



杨焕彬,曾庆培,余艺敏,等.玉米醇溶蛋白/姜黄素/曲酸复合膜对冷藏鸡肉保鲜效果的影响[J].轻工学报,2025,40(3):10-18.
YANG H B,ZENG Q P,SHE Y M,et al. Effect of zein/curcumin/kojic acid composite film on the preservation of refrigerated chicken[J]. Journal of Light Industry,2025,40(3):10-18. DOI:10.12187/2025.03.002

玉米醇溶蛋白/姜黄素/曲酸复合膜对冷藏鸡肉保鲜效果的影响

杨焕彬¹,曾庆培¹,余艺敏¹,孙欣²,王晓庆²,刘晓丽²

1. 广东无穷食品集团有限公司,广东 潮州 515700;
2. 江南大学 食品学院/江苏省食品安全与质量控制协同创新中心,江苏 无锡 214122

摘要:为开发具有良好保鲜效果的天然生物基复合膜材料,以玉米醇溶蛋白(Zein)、姜黄素(Curcumin, CUR)和曲酸(Kojic Acid, KA)为原料制备 Zein/CUR/KA 复合膜,测定其厚度和机械性能,并将其应用于冷藏鸡肉保鲜,通过测定冷藏鸡肉的 pH 值、持水力、菌落总数、挥发性盐基氮(TVB-N)含量等,研究该复合膜对冷藏鸡肉的保鲜效果。结果表明:相较于 Zein 膜,Zein/CUR/KA 复合膜的厚度更大,机械性能更优,其拉伸强度和断裂伸长率分别为 25.56 MPa 和 62.49%。当冷藏至第 10 d 时,经 Zein/CUR/KA 复合膜处理的鸡肉,其 pH 值维持在 5.9,显著低于对照(CK)组(6.4, $P < 0.05$);仍能保持 65.23%的持水力,显著高于其余组($P < 0.05$);菌落总数控制在 6.1 lg CFU/g,较 CK 组(8.5 lg CFU/g)低两个数量级;TVB-N 含量低于食品安全标准规定的 0.20 mg/g,硫代巴比妥酸还原值(TBARS)为 0.007 7 mg/g,较 CK 组(0.013 5 mg/g)下降了 42.96%;总巯基和活性巯基含量分别降低至 10.3 nmol/mg 和 9.2 nmol/mg,蛋白二级结构的变化幅度最小。因此,Zein/CUR/KA 复合膜具有较好的机械性能、阻隔性能、抑菌性和抗氧化性,能有效延缓冷藏鸡肉的水分流失、脂肪氧化和蛋白质变性,表现出良好的冷藏鸡肉保鲜效果。

关键词:玉米醇溶蛋白;姜黄素;曲酸;复合膜;鸡肉保鲜

中图分类号:TS206.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2025)03-0010-09

0 引言

鸡肉营养价值高、口感好,可被加工成多种类型的产品。鸡肉中富含大量优质蛋白、脂肪等营养物质,但这些物质的存在使鸡肉在贮藏和运输过程中极易发生氧化变质和微生物污染,从而降低产品

品质^[1]。因此,寻找合适的保鲜技术成为行业关注的重点。目前,物理保鲜(如低温、气调、辐射等)、化学保鲜(如添加化学防腐剂等)和生物保鲜(如微生物发酵、天然生物复合膜保鲜等)等技术已广泛应用于鸡肉保鲜领域^[2]。其中,利用负载活性物质的可食用复合膜材料对鸡肉进行包装,可在阻隔水

收稿日期:2024-07-02;修回日期:2024-12-27;出版日期:2025-06-15

基金项目:海南省重点研发计划项目(ZDYF2022XDNY335);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX24_2633);2024年江苏省省级大学生创新创业训练计划立项项目(202410295171Y)

作者简介:杨焕彬(1979—),男,广东省潮州市人,广东无穷食品集团有限公司工程师,主要研究方向为休闲食品质量安全管理与研发。E-mail: ma790421@126.com

通信作者:刘晓丽(1984—),女,甘肃省天水市人,江南大学副教授,博士,主要研究方向为食品加工及其保鲜。E-mail: lx1525j@163.com

分流失和外界环境不良影响的同时,抑制鸡肉脂质氧化和蛋白质降解,达到保鲜目的^[3-4],是一种绿色高效、安全可控的生物保鲜技术。

玉米醇溶蛋白(Zein)是玉米淀粉加工的副产物,具有良好的生物相容性、可降解性、成膜性和安全性,是一种极具潜力的传统塑料包装替代基材^[5-6]。然而,采用传统流延法制备的Zein膜的机械性能较弱,限制了其应用范围。研究^[7]表明,在Zein基质中添加具有一定功能活性的天然提取物,不仅能保持Zein的成膜性,还可赋予Zein基复合膜良好的机械性能和保鲜效果。刘锦渊等^[8]将丁香酚/咖啡酸-介孔二氧化硅纳米粒(EG/CA-MSN)作为填料添加到Zein中,获得具有良好阻隔性能、机械性能和保鲜效果的Zein基复合膜,再将该复合膜应用于冷藏鱼片的保鲜,可延长冷藏鱼片的货架期2~3 d。

