

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80445

茶黄素协同气调包装对冷藏风干带鱼品质的影响

冯晨轩¹ 詹岳祥^{1,2} 水珊珊¹ 林慧敏¹ 张 宾^{1,2}

(1. 浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江 舟山 316022; 2. 浙江海洋大学比萨海洋研究生学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: [目的] 探究茶黄素和气调包装联用对冷藏风干带鱼品质的影响。[方法] 检测风干带鱼冷藏过程的过氧化值(PV)、硫代巴比妥酸值(TBARS)、DPPH 自由基清除能力、羟自由基清除能力、超氧阴离子自由基清除能力和菌落总数(TBC)等指标。[结果] 70% CO₂+30% N₂ 气调包装和 0.3 g/kg 茶黄素联合应用对风干带鱼 PV 和 TBARS 的快速上升有显著抑制作用($P<0.05$), 对各自由基有显著清除能力($P<0.05$), 感官评分值更优。此外, 该组 TBC 显著低于其他组($P<0.05$), 冷藏贮藏 10 d 时, TBC 为 5.40 log(CFU/g), 比对照组降低了 46.27%。相关性分析表明, 脂肪氧化程度、腐败程度与抗氧化能力之间存在密切联系。[结论] 70% CO₂+30% N₂ 气调包装和 0.3 g/kg 茶黄素联合处理可有效保持风干带鱼的品质。

关键词: 茶黄素; 气调包装; 风干带鱼; 冷藏; 贮藏品质

Effects of theaflavins and modified atmosphere packaging on the quality of air-dried hairtail (*Trichiurus lepturus*) during refrigerated storage

FENG Chenxuan¹ ZHAN Yuexiang^{1,2} SHUI Shanshan¹ LIN Huimin¹ ZHANG Bin^{1,2}

(1. Food and Pharmacy College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China;

2. Pisa Marine Graduate School, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of combined treatment with theaflavins and modified atmosphere packaging (MAP) on the quality of air-dried hairtail (*Trichiurus lepturus*) during refrigerated storage. [Methods] Several indices of air-dried hairtail are measured during refrigerated storage, including peroxide value (PV), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), DPPH radical scavenging activity, hydroxyl radical scavenging activity, superoxide anion radical scavenging activity, and total bacterial count (TBC). [Results] The combination of 70% CO₂+30% N₂ MAP and 0.3 g/kg theaflavins significantly inhibits the increase in PV and TBARS values ($P<0.05$), enhances the free radical scavenging capacity ($P<0.05$), and results in higher sensory evaluation scores. Moreover, the TBC of air-dried hairtail treated with 70% CO₂+30% N₂ MAP and 0.3 g/kg theaflavins is found to be significantly lower than that of other groups ($P<0.05$). After 10 days of refrigerated storage, the TBC is 5.40 log(CFU/g), which is 46.27% lower than that of the control group. Correlation analysis indicates a close relationship between the degree of lipid oxidation, spoilage, and antioxidant capacity. [Conclusion] The quality of air-dried hairtail during storage is effectively maintained by the combined treatment of 70% CO₂+30% N₂ MAP and 0.3 g/kg theaflavins.

Keywords: theaflavins; modified atmosphere packaging; air-dried hairtail (*Trichiurus lepturus*); refrigerated storage; storage quality

带鱼 (*Trichiurus lepturus*), 又称刀鱼、牙带等, 属于硬骨鱼纲鲈形目带鱼科, 是中国四大经济海产鱼类之一^[1]。在东海捕捞的鱼类中, 带鱼产量约占总捕捞量的 70%^[2]。

带鱼肉是优质蛋白质的重要来源, 且富含二十二碳六烯酸(DHA)和二十碳五烯酸(EPA)等对人类健康有益的 ω -3 多不饱和脂肪酸, 还含有充足的维生素和矿物质, 具

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2021YFD2100504); 国家自然科学基金资助项目(编号: 32301972)

通信作者: 水珊珊(1989—), 女, 浙江海洋大学副教授, 博士。E-mail: shuiss@zjou.edu.cn

张宾(1981—), 男, 浙江海洋大学教授, 博士。E-mail: zhangbin@zjou.edu.cn

收稿日期: 2025-05-13 改回日期: 2025-08-23

引用格式: 冯晨轩, 詹岳祥, 水珊珊, 等. 茶黄素协同气调包装对冷藏风干带鱼品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 118-125.

