 乳液的 OH 自由基清除率

Fig.3 ·OH radical clearance of mustard essential oil Pickering emulsion

速率[29], 这与 Sadeghian 等[30] 的研究结果一致。芥末精油浓度为 2.0% v/v 时, Pickering 乳液具备良好的抗氧化能力, 对 DPPH 自由基、$ABTS^{+}$自由基和 OH 自由基的清除率分别达 89.45%、66.61% 和 94.5%。

## 2.2 芥末精油 Pickering 乳液的抑菌性效果

以无菌水为对照组, 表 1 呈现了不同浓度芥末精油 Pickering 乳液针对大肠杆菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌以及单核细胞增生李斯特菌所形成的抑菌圈直径情况。抑菌圈直径越大, 代表抗菌剂的活性越强。由表 1 和图 4 可知, 各浓度的芥末精油 Pickering 乳液对以上四种致病菌均具有抑制作用, 且随着芥末精油浓度的增加对致病菌的抑菌作用显著增强($P$<0.05)。3.0% v/v 芥末精油 Pickering 乳液对大肠杆菌和沙门氏菌培养 24 h 后的 DIZ 值分别为 28.21±0.1 mm 和 20.27±0.38 mm。当芥末精油浓度为 2.0% v/v 时, Pickering 乳液对四种致病菌的抑菌圈大小分别为 20.20±0.10、19.07±0.06、12.13±0.06 和 10.73±0.06 mm。此外, 由表 1 可知, 芥末精油 Pickering 乳液对大肠杆菌和沙门氏菌的抑制作用比对金黄色葡萄球菌、单增李斯特氏菌的抑制作用更强, 部分原因是革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌在菌株表面和细胞壁结构上存在差异[31]。芥末精油中的抗菌成分可能具有较高的亲脂性, 所以对于革兰氏阴性菌具有更强的抑制作用, 这与魏金环等[32] 的研究结果一致。

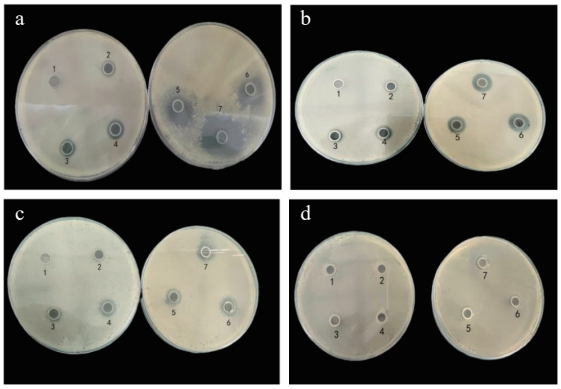



图 4 芥末精油 Pickering 乳液对四种致病菌的抑菌作用

Fig.4 Antibacterial effect of mustard essential oil Pickering emulsion on four kinds of pathogenic bacteria

注: a: 大肠杆菌; b: 沙门氏菌; c: 金黄色葡萄球菌; d: 单增李斯特菌。1: 无菌水; 2: 0.5% 芥末精油 Pickering 乳液; 3: 1.0% 芥末精油 Pickering 乳液; 4: 1.5% 芥末精油 Pickering 乳液; 5: 2.0% 芥末精油 Pickering 乳液; 6: 2.5% 芥末精油 Pickering 乳液; 7: 3.0% 芥末精油 Pickering 乳液。

根据 2.1 和 2.2 不同浓度芥末精油 Pickering 乳液的稳定性、抗氧化活性及抑菌性的研究结果综合考虑, 选择芥末精油浓度为 2.0% v/v 的芥末精油 Pickering 乳液作为冷鲜羊肉的涂膜液, 进行下一步实验。

## 2.3 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉保鲜效果的影响

2.3.1 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉 pH 的影响 pH 是评估冷鲜肉新鲜度的关键指标之一, 较低的 pH 还具有调节微生物平衡及抗菌的功能。对于肉制品而言, 鲜肉的 pH 应为 5.80~6.20, 次级 pH 为 6.30~6.40, 而 pH>6.40 则表明肉类已变质[33]。由图 5 可得, 随着贮藏时间的延长, 空白组、浸泡组和喷涂组的 pH 均呈现先急剧下降而后又逐渐上升的趋势。经过屠宰后, 羊肉发生无氧酵解, 乳酸与磷酸快速累积, 导致肉质 pH 下降。在贮藏 14 d 后 pH 再次升高, 可能由于肉品的成熟和保存过程中, 蛋白水解相关的酶类(如微生物蛋白酶及蛋白水解酶)逐步催化蛋白质分解, 使其转化为多肽与氨基酸、碱性基团释放导致了肉的 pH 逐步回升。在贮藏第 0 d 时,

表 1 芥末精油 Pickering 乳液对供试菌的抑菌圈

Table 1 Antibacterial zone of mustard essential oil pickering emulsion against tested bacteria

| 样品 | 抑菌圈直径(mm) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 大肠杆菌 | 沙门氏菌 | 金黄色葡萄球菌 | 单增李斯特菌 |
| 无菌水 | – | – | – | – |
| 0.5%芥末精油Pickering乳液 | $10.37±0.23^{Fb}$ | $11.13±0.15^{Fa}$ | $10.0±0.00^{Dc}$ | $10.0±0.00^{Dc}$ |
| 1.0%芥末精油Pickering乳液 | $12.07±0.06^{Eb}$ | $14.07±0.12^{Ea}$ | $10.0±0.00^{Dc}$ | $10.0±0.00^{Dc}$ |
| 1.5%芥末精油Pickering乳液 | $18.03±0.06^{Da}$ | $17.20±0.10^{Db}$ | $10.87±0.06^{Cc}$ | $10.43±0.12^{Cd}$ |
| 2.0%芥末精油Pickering乳液 | $20.20±0.10^{Ca}$ | $19.07±0.06^{Cb}$ | $12.13±0.06^{Bc}$ | $10.73±0.06^{Bd}$ |
| 2.5%芥末精油Pickering乳液 | $21.00±0.10^{Ba}$ | $19.83±0.29^{Bb}$ | $12.07±0.06^{Bc}$ | $10.09±0.10^{Dd}$ |
| 3.0%芥末精油Pickering乳液 | $28.21±0.10^{Aa}$ | $20.27±0.38^{Ab}$ | $14.07±0.06^{Ac}$ | $11.30±0.20^{Ad}$ |