姜黄素(Curcumin, CUR)是从姜黄中提取的一种天然生物活性物质,含有3%~5%(若无特指,文中百分号均指质量分数)的类姜黄素衍生物,具有规则的晶体结构和一定的抗氧化活性,被广泛应用于活性包装材料领域^[9-10]。Y. M. Xie等^[11]制备了负载CUR的细菌纤维素-马铃薯皮复合膜,并将其应用于猪肉保鲜,发现经含5% CUR的复合膜包裹的猪肉在贮藏至第7 d时,其丙二醛含量显著降低。L. Baldino等^[12]研究发现,在醋酸纤维素膜中添加20% CUR,该复合膜表现出良好的抗氧化活性,对DPPH自由基的清除率高达90%左右。此外,将CUR添加到一些天然聚合物材料中,不仅能显著提升这些材料的功能活性,还能增强复合膜的阻隔性能、机械性能、热稳定性等^[13]。

曲酸(Kojic Acid, KA)是由微生物通过好氧发酵产生的一种天然次级代谢产物,具有弱酸性、水溶性、抗菌性、抗氧化活性、抑制酪氨酸酶活性等特点,被广泛应用于食品、化妆品等行业^[14-16],且市场需求量逐年增加。然而,目前关于将KA作为活性物质应用于天然生物复合膜材料的研究鲜有报道。

基于此,本文拟以Zein、CUR和KA为原料制备Zein/CUR/KA复合膜,首先探究该复合膜的厚度和机械性能,然后将其应用于冷藏鸡肉保鲜,考查冷

藏期间鸡肉的pH值、持水力、菌落总数、挥发性盐基氮(TVB-N)含量、硫代巴比妥酸还原值(TBARS)等指标的变化,以明确该复合膜对冷藏鸡肉的保鲜效果;此外,考虑到肌原纤维蛋白特性对鸡肉加工特性的影响,本研究还将进一步研究复合膜处理对该蛋白特性的影响规律,以期为天然生物基复合材料在禽肉制品保鲜领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

新鲜鸡胸肉,脂肪含量为8%,购自当地超市;CUR(食品级),南京多西夫生物科技有限公司;KA,武汉伟盛生物有限公司;Zein、甘油,上海麦克林生化有限公司;总巯基检测试剂盒(A063-1-1分光光度法),南京建成科技有限公司;大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus aureus*),江南大学食品加工与配料实验室;5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)(DTNB)、冰醋酸、硫代巴比妥酸(Thiobarbituric Acid, TBA)、NaOH、HCl、三氯乙酸、平板计数琼脂等,上海国药化学试剂有限公司。除特别标注之外,所用试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

GI54TW型立式自动压力蒸气灭菌器,厦门致微仪器有限公司;TA.XT Plus型物性分析仪,英国Stable Micro System公司;DS-1型高速组织捣碎机,上海标本模型厂;HJ-6型多头磁力加热搅拌器,金坛市荣华仪器制造有限公司;JASCO-1700型圆二色光谱仪,日本分光株式会社;T10 Basic型高速剪切均质机,德国IKA公司;DHG-9240A型电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;DL91150型数显螺旋测微器,得力集团有限公司;FE20型pH计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;4K15型高速冷冻离心机,德国Sigma公司;K9840型自动凯氏定氮仪,济南海能仪器股份有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 Zein/CUR/KA复合膜制备 将0.1 g Zein、0.02 g甘油和体积分数为85%的乙醇溶液混合均匀,制得Zein溶液;将0.05 g KA、0.05 g CUR分别

添加到 100 mL Zein 溶液中,于室温、800 r/min 条件下搅拌 5 min,制得 Zein/CUR/KA 复合膜液;将 20 mL 复合膜液倒入直径为 9 cm 的培养皿中,于 45 ℃ 条件下干燥 8 h,制得 Zein/CUR/KA 复合膜;将复合膜修剪后置于干净自封袋中,再置于干燥器中保存,备用。以同样的方法制备不含 CUR 和 KA 的 Zein 膜。

1.3.2 Zein/CUR/KA 复合膜厚度和机械性能测定 在 Zein/CUR/KA 复合膜上随机选择 10 个位置,使用测量精度为 0.001 mm 的数显螺旋测微器测量厚度。将 Zein/CUR/KA 复合膜剪切成 10 mm×50 mm 的矩形后,固定在物性分析仪的夹具上,设置夹具初始距离为 30 mm,拉伸速率为 0.5 mm/s,按下式计算复合膜的拉伸强度(Tensile Strength, *TS*)和断裂伸长率(Elongation Break, *EB*)。

$$TS = \frac{F}{a \times b}$$

$$EB = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中,*F* 为复合膜断裂时所需的最大拉力/N,*a* 为复合膜的宽度/m,*b* 为复合膜的厚度/m,*L* 为复合膜拉伸断裂前的最终长度/mm,*L*₀ 为复合膜的初始长度/mm。

1.3.3 鸡肉样品处理 将新鲜鸡胸肉统一切成 4 cm×4 cm×1.5 cm 的小块,随机分为 4 组,其中 3 组分别用保鲜膜(PE)、Zein 膜及 Zein/CUR/KA 复合膜进行包裹,余下 1 组不经任何处理作为对照,并依次记为 PE 组、Zein 组、Zein/CUR/KA 组和 CK 组,均置于 4 ℃ 条件下冷藏,分别在第 0 d、2 d、4 d、6 d、8 d 和 10 d 测定各项指标。

1.3.4 pH 值测定 取 5 g 切碎的鸡肉样品,加入 45 mL 去离子水后在 500 r/min 条件下均质 5 min,静置 30 min 后,于 10 000 r/min 条件下离心 5 min,用 pH 计测定上清液的 pH 值。