Citation: FENG Chenxuan, ZHAN Yuexiang, SHUI Shanshan, et al. Effects of theaflavins and modified atmosphere packaging on the quality of air-dried hairtail (*Trichiurus lepturus*) during refrigerated storage[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 118-125.

有降低胆固醇、增强免疫力、促进大脑发育等功效^[3]。合理的加工方式对保留带鱼的口感和风味至关重要,而干制是一种防止带鱼在捕捞后受外部环境影响而腐败变质的有效方法。目前,市售的风干带鱼主要采用传统风干加工工艺,其独特的香气、味道和质地深受中国和东南亚沿海消费者的广泛喜爱^[4]。然而,由于其含水量高及自身携带的大量微生物和酶类,风干带鱼在常温下容易滋生微生物,导致腐败变质,产生异味和变色,在运输、贮藏、加工和销售过程中极易发生劣变。此外,低温条件下(如冷藏或冻藏),微生物生长受到一定抑制,但酶类活性仍可能导致脂肪氧化和蛋白质降解,从而影响产品的风味和营养价值^[5]。

茶黄素是红茶加工过程中,儿茶素在多酚氧化酶的催化作用下缩合而成的一类具有苯骈卓酚酮结构的化合物总称^[6],具有抗氧化、抑菌和抑制酶活的作用,可应用于水产品的保鲜和护色,有效减少贮藏期间细菌的滋生和腐败味的产生,延长产品的保质期,防止营养物质流失^[7]。毛俊龙^[8]研究表明,0.3 g/kg 茶黄素能保持冰鲜大黄花鱼品质,延缓肌原纤维蛋白Ca²⁺-ATP酶活性下降,抑制蛋白质和脂质氧化,同时具有抑菌性。目前,茶黄素在鲜鱼、虾类等水产品保鲜中应用效果良好,但对于其在风干带鱼贮藏中的保鲜效应及作用机制的研究尚未见报道。

气调包装技术通过调节包装内气体成分的种类和比例能有效抑制微生物生长,旨在延长食品货架期,维持食品的感官品质和营养成分^[9]。Cha等^[10]研究表明,70% CO₂+30% N₂的气调包装可以显著降低-1℃下鸡肉pH值、菌落总数(TBC)与硫代巴比妥酸值(TBARS)、假单胞菌计数,维持鸡肉品质特性,延长其货架期。此外,前期预试验发现,70% CO₂+30% N₂的气调包装能有效隔绝氧气,防止水产品被微生物污染,保鲜效果良好。然而,有关茶黄素与气调包装的联用研究较少。

试验拟以风干带鱼为研究对象,探讨茶黄素联合气调包装(70% CO₂+30% N₂)对冷藏风干带鱼的TBC、过氧化值(PV)、TBARS、自由基含量的影响,分析茶黄素结合气调包装对贮藏期间风干带鱼品质变化的影响,以期提高风干带鱼保鲜技术水平,促进风干带鱼产业化发展。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

带鱼:体宽6~10 cm、体长1 m左右,产自舟山近海,市售;

硫代巴比妥酸:分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

氯仿、石油醚、冰醋酸、硫代硫酸钠、碘化钾、异辛烷:

分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

超氧阴离子检测试剂盒、羟自由基测定试剂盒、DPPH自由基测定试剂盒:南京建成生物研究所;