注: 同列不同大写字母表示同一菌株不同浓度间差异显著($P$<0.05); 同行不同小写字母表示同一浓度不同菌株间差异显著($P$<0.05)。

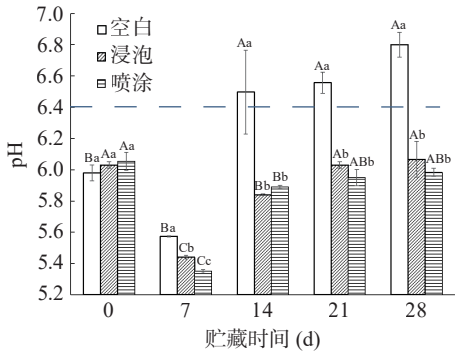



图 5　冷鲜羊肉在贮藏期间的 pH 变化

Fig.5　pH changes of chilled mutton during storage

注: 不同大写字母表示同组样品不同贮藏时间差异显著 ($P$<0.05); 不同小写字母之间表示同一贮藏时间不同组样品差异显著($P$<0.05), 图 7~图 11 同。

空白组与浸泡组、喷涂组鲜肉 pH 基本相近, 三组样品之间无显著性差异($P$>0.05)。随着贮藏时间延长, 空白组与喷涂组、浸泡组之间的 pH 产生显著性差异($P$<0.05); 而浸泡组和喷涂组仅第 7d 时 pH 有显著差异, 其余贮藏时段两组差异不显著($P$>0.05)。在第 14 d 时, 空白组 pH 已达到 6.49±0.12, 已经变质不可食用。浸泡组和喷涂组在贮藏结束后, pH 分别为 6.07±0.11 和 5.98±0.08, 还在鲜肉 pH 范围内。说明 2.0% 芥末精油 Pickering 乳液作为涂膜液应用于冷鲜羊肉中会改善肉类 pH, 具有良好的保鲜效果。

2.3.2　芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉色泽的影响　对消费者来说, 肉色常作为评估新鲜度和食品安全性的指标。使用色调指数 $L^*$、$a^*$和 $b^*$值来分析肉色, $L^*$值反映肉的亮度, 其数值增大意味着肉品表面光泽度的提升。如图 6 所示, 随着贮藏时间的延长, $L^*$值呈下降的趋势, 空白组从第 21 d 时 $L^*$值下降的最快, 下降率达到 28.86%。从第 21 d 开始, 浸泡组和喷涂组的 $L^*$值显著高于空白组($P$<0.05), 可能是芥末精油中的酚类成分抑制了蛋白质的变性过程, 进而减少了肌肉组织内自由水的扩散, 降低了其对光的反射效率, 最终导致 $L^*$值的变化幅度较小[34], 与 Xin 等[35] 的研究结果一致。在整个贮藏期间, 浸泡组和喷涂组之间差异不显著($P$>0.05); 前 14 d 空白组与浸泡组、喷涂组之间无显著差异($P$>0.05)。在第 28 d 时浸泡组和喷涂组的 $L^*$值还维持在较高水平为 39.42 和 41.9。$a^*$值在贮藏过程中其数值有所下降, $a^*$值的波动主要由肉制品中肌红蛋白(Mb)的变化引起[36–37]。空白组、浸泡组和喷涂组的 $a^*$值随着贮藏时间的增加而降低, 说明各组样品都发生了氧化使肌红蛋白变色。贮藏 0 d 时, 各组 $a^*$值差异不显著($P$>0.05)。从贮藏第 7 d 起, 浸泡组 $a^*$值显著高于空白组($P$<0.05); 贮藏 14~28 d, 浸泡组、喷涂组 $a^*$值均显著高于空白组($P$<0.05); 仅第 7 d 喷涂组与空白组无显著差异($P$>0.05)。在第 28 d 时, 浸泡组比空白组高出 17.50%, 喷涂组比空白组高出 18.81%, 说明 2.0% 芥末精油 Pickering 乳液作为涂膜液对冷鲜羊肉进行处理, 可以有效减缓肌红蛋白发生氧化, 维持鲜肉良好的色泽。$b^*$值表示鲜肉的黄度值, 较高的 $b^*$值表明肉品的氧化程度较高, 同时意味着细菌繁殖较为活跃[38]。随着储藏时间的延长, 浸泡组、喷涂组和空白组的 $b^*$值均呈增加趋势。贮藏期前 7 d, 空白组和浸泡组、喷涂组的 $b^*$值差异不显著($P$>0.05)。从第 21 d 开始, 浸泡组、喷涂组与空白组的 $b^*$值差异显著($P$<0.05), 而浸泡组与喷涂组在整个贮藏期间 $b^*$值无显著差异($P$>0.05)。以上结果表明, 2% 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉进行涂膜处理, 可以维持冷鲜羊肉的亮度, 减缓鲜肉氧化, 对鲜肉色泽具有改善作用。