1.3.5 持水力测定 参考汤海莲等^[17]的方法,取 3 g 鸡肉样品,切碎后称重,记为 *m*₁,用滤纸包裹样品后,将其置于离心管中,在高速冷冻离心机中以 3000 r/min 离心 5 min,去除滤纸和多余水分后再次称重,记为 *m*₂,按下式计算持水力。

$$\text{持水力} = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%$$

1.3.6 菌落总数测定 将 10.0 g 鸡肉样品放入无菌均质袋中,加入 90 mL 无菌生理盐水,均质 1 min 后,稀释至合适浓度;取 1 mL 稀释液涂布在无菌平板计数琼脂上,在(30±1) ℃ 条件下培养 72 h 后进行计数,结果表示为 lgCFU/g。

1.3.7 TVB-N 含量测定 参考《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》(GB 5009.228—2016)的半微量定氮法^[18],使用自动凯式定氮仪测定鸡肉样品的 TVB-N 含量,结果表示为 mg/g。

1.3.8 TBARS 测定 参考李波等^[19]的方法,并稍作修改。将 20 mL 0.1 g/mL 已预冷的三氯乙酸与 2.0 g 鸡肉样品混合后,在冰浴条件下均质 2 min,离心后取上清液,与 0.02 mol/L 的 TBA 溶液混合后,在沸水浴中反应 20 min,冷却至常温,在 530 nm 波长处测定吸光度,结果表示为 mg/g。

1.3.9 肌原纤维蛋白提取 参照 Y. G. Cao 等^[20]的方法,并稍作修改。取 50 g 绞碎的鸡肉糜样品与 300 mL 缓冲液 A (含有 0.05 mol/L NaCl 和 20 mmol/L Tris-HCl, pH 值为 7.5) 混合均匀后,在冰浴条件下以 10 000 r/min 均质 30 s,再以 5000 r/min 冷冻离心 10 min,弃去上清液,收集沉淀,重复上述操作 2 次;将沉淀物与 4 倍体积的缓冲液 B (含有 0.45 mol/L NaCl 和 20 mmol/L Tris-HCl, pH 值为 7.5) 混合,反复洗涤 2 次后离心,所得沉淀物即为纯净的肌原纤维蛋白,将其保存在 4 ℃ 条件下,备用。

1.3.10 总巯基含量测定 配制 5 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液,按照总巯基检测试剂盒中的方法进行测定。

1.3.11 活性巯基含量测定 参照 N. Pan 等^[21]的方法,并稍作修改。取 5 mL 5 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液置于 10 mL 试管中,加入 0.1 mL DTNB,混匀后于 4 ℃ 条件下反应 1 h,在 412 nm 波长处测定吸光度;用磷酸盐缓冲液作为空白对照,按下式计算活性巯基含量。

$$C = \frac{A \times D}{\varepsilon \times B}$$

式中,*C* 为活性巯基含量/(nmol·mg⁻¹),*A* 为

412 nm 处的吸光度, ϵ 为摩尔消光系数 13 600 L/(mol·cm), D 为稀释倍数, B 为肌原纤维蛋白质量浓度/(mg·mL⁻¹)。

1.3.12 蛋白二级结构相对含量测定 从经复合膜保鲜 10 d 后的鸡肉样品中提取肌原纤维蛋白后, 配制 0.1 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液(溶解于 ddH₂O), 测定 190~250 nm 远紫外区圆二色光谱。分辨率为 0.2 nm, 谱带宽度为 1.0 nm, 灵敏度为 20 mdeg, 响应时间为 0.25 s, 扫描速度为 100 nm/min, 重复扫描 8 次后累加, 计算蛋白二级结构相对含量。

1.4 数据统计分析

所有实验均设置 3 组平行, 结果以(平均值±标准差)表示。利用 SPSS 19.0 进行 ANOVA 方差分析, 采用 Origin 8.2 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 Zein/CUR/KA 复合膜的厚度和机械性能分析

Zein 膜和 Zein/CUR/KA 复合膜的厚度、 TS 、 EB 和实物图见表 1。由表 1 可知, Zein/CUR/KA 复合膜比 Zein 膜的厚度更大, 这可能是因为 CUR 和 KA 的添加提高了复合膜体系中的固形物含量。复合膜机械性能中的 TS 和 EB 是评价包装材料耐用性能的关键指标^[22]。Zein/CUR/KA 复合膜的 TS 和 EB 均优于 Zein 膜, 这可能是因为复合膜形成过程中, CUR 和 KA 的添加促进了分子间交联网络的形成, 增强了基质聚合物之间的氢键相互作用, 这使得复合膜内部的分子间聚合度更高、分子间连接更紧密^[23], 进而改善了复合膜的机械性能。

2.2 Zein/CUR/KA 复合膜对冷藏鸡肉 pH 值的影响

肉制品的腐败变质程度与其 pH 值密切相关, 通过测量 pH 值变化, 可检测鸡肉中解离酸的浓度, 进而间接评价其新鲜程度, pH 值越高, 说明鸡肉的腐败变质程度越严重^[1]。鸡肉样品在冷藏期间的 pH 值变化如图 1 所示, 其中不同小写字母表示同一冷藏时间下组间差异显著($P < 0.05$), 下同。由图 1 可知, 4 组鸡肉样品的初始 pH 值均为