菌落计数琼脂:杭州驰成医药科技有限公司。

1.2 仪器与设备

家用冷藏冷冻箱:BCD-286WNQISS1型,苏州三星电子有限公司;

高速冷冻离心机:Multifuge XIR型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

立式高压蒸汽灭菌锅:LS-50LD型,广州沪瑞明仪器有限公司;

气调包装机:MAP-H360型,州森瑞保鲜设备有限公司;

烘干箱:DHG-9070A型,上海一恒科学仪器有限公司;

旋转蒸发器:RV 10 Auto型,德国IKA公司;

紫外分光光度计:JC-HD型,青岛聚创环保集团有限公司;

脂肪抽提仪:SZF-06型,上海拓西电子科技有限公司;

匀浆机:FSH-2A型,常州翔天实验仪器厂。

1.3 试验方法

1.3.1 样品预处理 新鲜带鱼去除鳃、尾、内脏以及腹腔内黑膜(不切块),根据带鱼体重,将质量分数2%的NaCl溶液均匀涂抹于带鱼表面。将带鱼风干2~5 d(风速2~6 m/s,相对湿度40%~60%,温度4~7℃),使其水分含量维持在60%~70%,水分活度为0.90~0.95,采购后将风干带鱼置于装有碎冰块的保温箱内,并于0.5 h内迅速运回实验室。

将风干带鱼解冻后去头去尾,用灭菌纱布擦干其表面水分,随机分为4组(见表1)。其中,茶黄素粉末溶于蒸馏水配成溶液,再以喷雾形式涂抹于带鱼表面。将封装后的带鱼样本立即于4℃贮藏10 d。从第0天开始,每2 d取样一次进行指标测定。

1.3.2 PV测定 根据GB 5009.227—2016,按式(1)计算PV。

表1 风干带鱼分组情况

Table 1 Groups of air-dried hairtail

组别	处理情况
AP-C	空气包装,不处理
AP-T	空气包装,0.3 g/kg 茶黄素
MAP-C	气调包装(70% CO ₂ +30% N ₂),不处理
MAP-T	气调包装(70% CO ₂ +30% N ₂),0.3 g/kg 茶黄素

$$B = \frac{1000 \times (V_1 - V_0) \times c_0}{m_0}, \quad (1)$$

式中:

B ——过氧化值, meq/kg;

V_1 ——消耗的硫代硫酸钠标准滴定溶液体积, mL;

V_0 ——空白组消耗的硫代硫酸钠标准滴定溶液体积, mL;

c_0 ——硫代硫酸钠溶液的浓度, mol/L;

m_0 ——提取的脂质样品质量, kg。

1.3.3 TBARS 值测定 根据 GB 5009.181—2016, 按式(2)计算带鱼肌肉中 TBARS 值。

$$D = \frac{c_1 \times V_2 \times 1000}{m_1 \times 1000}, \quad (2)$$

式中:

D ——硫代巴比妥酸值, mg MDA/kg 肌肉;

c_1 ——根据标准曲线计算出的 MDA 质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

V_2 ——所得溶液体积, mL;

m_1 ——样品肌肉质量, g。

1.3.4 DPPH 自由基清除能力测定 按 DPPH 自由基测定试剂盒指导手册进行操作。定义每毫克风干带鱼组织在 25 °C 下避光反应 30 min 的 DPPH 自由基清除能力等同于每 1 $\mu\text{g/mL}$ 的 Trolox 抗氧化剂清除 DPPH 自由基的能力为一个活力单位。按式(3)计算风干带鱼肌肉样品中 DPPH 自由基清除能力。

$$E = \frac{C_T \times V_3 \times n}{m_2}, \quad (3)$$

式中:

E ——DPPH 自由基清除能力, $\mu\text{g Trolox/g}$;

C_T ——吸光度代入标准曲线得到的相当的 Trolox 质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