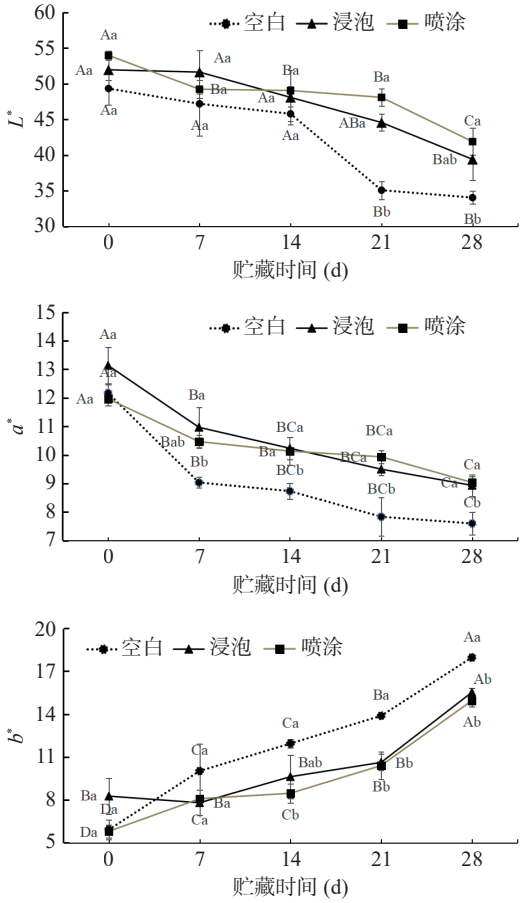



图 6　冷鲜羊肉贮藏期间色度值的变化

Fig.6　Change of colorimetric value of chilled mutton during storage

2.3.3　芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉 TVB-N 值的影响　由于腐败菌和内源酶引起的蛋白质降解, 生鲜肉的 TVB-N 值可能会随着时间的推移而增加。根据 GB/T 5009.44-2003《肉与肉制品卫生标准的分析方法》规定, 肉及肉制品的 TVB-N 含量<15 mg/100 g, 认为是新鲜肉; 当 TVB-N 含量>20 mg/100 g, 认为是变质肉。如图 7 所示, 随着贮藏时间的增加, 三组 TVB-N 值均呈上升趋势, 但空白组 TVB-N 值增加的速度最快。在贮藏第 14 d时, 空白组的 TVB-N 的含量为 26.17 mg/100 g, 已超过国家标准的规定

限值。浸泡组和喷涂组，贮藏在第 28 d 时的 TVB-N 值分别为 8.38 mg/100 g 和 10.45 mg/100 g，二者均符合鲜肉标准，且这两个处理组在贮藏期间 TVB-N 值差异不显著（$P$>0.05）；而空白组此时的 TVB-N 值为 46.29 mg/100 g，比浸泡组和喷涂组分别高 81.90% 和 77.42%。以上的结果分析表明，2.0% 芥末精油 Pickering 乳液可以延缓 TVB-N 的积累，对抑制蛋白质的氧化或分解有良好的效果。

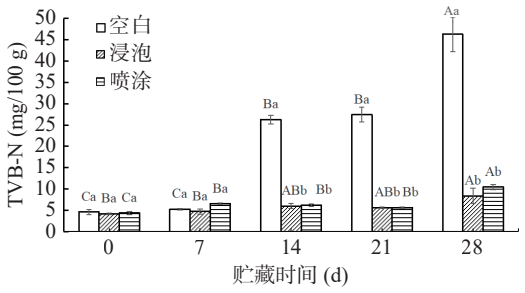



图 7 冷鲜羊肉在贮藏期间 TVB-N 值的变化

Fig.7 Changes of TVB-N value of chilled mutton during storage

2.3.4 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉 TBARs 值的影响 硫代巴比妥酸值（TBARs）可用来评价肉制品脂肪氧化的程度，脂质氧化所衍生的次级反应产物，能够与硫代巴比妥酸发生作用，进而生成粉红色的化合物。这一颜色变化不仅反映了肉制品中脂质氧化的情况，也反映了贮藏期间肉品品质的好坏[39]。一般而言，新鲜肉类的 TBARs 值处于 0.20~0.66 mg/kg，次级鲜肉类的 TBARs 值为 0.66~1.00 mg/kg。图 8 表明，随着贮藏时间的增加，三组样品的 TBARs 值总体呈现上升趋势。其中，浸泡组与喷涂组的 TBARs 值均显著低于空白对照组（$P$<0.05）。初始阶段，冷鲜羊肉的 TBARs 值为 0.28 mg/kg，反映出其较高的新鲜度。至贮藏第 7 d 时，空白组的 TBARs 值为 1.07 mg/kg，标志肉品已发生腐败变质。浸泡组和喷涂组在贮藏期间 TBARs 值增长缓慢，且在第 28 d 时两处理组的 TBARs 值约为 1.00 mg/kg 和 1.02 mg/kg，而空白组的 TBARs 值为 2.85 mg/kg，比浸泡组和喷涂组分别高出了 64.91% 和 64.21%。综上所述，以芥末精油 Pickering 乳液作为保鲜剂能够减缓鲜羊肉中不饱和脂肪酸的氧化速率。

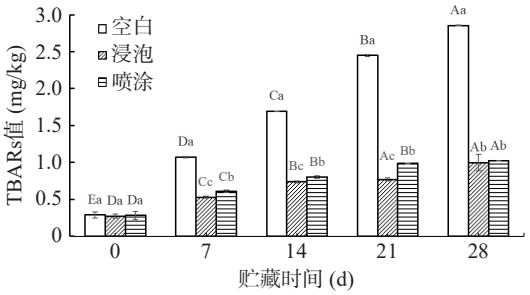



图 8 冷鲜羊肉在贮藏期间 TBARs 值的变化

Fig.8 Changes of TBARs value of chilled mutton during storage

2.3.5 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉羰基含量的影响 羰基含量增加，意味着蛋白质的氧化程度加剧[40]。如图 9 所示，空白组、浸泡组和喷涂组三组样品的羰基含量均随着贮藏时间的延长而增加，说明三组样品在贮藏期间均发生不同程度的氧化反应。在第 0 d 时，空白组与浸泡组、喷涂组的羰基含量值差异不显著（$P$>0.05）。从第 7 d 开始，空白组与浸泡组、喷涂组之间产生显著性差异（$P$<0.05），此时空白组羰基含量值为 3.52 nmol/mg pro，而浸泡组和喷涂组的羰基含量值分别为 2.36、2.60 nmol/mg pro，比空白组分别下降了 33.24% 和 26.14%。直到贮藏结束，空白组的羰基含量值依然显著高于浸泡组和喷涂组的羰基含量（$P$<0.05）。以上结果表明，2.0% 的芥末精油 Pickering 能有效抑制蛋白质氧化，清除自由基对蛋白质氨基酸侧链的攻击，这与上面芥末精油 Pickering 乳液对自由基清除率的研究结果一致。浸泡组与喷涂组的羰基含量从贮藏第 7 d 直到第 28 d，两组羰基含量值差异显著（$P$<0.05），贮藏 21 d 及 28 d 时，浸泡组羰基含量显著高于喷涂组（$P$<0.05），说明喷涂组抑制冷鲜羊肉蛋白质氧化的效果优于浸泡组。