5.6 左右, 随着冷藏时间的延长, 各组鸡肉样品的 pH 值均呈先下降后上升的趋势。在冷藏初期(0~2 d), 各组鸡肉样品的 pH 值略微降低, 这可能是因为鸡肉内部残留的糖原通过糖酵解过程转化为丙酮酸, 导致乳酸大量累积, 此外, 三羧酸循环也会产生有机酸; 在冷藏中后期(2~10 d), 各组鸡肉样品的 pH 值均上升, 这可能是因为微生物代谢和内源酶作用使蛋白质和其他含氮化合物分解为氨、生物胺等碱性物质。Zein/CUR/KA 组 pH 值的增长速率明显低于其余 3 组; 当冷藏至第 10 d 时, Zein/CUR/KA 组的 pH 值为 5.9, 而 CK 组的 pH 值已达到 6.4, 这表明 Zein/CUR/KA 复合膜能有效抑制微生物代谢引起的碱性化合物生成, 进而延缓鸡肉的腐败变质。

表 1 Zein 膜和 Zein/CUR/KA 复合膜的厚度、 TS 、 EB 和实物图

Table 1 The thickness, TS , EB , and real object diagrams of Zein and Zein/CUR/KA films

组别	厚度/mm	TS /MPa	EB /%	实物图
Zein 膜	0.125±0.002	15.22±0.11	55.68±1.65	
Zein/CUR/KA 复合膜	0.132±0.006	25.56±0.35	62.49±1.53	

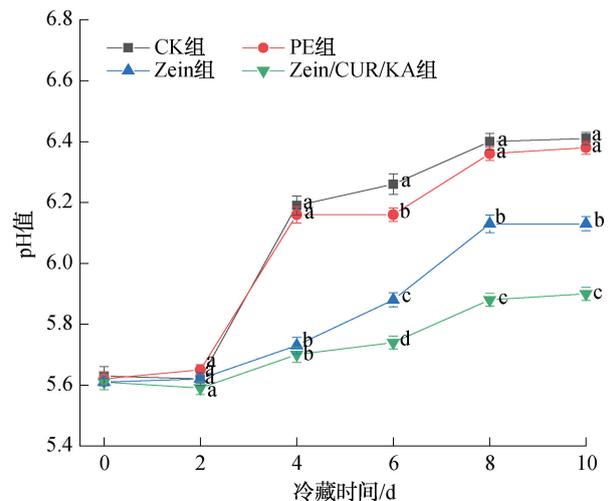


图 1 鸡肉样品在冷藏期间的 pH 值变化
Fig. 1 Changes in pH value of chicken samples during refrigeration

2.3 Zein/CUR/KA 复合膜对冷藏鸡肉持水力的影响

鸡肉在贮存和运输过程中的水分变化可用持水力来表示,因此持水力是评价鸡肉品质的重要指标之一。通常情况下,随着冷藏时间的延长,鸡肉中存在的多种酶及大量微生物会导致蛋白质降解及脂肪氧化,进而引起水分流失,使鸡肉持水力降低^[23-24]。鸡肉样品在冷藏期间的持水力变化如图2所示。由图2可知,在冷藏期间,4组鸡肉样品的持水力均随着冷藏时间的延长而逐渐降低,其中CK组的持水力下降速率最快,Zein/CUR/KA组的持水力下降速率最缓慢,其次为Zein组和PE组;Zein/CUR/KA组在冷藏期间的持水力均显著高于其余3组($P<0.05$),当冷藏至第10d时,Zein/CUR/KA组仍能保持65.23%的持水力。这表明Zein/CUR/KA复合膜能有效减缓鸡肉蛋白质的降解,降低肌原纤维被破坏的程度,进而延缓鸡肉水分的流失,较好地维持鸡肉的持水力。

2.4 Zein/CUR/KA 复合膜对冷藏鸡肉菌落总数的影响

在鸡肉贮藏过程中,微生物存在不可避免,这些微生物会利用和分解鸡肉中的蛋白质、脂肪等营养物质,产生腐胺、醛类、硫化物等具有不良气味的物质,导致鸡肉品质劣化^[25]。鸡肉样品在冷藏期间的菌落总数变化如图3所示。由图3可知,新鲜鸡肉样品的初始菌落总数为4.1 lg CFU/g。4组鸡肉

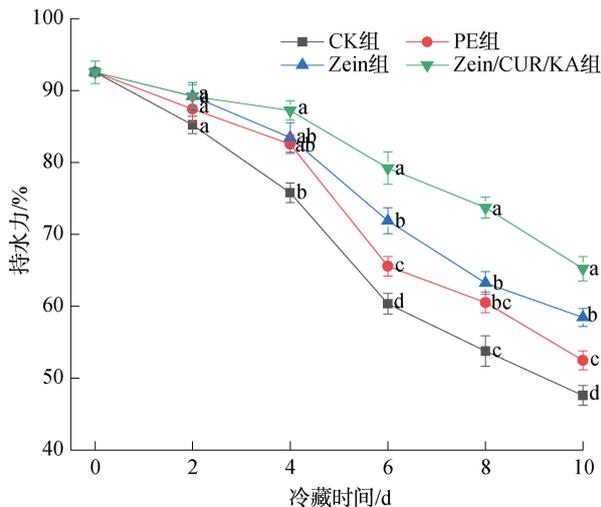


图2 鸡肉样品在冷藏期间的持水力变化

Fig. 2 Changes in water-holding capacity of chicken samples during refrigeration

样品的菌落总数均随着冷藏时间的延长而增加,当冷藏至第10d时,CK组、PE组、Zein组和Zein/CUR/KA组的菌落总数分别达到8.5 lg CFU/g、8.2 lg CFU/g、7.7 lg CFU/g和6.1 lg CFU/g,且前3组鸡肉样品的菌落总数均超过国际食品微生物标准委员会建议的7.0 lg CFU/g^[26]。这可能是因为Zein/CUR/KA复合膜具有良好的阻隔性能,能够有效抑制微生物的生长繁殖。