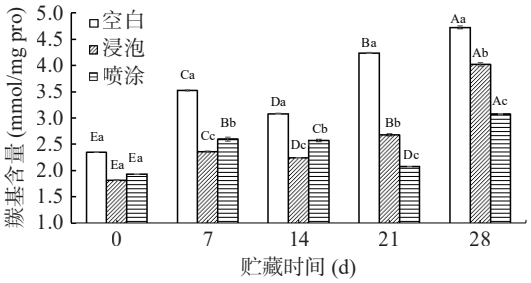



图 9 冷鲜羊肉在贮藏期间羰基含量的变化

Fig.9 Changes of carbonyl content in chilled mutton during storage

2.3.6 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉巯基含量的影响 肉制品营养价值会因蛋白质发生氧化而遭受损害，氧化过程中，蛋白质内的半胱氨酸残基能经由二硫键的生成过程，被氧化转变为胱氨酸，进而致使总巯基含量下降[41−42]。正因如此，巯基含量常被作为衡量蛋白质氧化程度的指标。如图 10 所示，于整个贮藏阶段，各组冷鲜羊肉样品的巯基含量均呈现降低趋势，从初始时的 42.35 nmol/mg pro（浸泡组）、35.09 nmol/mg pro（喷涂组）、38.33 nmol/mg pro（空白组），经过 28 d 贮藏后，巯基含量下降到 28.82 nmol/mg pro（浸泡组）、26.57 nmol/mg pro（喷涂组）、18.11 nmol/mg pro（空白组），表明各组鲜肉样品于贮藏阶段均呈现不同强度的蛋白质氧化现象。相较于空白对照组，喷涂处理组与浸泡处理组除初始时刻（第 0 d）外，在其余各贮藏时间节点，其巯基含量均显著高于空白对照组（$P$<0.05），且采用浸泡方式进行涂膜的鲜羊肉巯基含量也显著高于喷涂组（$P$<0.05）。结果表明，在鲜羊肉中应用芥末精油

Pickering 乳液能够起到延缓蛋白质氧化的效果, 也有类似研究表明, 将牛至精油和白藜芦醇加入猪里脊肉, 贮藏期间能够有效抑制蛋白质氧化[43]。

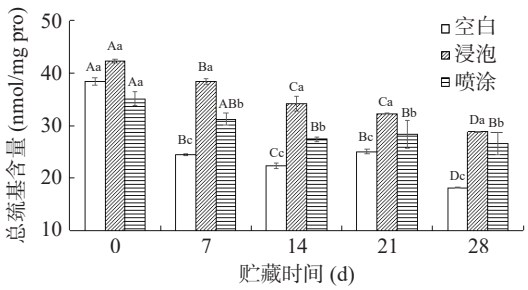



图 10　冷鲜羊肉在贮藏期间总巯基含量的变化

Fig.10　Changes of total sulfhydryl content in chilled mutton during storage

2.3.7　微生物指标

2.3.7.1　芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉菌落总数的影响　冷鲜羊肉在不同处理条件下菌落总数变化如图 11 所示。根据 GB/T 9961-2008《鲜、冻胴体羊肉》规定, 鲜、冻胴体羊肉菌落总数≤5.699 lg CFU/g($5\times10^5$ CFU/g)。鲜羊肉初始菌落总数范围为 2.29~2.51 lg CFU/g。随着贮藏时间延长三组样品的菌落总数均呈现上升趋势。在贮藏期间, 浸泡组和喷涂组样品的菌落总数较空白组增长缓慢。由于微生物的大量繁殖, 空白组贮藏在第 14 d 时, 菌落总数为 6.44 lg CFU/g, 已超过国家规定限值, 此时浸泡组和喷涂组的菌落总数为 4.41 和 4.25 lg CFU/g 均未超过国标规定。第 28 d 时, 浸泡组和喷涂组菌落总数分别为 5.21 和 5.66 lg CFU/g, 依然低于国家标准所规定的限值; 而空白组菌落总数为 7.84 lg CFU/g, 浸泡组和喷涂组菌落总数显著低于空白组($P<0.05$)。研究数据表明, 芥末精油 Pickering 乳液能够切实阻碍微生物的生长及繁衍过程, 由此延长冷鲜羊肉的货架期。Zhao 等[44] 研究发现, 在冷藏期间添加肉桂紫苏精油能够有效防止猪肉的微生物生长, 本文与之具有相似的研究结果。

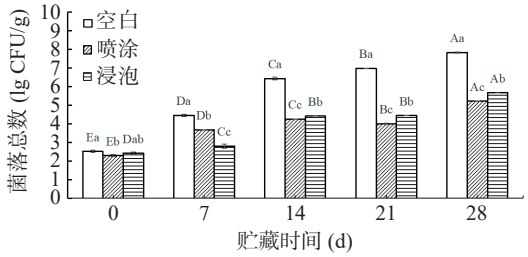



图 11　冷鲜羊肉在贮藏期间的菌落总数

Fig.11　Total number of colonies of chilled mutton during storage

2.3.7.2　芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉大肠菌群的影响　根据 GB/T 9961-2008 国家标准的规定, 鲜羊肉大肠菌群的含量应≤$1.0\times10^3$ MPN/100 g (10 MPN/g)。由表 2 可知, 随着贮藏时间的增加, 三组样品的大肠菌群数逐渐增加。空白组样品贮藏在第 7 d 时, 大肠菌群数为 240 MPN/g, 已经超过国家规定的限值, 而浸泡组和喷涂组样品大肠菌群数<3.0, 远小于空白组。浸泡组和喷涂组样品在贮藏在第 28 d 时, 大肠菌群数依然<10 MPN/g。以上结果表明, 芥末精油 Pickering 乳液对大肠菌群的抑菌效果良好, 可以有效延长鲜羊肉的保质期。李天骄等[45] 的研究发现, 辣木籽油抗菌膜可以有效抑制牛肉中大肠菌群数量增长, 本实验研究结果与之一致。