2.5 Zein/CUR/KA 复合膜对冷藏鸡肉 TVB-N 含量的影响

肉制品中的蛋白质在自身内源酶、环境微生物等的作用下会逐步降解成氨、胺类等碱性含氮物质,因此可用TVB-N含量来评价肉制品的腐败变质程度^[27]。鸡肉样品在冷藏期间的TVB-N含量变化如图4所示。由图4可知,4组鸡肉样品的TVB-N含量均随着冷藏时间的延长而逐渐上升,其中CK组的增长速率最快,Zein/CUR/KA组的增长速率最缓慢;各组鸡肉样品的TVB-N含量在冷藏前4d的增长速率较缓慢,而后迅速增加。当冷藏至第6d时,CK组的TVB-N含量已达到0.21 mg/g,超过食品安全标准规定的限值0.20 mg/g;相比之下,Zein/CUR/KA组的TVB-N含量较CK组降低了44.1% ($P<0.05$),这表明在Zein中添加CUR和KA可减缓微生物诱导的蛋白质降解过程。当冷藏至第10d时,Zein/CUR/KA组的TVB-N含量仍未超过0.20 mg/g,且相较于PE组和Zein组,Zein/CUR/

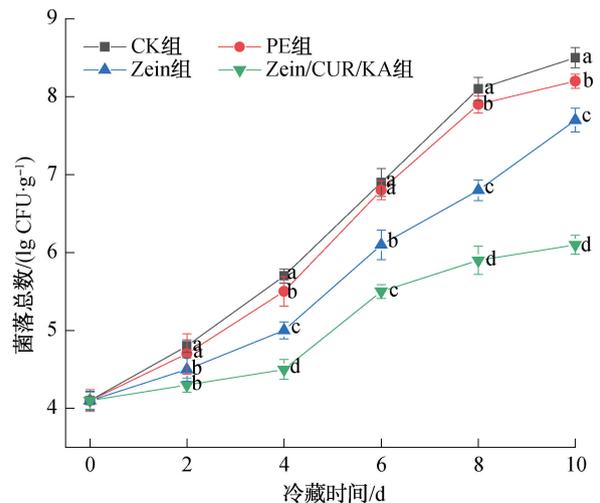


图3 鸡肉样品在冷藏期间的菌落总数变化

Fig. 3 Changes in total aerobic plate count of chicken samples during refrigeration

KA 复合膜具有更好的保鲜效果。

2.6 Zein/CUR/KA 复合膜对冷藏鸡肉脂肪氧化的影响

在冷藏期间,由于脂肪的存在,肉制品较易发生脂肪氧化而产生丙二醛等物质,通过将氧化产物与 TBA 发生显色反应,可由 *TBARS* 来反映肉制品的脂肪氧化程度^[28]。鸡肉样品在冷藏期间的 *TBARS* 变化如图 5 所示。由图 5 可知,4 组鸡肉样品的 *TBARS* 均随着冷藏时间的延长而增加,当冷藏至第 10 d 时,CK 组、PE 组、Zein 组和 Zein/CUR/KA 组的 *TBARS* 分别上升至 0.013 5 mg/g、0.012 5 mg/g、0.009 6 mg/g 和 0.007 7 mg/g,其中 Zein/CUR/KA 组的 *TBARS* 增长速率最缓慢。这可能是因为

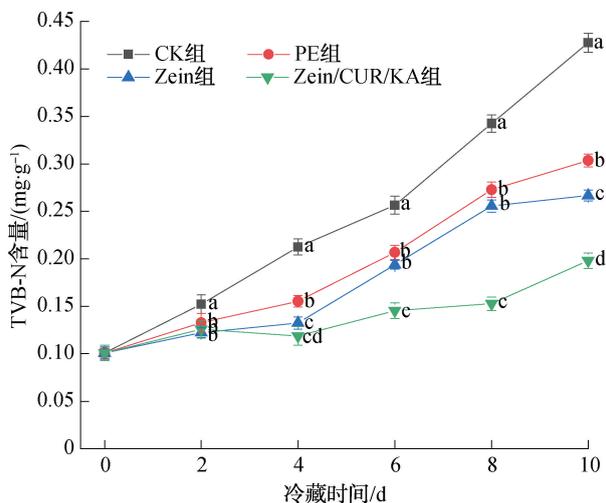


图 4 鸡肉样品在冷藏期间的 TVB-N 含量变化

Fig. 4 Changes in TVB-N content of chicken samples during refrigeration

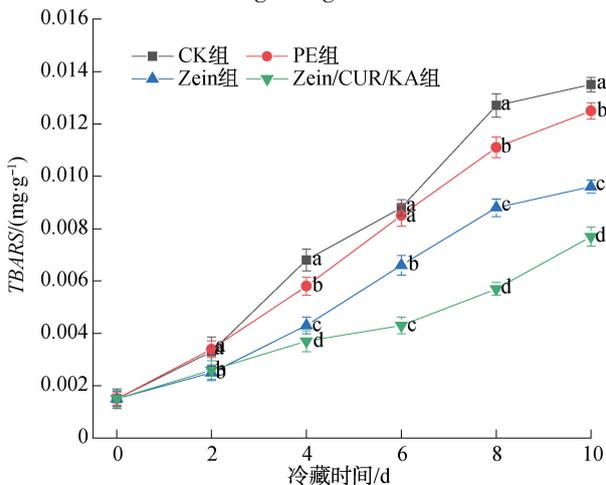


图 5 鸡肉样品在冷藏期间的 *TBARS* 变化

Fig. 5 Changes in *TBARS* of chicken samples during refrigeration

Zein/CUR/KA 复合膜具有良好的氧气阻隔性、抑菌性和抗氧化性,有利于延缓鸡肉的脂肪氧化^[29]。

2.7 Zein/CUR/KA 复合膜对冷藏鸡肉肌原纤维蛋白特性的影响

2.7.1 总巯基和活性巯基含量 肌原纤维蛋白是禽类肌肉中的主要蛋白质,其含有大量的巯基,极易氧化生成二硫键,因此可用巯基含量评价鸡肉蛋白质的氧化程度^[30]。鸡肉样品在冷藏期间的总巯基和活性巯基含量变化如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可知,4 组鸡肉样品的总巯基和活性巯基含量均随着冷藏时间的延长呈下降趋势。新鲜鸡肉样品的总巯基和活性巯基含量分别为 18.0 nmol/mg 和 16.5 nmol/mg。当冷藏至第 10 d 时,Zein/CUR/KA 组的总巯基和活性巯基含量分别降低至

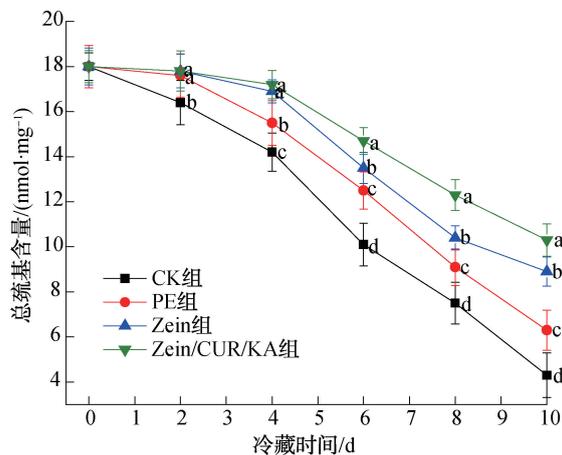


图 6 鸡肉样品在冷藏期间的总巯基含量变化

Fig. 6 Changes in the total sulfhydryl content of chicken samples during refrigeration

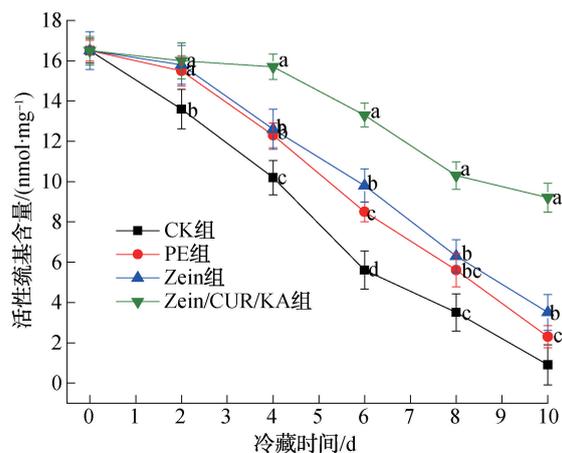


图 7 鸡肉样品在冷藏期间的活性巯基含量变化

Fig. 7 Changes in the active sulfhydryl content of chicken samples during refrigeration

10.3 nmol/mg 和 9.2 nmol/mg, CK 组的总巯基和活性巯基含量分别降低至 4.3 nmol/mg 和 0.9 nmol/mg, 其余 2 组鸡肉样品的总巯基和活性巯基含量也显著低于 Zein/CUR/KA 组 ($P < 0.05$)。这表明在常规冷藏条件下, 肌原纤维蛋白中的巯基大量暴露并经氧化反应形成了二硫键, 导致蛋白质结构发生改变; 而 Zein/CUR/KA 复合膜能够有效减缓巯基的氧化速率, 抑制蛋白质的氧化变性, 更好地维持鸡肉的品质特性。

2.7.2 蛋白二级结构相对含量 鸡肉样品冷藏 10 d 后的蛋白二级结构相对含量见表 2。由表 2 可知, 相较于 CK 组, 其余 3 组的 α -螺旋和无规则卷曲相对含量均显著降低, β -折叠和 β -转角相对含量均显著增加 ($P < 0.05$)。与 CK 组相比, Zein/CUR/KA 组的 α -螺旋和无规则卷曲相对含量分别降低了 20.06% 和 10.02%, 而 β -折叠和 β -转角相对含量则分别增加了 51.66% 和 7.30%, PE 组和 Zein 组的 α -螺旋相对含量分别降低了 25.45% 和 22.07%, 无规则卷曲相对含量分别降低了 32.91% 和 23.26%。 α -螺旋相对含量的减少可能是由于螺旋结构部分展开, 在此过程中体系通过氢键修饰等非共价相互作用来稳定二级结构。 α -螺旋相对含量的降低会导致蛋白质变性, 从而影响鸡肉的质地结构。这说明在 4 °C 冷藏期间, 4 组鸡肉样品的蛋白二级结构均发生了从 α -螺旋和无规则卷曲向 β -折叠和 β -转角的转变, 而 Zein/CUR/KA 组蛋白二级结构的变化幅度最小, 表现出最佳的结构稳定效果。通常情况下, 含有更多 β -转角和无规则卷曲结构的肌原纤维蛋白被认为是不稳定和无序的。因此, Zein/CUR/KA 复合膜对鸡肉中肌原纤维蛋白二