表 2　贮藏期间冷鲜羊肉中大肠菌群数(MPN/g)

Table 2　Number of coliform bacteria in cold fresh mutton during storage (MPN/g)

| 贮藏时间(d) | 0 | 7 | 14 | 21 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|
| 空白组 | <3.0 | 240 | >1100 | >1100 | >1100 |
| 浸泡组 | <3.0 | <3.0 | 3.0 | 3.0 | 6.2 |
| 喷涂组 | <3.0 | <3.0 | 3.0 | 6.1 | 9.4 |

2.3.7.3　芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉食源性致病菌的抑制作用　根据国家标准 GB/T 9961-2008 规定在鲜羊肉中沙门氏菌、志贺氏菌、金黄色葡萄球菌和致泻大肠埃希氏菌不得检出。由表 3 可知, 鲜羊肉的空白组样品, 第 7 d 已检出沙门氏菌的存在, 说明此时的冷鲜羊肉已经不可食用; 空白组检出沙门氏菌菌落, 可能由于冷藏初期浓度低于检出限; 但随着冷藏时间延长, 细菌会缓慢适应低温环境, 甚至通过分解羊肉中的营养物质(如蛋白质、脂肪)少量增殖, 最终达到检测方法可识别的浓度, 导致后期检出。而浸泡组和喷涂组的样品未出现沙门氏菌菌落。随着贮藏时间的增加, 空白组被沙门氏菌的侵染越来越严重, 而浸泡组直到贮存到第 28 d 时仍未检出。以上结果表明, 芥末精油 Pickering 乳液对沙门氏菌具有一定的抑制效果, 可以延长冷鲜羊肉的保质期, 与张欣悦等[46] 的研究结果相似。

表 3　芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉贮藏期间沙门氏菌的影响

Table 3　Effect of mustard essential oil Pickering emulsion on *Salmonella* in cold mutton during storage

| 贮藏时间(d) | 0 | 7 | 14 | 21 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|
| 空白组 | 未检出 | 检出 | 检出 | 检出 | 检出 |
| 浸泡组 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 |
| 喷涂组 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 检出 |

如表 4 所示, 在第 0 d 时, 空白组、浸泡组和喷涂组均未受到志贺氏菌的侵染; 但是从第 7 d 开始, 空白组检出志贺氏菌菌落, 因为鲜肉是微生物的天然培养基, 所以 4 ℃ 贮藏在第 7 d 时未做任何处理的鲜羊肉易受到志贺氏菌的侵染; 而使用芥末精油 Pickering 乳液做涂膜液的浸泡组和喷涂组样品, 仍保持鲜肉状态未受到志贺氏菌的侵染。直到贮藏第 28 d 时, 喷涂组样品也检出志贺氏菌菌落, 而浸泡组仍未检出。以上结果表明, 将芥末精油 Pickering 乳液采用浸泡的方式对冷鲜羊肉进行处理效果更好。

表 4 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉贮藏期间志贺氏菌的影响

Table 4 Effect of pickering emulsion with mustard essential oil on *Shigella* during storage of chilled mutton

| 贮藏时间(d) | 0 | 7 | 14 | 21 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|
| 空白组 | 未检出 | 检出 | 检出 | 检出 | 检出 |
| 浸泡组 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 |
| 喷涂组 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 检出 |

由表 5 可知,空白组、浸泡组和喷涂组三组鲜羊肉样品在 0、7、14 d 的检测中,均未发现金黄色葡萄球菌。在第 21 d 时,空白组的 $10^{-2}$、$10^{-3}$、$10^{-4}$ 的样品稀释液在 B-P 平板上显现出大量较为明显的圆形、黑色有光泽的菌落;而浸泡组和喷涂组的 $10^{-2}$、$10^{-3}$ 和 $10^{-4}$ 的样品稀释液在 B-P 平板上均未出现菌落。贮藏在第 28 d 时,空白组的 B-P 平板上均出现了黑色且有光泽的菌落,数量多且菌落较大;喷涂组的 $10^{-2}$ 和 $10^{-3}$ 样品稀释液在 B-P 平板上呈现出少量且微小的菌落,$10^{-4}$ 稀释液没有菌落长出;浸泡组 $10^{-2}$ 的样品稀释液在 B-P 平板上长出 5 个微小的黑色且有光泽的菌落,$10^{-3}$ 和 $10^{-4}$ 的样品稀释液在 B-P 平板上未长出菌落。以上结果表明,芥末精油 Pickering 乳液对金黄色葡萄球菌有明显的抑制作用,且采用浸泡的方式应用于冷鲜羊肉中比喷涂抑制效果好,可能的原因是浸泡处理样品更容易进入肉样内部,比喷涂处理浸入的量更大。Souza 等[47] 发现百里香精油在奇亚胶中的包埋冻干制成的颗粒应用在生鲜猪肉香肠中,可以抑制微生物生长且较低凝固酶阳性葡萄球菌数;舒娟等[48] 发现鲁甸青花椒精油可明显抑制金黄色葡萄球菌的生长,本文研究结果均与之一致。以上结果表明,芥末精油 Pickering 乳液对金黄色葡萄球菌具有一定的抑制效果,可以延长冷鲜羊肉的保质期。

表 5 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉贮藏期间金黄色葡萄球菌的影响

Table 5 Effect of mustard essential oil Pickering emulsion on *Staphylococcus aureus* during storage of chilled mutton

| 贮藏时间(d) | | 0 | 7 | 14 | 21 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 空白组 | $10^{-2}$ | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 检出 | 检出 |
| | $10^{-3}$ | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 检出 | 检出 |
| | $10^{-4}$ | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 检出 | 检出 |
| 浸泡组 | $10^{-2}$ | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 检出 |
| | $10^{-3}$ | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 |
| | $10^{-4}$ | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 |
| 喷涂组 | $10^{-2}$ | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 检出 |
| | $10^{-3}$ | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 检出 |
| | $10^{-4}$ | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 |