表 2 鸡肉样品冷藏 10 d 后的蛋白二级结构相对含量

Table 2 Relative content of protein secondary structure in chicken samples after 10 days of refrigeration %

组别	α -螺旋 相对含量	β -折叠 相对含量	β -转角 相对含量	无规则卷曲 相对含量
CK 组	26.37±1.13 ^a	20.19±1.14 ^d	18.63±1.6 ^d	34.82±1.21 ^a
Zein/CUR/ KA 组	21.08±0.38 ^b	30.62±0.41 ^c	19.99±1.3 ^c	28.33±0.39 ^b
Zein 组	20.55±0.56 ^c	31.23±0.58 ^b	22.41±0.26 ^b	25.79±0.42 ^c
PE 组	19.66±0.33 ^d	33.56±2.36 ^a	23.43±0.76 ^a	23.36±1.37 ^d

注: 同列不同肩标小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

级结构的稳定效果可能是由于膜材料中缓慢释放的活性物质与蛋白发生了氢键和疏水相互作用, 进而增强了肌原纤维蛋白二级结构的稳定性; 另外, 复合膜良好的氧气阻隔性也能有效抑制蛋白质的氧化变性。

3 结论

本文以 Zein、CUR 和 KA 为原料制备了 Zein/CUR/KA 复合膜, 研究了该复合膜在冷藏鸡肉保鲜中的应用效果, 得到如下结论: 相较于 Zein 膜, Zein/CUR/KA 复合膜更厚, 拉伸强度、断裂伸长率这 2 种机械性能更优。在冷藏至第 10 d 时, 经该复合膜处理的冷藏鸡肉, 其 pH 值、菌落总数、TVB-N 含量和 TBARS 均显著低于其余组, 而持水力显著高于其余组。此外, Zein/CUR/KA 复合膜能有效抑制冷藏鸡肉中肌原纤维蛋白的氧化变性, 具体表现为总巯基和活性巯基含量均最高, 蛋白二级结构的变化幅度最小。因此, Zein/CUR/KA 复合膜不仅具有良好的机械性能、阻隔性能、抑菌性和抗氧化性, 还对冷藏鸡肉的肌原纤维蛋白特性影响较小, 表现出良好的冷藏鸡肉保鲜效果, 是一种有潜力的禽肉制品冷藏保鲜包装材料。未来将进一步对复合膜的功能性改良、作用机制解析、应用场景拓展、工业化可行性等方面进行研究, 以拓展此类复合膜的应用潜力, 为肉类保鲜领域提供更全面的解决方案。

参考文献:

- [1] 杨焕彬, 曾庆培, 林光明, 等. 生物保鲜剂在禽肉保鲜中的应用研究进展[J]. 轻工学报, 2021, 36(6): 38-46.
- [2] NI Y S, SUN J, WANG J L. Enhanced antimicrobial activity of konjac glucomannan nanocomposite films for food packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 267: 118215.
- [3] WORANUCH S, YOKSAN R. Eugenol-loaded chitosan nanoparticles: I. Thermal stability improvement of eugenol through encapsulation[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 96(2): 578-585.
- [4] 刘晓丽, 郭曹羽, 林锴立, 等. 壳聚糖基抑菌抗氧化活性复合膜的制备及其性能研究[J]. 轻工学报, 2023, 38(4): 27-36.
- [5] XU H, CHAI Y W, ZHANG G Y. Synergistic effect of oleic acid and glycerol on zein film plasticization[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60