由表 6 可知,贮藏前 7 d 空白组、浸泡组和喷涂组样品均未检出致泻大肠埃希氏菌;贮藏第 14 d 到第 28 d 时,空白组样品在 MAC 培养基和 EMB 培养基中均出现致泻大肠埃希氏菌的典型菌落;而浸泡组和喷涂组样品在直到贮藏第 28 d 时仍未出现致泻大肠埃希氏菌的菌落。以上结果表明,芥末精油 Pickering 乳液对致泻大肠埃希氏菌的抑菌效果非常好,这也与上面的芥末精油 Pickering 乳液的抑菌性的结果相一致。

表 6 芥末精油 Pickering 乳液对冷鲜羊肉贮藏期间致泻大肠埃希氏菌的影响

Table 6 Effect of Pickering emulsion with mustard essential oil on diarrheal *Escherichia coli* of cold fresh mutton

| 贮藏时间(d) | 0 | 7 | 14 | 21 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|
| 空白组 | 未检出 | 未检出 | 检出 | 检出 | 检出 |
| 浸泡组 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 |
| 喷涂组 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 | 未检出 |

以上结果表明,芥末精油 Pickering 乳液对沙门氏菌、志贺氏菌、金黄色葡萄球菌及致泻大肠埃希氏菌均表现出良好的抑制作用,能够有效延缓冷鲜羊肉中食源性致病菌的生长。空白组在贮藏第 7 d 即可检出沙门氏菌与志贺氏菌,第 14 d 检出致泻大肠埃希氏菌,第 21 d 检出金黄色葡萄球菌;浸泡组在 28 d 贮藏周期内,上述 4 种致病菌大多未检出,仅金黄色葡萄球菌高接种梯度下于 28 d 出现检出;喷涂组可将沙门氏菌、志贺氏菌的检出推迟至 28 d,对致泻大肠埃希氏菌在整个贮藏期均未检出。相较于空白组,Pickering 乳液处理可显著推迟冷鲜羊肉食源性致病菌的检出时间。

## 3 结论

芥末精油存在易挥发、水溶性差的特性,这极大限制了其在食品保鲜领域的应用。本研究通过 Pickering 乳液对芥末精油进行包封,有效解决了上述问题:一方面,乳液结构能显著减缓精油活性成分的挥发速率,同时隔绝其与氧气的直接接触,大幅增强精油稳定性;另一方面,乳液赋予精油亲水特性,使其更易在冷鲜羊肉表面均匀附着,进而提升了精油的抗氧化与抑菌效能,且在特定浓度下,该乳液对自由基的清除效果优于传统抗氧化剂 BHT,验证了其在活性保留与功能强化上的优势。

冷鲜羊肉在低温贮藏过程中,仍易因脂质氧化加剧、微生物大量繁殖而腐败变质,具体表现为:随贮藏时间延长,样品 pH 呈先降后升趋势,脂质(TBARs 值升高)与蛋白质(羰基含量增加)氧化程度持续加剧,色泽指标中亮度($L^*$)与红度($a^*$)逐渐下降、黄度($b^*$)逐渐上升,感官与品质劣变显著。而芥末精油 Pickering 乳液能有效缓解上述劣变进程,且其效果呈现浓度依赖性:随着乳液中芥末精油浓度的增加,对冷鲜羊肉氧化进程的延缓作用显著增强,对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、沙门氏菌、单核细胞增生李斯特菌四种致病菌的抑菌效果也同步提升。其中,针对金黄色葡萄球菌与大肠杆菌,抑菌圈直径与乳液浓度间存在显著的剂量依赖关系,且该乳液对革

兰氏阴性菌（大肠杆菌、沙门氏菌）的抑菌活性，显著优于对革兰氏阳性菌（金黄色葡萄球菌、单核细胞增生李斯特菌）的抑制效果，进一步明确了其抑菌靶向性特征。综上，芥末精油 Pickering 乳液能有效抑制冷鲜羊肉的氧化与微生物污染，显著延长其货架期，具备在肉类及肉制品保鲜领域推广应用的潜力。

本研究成功构建了基于水包油（O/W）型 Pickering 乳液的芥末精油递送体系，为脂溶性、易挥发精油在食品保鲜中的应用提供了新的技术路径。但当前体系仍存在局限性：其一，功能聚焦于单一精油的递送，尚未探索对多种生物活性成分（如其他天然抑菌剂、抗氧化剂）的协同负载能力，难以满足复杂食品体系的多维保鲜需求，后续需进一步优化乳液配方与结构，提升其对多组分活性物质的适配性，拓展功能边界与应用场景；其二，芥末精油自身的强烈刺激性气味，可能在高浓度应用时影响冷鲜羊肉的原有风味，虽可通过降低添加量缓解，但易削弱保鲜效果，因此后续需重点研究气味掩盖技术（如复配香型精油、添加风味调节剂）或通过乳液微结构设计（如芯材包埋深度优化）降低刺激性气味释放，在保证保鲜效能的同时，兼顾产品感官品质，推动该技术向实际生产应用转化。

© 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］ NYCHAS G J E, SKANDAMIS P N, TASSOU C C, et al. Meat spoilage during distribution[J]. Meat Science, 2008, 78(1−2): 77−89.

［2］ 纪淑娟, 隋时. 植物提取物用于果蔬防腐保鲜研究的进展[J]. 食品与药品, 2007(9): 22−31. ［JI Shujuan, SUI Shi. Progress on antiseptic and refreshing effect of plant extract on fruit and vegetable[J]. Food and Drug, 2007(9): 22−31.］

［3］ 王雅南, 王稳航. 肉桂精油-羟丙甲基纤维素乳液涂层对冷鲜肉保鲜效果的影响[J]. 中国食品添加剂, 2018(4): 164−170. ［WANG Yanan, WANG Wenhang. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose emulsified cinnamon oil coatings on the quality of chilled pork[J]. China Food Additives, 2018(4): 164−170.］

［4］ OJAGH S M, REZAEI M, RAZAVI S H, et al. Effect of chitosan coatings enriched with cinnamon oil on the quality of refrigerated rainbow trout[J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 193−198.

［5］ WANG Y F, XIA Y W, ZHANG P Y, et al. Physical characterization and pork packaging application of chitosan films incorporated with combined essential oils of cinnamon and ginger[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(3): 503−511.

［6］ 李燕敏, 黄佳, 张昱, 等. 芥末油中挥发性成分的提取与分析[J]. 中国食品添加剂, 2016(9): 188−193. ［LI Yanmin, HUANG Jia, ZHANG Yu, et al. Extraction and analysis of volatile compounds in mustard oil by SPME-GC-MS[J]. China Food Additives, 2016(9): 188−193.］

［7］ 王世静, 柴笑玉, 田寒雪, 等. 聚丙烯/明胶双层膜的制备及其对真空冷鲜羊肉腐败菌的抑制作用[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(14): 44−51. ［WANG Shijing, CHAI Xiaoyu, TIAN Hanxue, et al. Preparation of OPP/gelatin bilayers and its inhibitory effect on spoilage bactertia of vacuum-packed chilling fresh lamb[J]. Food Research and Development, 2023, 44(14): 44−51.］

［8］ 张英萍, 高爱武, 成立新, 等. 芥末粗多糖对牛肉糜质构特性及氧化稳定性的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2022, 43(2): 95−104. ［ZHANG Y P, GAO A W, CHENG L X, et al. Effects of mustard crude polysaccharides on texture property and oxidative stability of beef emulsion[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2022, 43(2): 95−104.］

［9］ 黎静斌. 肉桂精油乳液的制备及其对南丰蜜桔保鲜效果的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. ［LI Jingbin. Preparation of cinnamon essential oil emulsion and its effect on preservation of Nanfeng tangerine[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.］

［10］ 曹莹莹, 包小康, 赵楠, 等. 复凝聚法制备芥末油微胶囊工艺优化及其理化特性分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 154−160. ［CAO Yingying, BAO Xiaokang, ZHAO Nan, et al. Process optimization and physicochemical properties analysis of mustard oil microcapsules prepared by complex coacervation[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 154−160.］

［11］ 王聚瑾, 邹峥嵘. 植物精油在食品保鲜中应用的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(4): 385−393. ［WANG Jujin, ZOU Zhengrong. Research progress on the application of plant essential oils in food preservation[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(4): 385−393.］

［12］ 熊治强. Pickering 乳液模板法制备玉米醇溶蛋白基微胶囊[D]. 无锡: 江南大学, 2024. ［XIONG Zhiqiang. Fabrication of zein-based microcapsules based on pickering emulsion template[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.］

［13］ 王盼盼, 管维良, 孙志栋, 等. 芥末精油复合 1-甲基环丙烯保鲜处理对绿花菜贮藏期间品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 270−279. ［WANG Panpan, GUAN Weiliang, SUN Zhidong, et al. The effect of mustard essential oil combined 1 methylcyclopropene preservation treatment on the quality of broccoli during refrigerated storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 270−279.］

［14］ PEDRO A CHACON, ROBERTO A BUFFO, RICHARD A HOLLEY. Inhibitory effects of microencapsulated allyl isothiocyanate（AIT）ainst *Escherichia coli* O157: H7 in refrigerated, nitrogen packed, finely chopped beef[J]. Food Microbiology, 2006, 107: 231−237.

［15］ 陆宽, 黄运安, 武剑, 等. 异硫氰酸烯丙酯包合物壳聚糖复合保鲜纸对冷鲜肉的保鲜效果[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(4): 117−119,123. ［LU Kuan, HUANG Yunan, WU Jian, et al. Preservation effects of allyl isothiocyanate inclusion compound chitosan tin foil on chilled meat[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(4): 117−119,123.］

［16］ GENG M J, FENG X M, WU X X, et al. Encapsulating vitamins C and E using food-grade soy protein isolate and pectin particles as carrier: Insights on the vitamin additive antioxidant effects[J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135955.

［17］ 袁楚珊, 程小梅, 孙畅, 等. 添加柑橘果胶和吐温-80 的芥末精油纳米乳液稳定性、抑菌活性及其在砂糖橘保鲜中的应用[J]. 食品科学, 2024, 45(16): 213−222. ［YUAN Chushan, CHENG Xiaomei, SUN Chang, et al. Stability and bacteriostatic activity of

mustard essential oil nanoemulsion fortified with citrus pectin and tween-80 and its application in the preservation of 'Shatangju' mandarin[J]. Food Science, 2024, 45(16): 213−222.]

[18] LIANG D Y, FENG B J, LI N, et al. Preparation, characterization, and biological activity of *Cinnamomum cassia* essential oil nano-emulsion[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106009.

[19] LIU M, LIANG J Y M, JING C, et al. Preparation and characterization of *Lycium barbarum* seed oil pickering emulsions and evaluation of antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134906.

[20] JIANG X, YU YF, MA ST, et al. Chitosan nanoparticles loaded with *Eucommia ulmoides* seed essential oil: preparation, characterization, antioxidant and antibacterial properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128820.

[21] 吴晨光. 香芹酚乳液的制备及其在草莓保鲜中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [WU Chenguang. Preparation of carvacrol emulsion and its application in strawberry preservation[D]. Wuxi: Jiangnan Uiversity, 2023.]

[22] WANG J Y, LI L R, LI Y H, et al. Characterization of thyme essential oil microcapsules and potato starch/pectin composite films and their impact on the quality of chilled mutton[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141692.

[23] LIU Y Y, ZHANG L T, GAO S, et al. Effect of protein oxidation in meat and exudates on the water holding capacity in bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) subjected to frozen storage[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131079.

[24] 胡婷, 屈莎, 唐善虎, 等. 低盐环境下蛋白质氧化对牦牛肌肉结构及持水性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 38−45. [HU Ting, QU Sha, TANG Shanhu, et al. Effect of protein oxidation on the structure and water-holding capacity of yak muscle under low salinity environment[J]. Food Science, 2023, 44(10): 38−45.]

[25] WU H J, LU J Y, XIAO D, et al. Development and characterization of antimicrobial protein films based on soybean protein isolate incorporating diatomite/thymol complex[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106138.