- (40):10075-10081.
- [6] 赵文鹏,刘雅楠,张迅,等.负载花青素的玉米醇溶蛋白纳米纤维膜监测猪肉新鲜度[J].食品安全质量检测学报,2023,14(2):83-90.
- [7] WANG Y, RAKOTONIRAINY A M, PADUA G W. Thermal behavior of zein-based biodegradable films[J]. Starch-Stärke,2003,55(1):25-29.
- [8] 刘锦渊,刘晓丽,夏文水.负载丁香酚的改性纳米粒对玉米醇溶蛋白膜性能的影响[J].食品科学技术学报,2023,41(5):123-135.
- [9] SHARMA O P. Antioxidant activity of curcumin and related compounds[J]. Biochemical Pharmacology,1976,25(15):1811-1812.
- [10] LIU X L, XU Y X, LIAO W Y, et al. Preparation and characterization of chitosan/bacterial cellulose composite biodegradable films combined with curcumin and its application on preservation of strawberries [J]. Food Packaging and Shelf Life,2023,35:101006.
- [11] XIE Y M, NIU X N, YANG J W, et al. Active biodegradable films based on the whole potato peel incorporated with bacterial cellulose and curcumin[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2020,150:480-491.
- [12] BALDINO L, CARDEA S, REVERCHON E. Biodegradable membranes loaded with curcumin to be used as engineered independent devices in active packaging[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,2017,71:518-526.
- [13] ROY S, RHIM J W. Carboxymethyl cellulose-based antioxidant and antimicrobial active packaging film incorporated with curcumin and zinc oxide [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2020,148:666-676.
- [14] LIU X L, XIA W S, JIANG Q X, et al. Chitosan oligosaccharide-N-chlorokojic acid mannich base polymer as a potential antibacterial material [J]. Carbohydrate Polymers,2018,182:225-234.
- [15] LIU X L, ZHANG C H, LIU S C, et al. Coating white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) with edible fully deacetylated chitosan incorporated with clove essential oil and kojic acid improves preservation during cold storage [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2020,162:1276-1282.
- [16] 李岗,钊定泽.常用祛斑美白剂作用机理研究[J].精细与专用化学品,2024,32(7):11-21.
- [17] 汤海莲,尹恣强,许伟,等.不同木薯变性淀粉对调理鸡肉丸品质特性的影响[J].中国调味品,2023,48(11):79-83.
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定:GB 5009.228—2016[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [19] 李波,唐天池,刘玮嘉,等.牛至精油-聚乙烯醇/壳聚糖复合膜的制备及对鸡肉保鲜效果的影响[J].包装工程,2024,45(21):165-173.
- [20] CAO Y G, XIONG Y L. Chlorogenic acid-mediated gel formation of oxidatively stressed myofibrillar protein[J]. Food Chemistry,2015,180:235-243.
- [21] PAN N, HU Y F, LI Y, et al. Changes in the thermal stability and structure of myofibrillar protein from quick-frozen pork patties with different fat addition under freeze-thaw cycles[J]. Meat Science,2021,175:108420.
- [22] LIU X L, LIAO W Y, XIA W S. Recent advances in chitosan based bioactive materials for food preservation [J]. Food Hydrocolloids,2023,140:108612.
- [23] WU H J, LEI Y L, LU J Y, et al. Effect of citric acid induced crosslinking on the structure and properties of potato starch/chitosan composite films [J]. Food Hydrocolloids,2019,97:105208.
- [24] CHAIJIAN S, PANPIPAT W, PANYA A, et al. Preservation of chilled Asian sea bass (*Lates calcarifer*) steak by whey protein isolate coating containing polyphenol extract from ginger, lemongrass, or green tea [J]. Food Control,2020,118:107400.
- [25] LI X, LV (LYU) J H, NIU M H, et al. Characterization and antibacterial properties of egg white protein films loaded with ϵ -polylysine: Evaluation of their degradability and application[J]. Foods,2023,12(12):2431.
- [26] International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF). Micro-organisms in foods 5: Characteristics of microbial pathogens [M]. London: Chapman and Hall Published Company,1996.
- [27] 白艳红,牛苑文,吴月,等.不同冰温贮藏对鸡胸肉品质变化的影响[J].轻工学报,2016,31(1):17-22,28.
- [28] HERNÁNDEZ-GARCÍA E, VARGAS M, CHIRALT A. Starch-polyester bilayer films with phenolic acids for pork meat preservation[J]. Food Chemistry,2022,385:132650.
- [29] OCAÑO-HIGUERA V M, MAEDA-MARTÍNEZ A N, MARQUEZ-RÍOS E, et al. Freshness assessment of ray fish stored in ice by biochemical, chemical and physical methods[J]. Food Chemistry,2011,125(1):49-54.
- [30] LOKE X J, CHANG C K, HOU C Y, et al. Plasma-treated polyethylene coated with polysaccharide and protein containing cinnamaldehyde for active packaging films and applications on tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillet preservation [J]. Food Control,2021,125:108016.

Effect of zein/curcumin/kojic acid composite film on the preservation of refrigerated chicken

YANG Huanbin¹, ZENG Qingpei¹, SHE Yimin¹, SUN Xin², WANG Xiaoqing², LIU Xiaoli²

1. Guangdong Wuqiong Food Groups Co., Ltd., Chaozhou 515700, China;

2. School of Food Science and Technology/Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: To develop natural bio-based composite film materials with excellent food preservation properties, Zein/CUR/KA composite films were prepared using zein (Zein), curcumin (CUR), and kojic acid (KA) as raw materials. The thickness and mechanical properties of the films were measured. Their application in the preservation of refrigerated chicken was then investigated. The preservation efficacy of the composite film on refrigerated chicken was evaluated. This was done by measuring the pH value, water-holding capacity, total colony count, and volatile basic nitrogen (TVB-N) content. Results showed that compared with the Zein film, the Zein/CUR/KA composite film had greater thickness and better mechanical properties, with tensile strength and elongation at break of 25.56 MPa and 62.49%, respectively. On the 10th day of refrigeration, the pH value of chicken treated with the Zein/CUR/KA composite film was maintained at 5.9. This was significantly lower than that of the control (CK) group (6.4, $P < 0.05$). The water-holding capacity remained at 65.23%, which was significantly higher than that of the control group ($P < 0.05$). The total colony count was 6.1 lg CFU/g, which was two orders of magnitude lower than that of the CK group (8.5 lg CFU/g). The TVB-N content was below the food safety standard limit of 0.20 mg/g. The thiobarbituric acid reduction value (TBARS) was 0.0077 mg/g, which was 42.96% lower than that of the CK group (0.0135 mg/g). Total thiol and active thiol contents were reduced to 10.3 nmol/mg and 9.2 nmol/mg, respectively. There was minimal alteration in the protein secondary structure. Therefore, the Zein/CUR/KA composite film has excellent mechanical, barrier, antibacterial, and antioxidant properties. It effectively delays water loss, fat oxidation, and protein denaturation in refrigerated chicken, thus demonstrating excellent preservation performance.

Key words: zein; curcumin; kojic acid; composite film; chicken preservation

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]