[26] 蔡国强, 徐雯雯, 罗天骥, 等. 山茶油纳米乳液的制备、表征及抗氧化性分析[J]. 中国油脂, 2025, 50(3): 146−152. [CAI Guoqiang, XU Wenwen, LUO Tianji, et al. Preparation, characterization and antioxidant properties of oil-tea camellia seed oil nanoemulsion[J]. China oils and fats, 2025, 50(3): 146−152.]

[27] REN G R, LIU J C, SHI J Y, et al. Improved antioxidant activity and delivery of peppermint oil pickering emulsion stabilized by resveratrol-grafted zein covalent conjugate/quaternary ammonium chitosan nanoparticles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127094.

[28] 陈云洁, 徐艳阳, 王雪松. 超声辅助均质制备大豆分离蛋白-菊粉基人参皂苷纳米乳液的工艺优化和抗氧化活性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(2): 307−316. [CHEN Yunjie, XU Yanyang, WANG Xuesong. Process optimization of ultrasound-assisted homogenization preparation and antioxidant activity analysis of soybean protein isolate and inulin based ginsenoside nanoemulsion[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2024, 15(2): 307−316.]

[29] KERAMAT M, KHEYNOOR N, GOLMAKANI M T. Oxidative stability of pickering emulsions[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100279.

[30] SADEGHIAN S F, MAJDINASAB M, NEJADMANSOURI M, et al. Effects of natural antioxidants and high-energy fabrication methods on physical properties and oxidative stability of flaxseed oil-in-water nanoemulsions[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 92: 106277.

[31] RAN R M, ZHANG X X, GUO X, et al. An "intelligent-sensing and targeted release" antimicrobial Pickering emulsion for banana preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110325.

[32] 魏金环, 王子坤, 陆蕊, 等. 负载百里香精油/大豆油/百里香酚的纳米乳液制备及其性能研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(19): 174−182. [WEI Jinhuan, WANG Zikun, LU Rui, et al. Preparation and performance study of nanoemulsion loaded with thyme essential oil, soybean oil, and thymo[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(19): 174−182.]

[33] 刘倩. 孜然、花椒、肉桂精油复配对冷鲜羊肉保鲜效果的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019. [LIU Qian. Study on the fresh-keeping Effect of cumin, pepper and cinnamon essential oil on chilled mutton[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.]

[34] GUO Z L, GE X Z, YANG L H, et al. Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105345.

[35] XIN K Q, JI X Y, GUO Z L, et al. Pitaya peel extract and lemon seed essential oil as effective sodium nitrite replacement in cured mutton[J]. LWT, 2022, 160: 113283-.

[36] OLIVERA D F, BAMBICHA R, LAPORTE G, et al. Kinetics of colour and texture changes of beef during storage[J]. Journal of food science and technology, 2013, 50: 821−825.

[37] TUSHAR Z H, RAHMAN M M, HASHEM M A. Metmyoglobin reducing activity and meat color: A review[J]. Meat Research, 2023, 3(5): 1−8.

[38] 魏瑾雯. 西兰花叶多酚—木薯淀粉/果胶复合膜对冷鲜羊肉保鲜效果的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022. [WEI Jinwen. Effect of broccoli leaf polyphenols-tapioca starch/pectin composite film on the preservation of chilled mutton[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022.]

[39] WANG X Y, XIE J, CHEN X J. Differences in lipid composition of Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) during storage at 0 ℃ and 4 ℃[J]. Food Research International, 2021, 143: 110233.

[40] 陶迎梅. 蛋白质氧化修饰介导冷藏滩羊肉品质变化的机理研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021. [TAO Yingmei. The mechanism of protein oxidation mediated quality changes in lamb of Tan sheep during refrigerated storage[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.]

[41] 段嘉萤, 周天明, 李春保, 等. 红景天苷体外抗氧化及对猪肉糜氧化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 85−92. [DUAN Jiaying, ZHOU Tianming, LI Chunbao, et al. *In vitro* antioxidant activity of salidroside and its effect on the oxidative properties of minced pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 85−92.]

[42] MCKERCHAR H J, CLERENS S, DOBSON R C J, et al. Protein-protein crosslinking in food: Proteomic characterisation methods, consequences and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 217−229.

[43] XIONG Y, LI S M, WARNER R D, et al. Effect of oregano essential oil and resveratrol nanoemulsion loaded pectin edible

coating on the preservation of pork loin in modified atmosphere packaging[J]. Food Control, 2020, 114: 107226.

[44] ZHAO R, GUAN W L, ZHENG P A, et al. Development of edible composite film based on chitosan nanoparticles and their application in packaging of fresh red sea bream fillets[J]. Food control, 2022, 132: 108545.

[45] 李天娇, 孙立佳, 史晓龙, 等. 辣木籽油抗菌膜制备及对牛肉保鲜效果的研究[J]. 吉林农业科技学院学报, 2024, 33(5): 1−6. [LI Tianjiao, SUN Lijia, SHI Xiaolong, et al. Preparation of moringa oleifera seed oil antibacterial film and effection on the preservation of beef[J]. Journal of Jilin Agricultural Science and Technology University, 2024, 33(5): 1−6.]

[46] 张欣悦, 杨钰娟, 孔祥翔, 等. 重组酶介导的等温扩增结合 CRISPR/Cas12a 检测志贺氏菌和克罗诺杆菌[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(11): 35−44. [ZHANG Xinyue, YANG Yujuan, KONG Xiangxiang, et al. Detection of *Shigella* and *Cronobacter* using recombinase-aided amplification combined with CRISPR/Cas12a[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2024, 15(11): 35−44.]

[47] SOUZA A S, BORGES C D, RADÜNZ M, et al. Encapsulation of thyme essential oil (*Thymus vulgaris*) in chia mucilage (*Salvia hispanica* L.) and its application in fresh pork sausage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 285: 138284.

[48] 舒娟, 张雪研, 宋爽, 等. 鲁甸青花椒精油对金黄色葡萄球菌的抑菌活性及机制研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 178−189. [SHU Juan, ZHANG Xueyan, SONG Shuang, et al. Study on the antibacterial activity and mechanism of ludian green pepper (*Z. schinifolium*) essential oils against staphylococcus aureus[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(23): 178−189.]