V_3 ——组织提取液的总体积, mL;

n ——提取液对组织的稀释倍数;

m_2 ——组织样品质量, g。

1.3.5 超氧阴离子自由基清除能力测定 按超氧阴离子检测试剂盒指导手册进行操作。在反应体系内, 每克风

干带鱼肌肉组织于 37 °C 下作用 40 min 所清除的超氧阴离子自由基相当于 1 mg 维生素 C 所清除的超氧阴离子自由基的变化值为一个活力单位。按式(4)计算风干带鱼肌肉样品中超氧阴离子自由基清除能力。

$$F = \frac{(A_c - A_1) \times C_s \times N \times 1000}{A_c - A_s}, \quad (4)$$

式中:

F ——超氧阴离子自由基清除能力, U/g;

A_c 、 A_1 、 A_s ——对照组、试验组和标准组样品在 550 nm 处测得的吸光度;

C_s ——标准品浓度, mmol/L;

N ——带鱼样品测试前的稀释倍数。

1.3.6 羟自由基清除能力测定 按羟自由基测定试剂盒指导手册进行操作。将每毫克带鱼组织于 37 °C 下作用 1 min, 若能导致反应体系内 H_2O_2 浓度减少 1 mmol/L, 则视作该组织具有清除 1 个羟自由基能力单位。按式(5)计算风干带鱼肌肉样品中羟自由基清除能力。

$$G = \frac{(A_c - A_1) \times C_s \times N}{(A_s - A_B) \times V_4}, \quad (5)$$

式中:

G ——羟自由基清除能力, U/mg;

A_c 、 A_1 、 A_s ——对照组、试验组和标准组样品在 550 nm 处测得的吸光度;

C_s ——标准品浓度, mmol/L;

V_4 ——样品取样量, mL;

N ——带鱼样品测试前的稀释倍数。

1.3.7 TBC 测定 按 GB 4789.2—2022 执行。

1.3.8 感官评定 根据管彬彬等^[11]的方法稍作修改。由 6 名经过培训的实验室人员组成感官评定小组, 按表 2 根据风干带鱼鱼肉的色泽、气味、质地、外观完整性、汁液流失等进行综合评分, 0 表示鱼块品质最好, 评分的上升表示鱼肉块品质的劣变。

1.4 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 27 和 Origin 2024 软件分别进行数据分析和制图, 采用 ANOVA 方差分析法分析差异

表 2 风干带鱼感官评定标准

Table 2 Sensory evaluation standard of air-dried hairtail

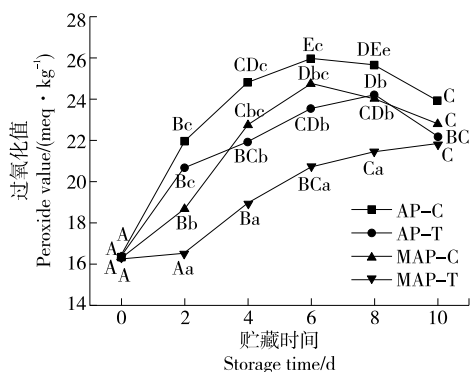
分值	色泽	气味	质地	外观完整性	汁液流失
0	银白色, 表面有光泽, 无氧化斑	正常鱼腥味, 无异味	肌肉紧实, 弹性好, 无黏液分泌	表面完整, 无干裂或分层	无汁液渗出
1	轻微发黄或暗淡, 局部氧化斑	腥味增强, 略有酸味或哈喇味	弹性减弱, 轻微松软, 少量黏液	轻微开裂或边缘翘起	轻微渗出, 包装内有少量液体
2	明显发黄或灰褐, 大面积氧化斑	强烈腐臭、氨味或酸败味	松软无弹性, 黏液大量分泌或干硬	明显开裂或分层	大量汁液聚集

显著性水平($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 对冷藏风干带鱼PV的影响

由图1可知,随着冷藏时间的延长,AP-C组、AP-T组和MAP-C组的PV呈先上升后下降趋势,MAP-T组呈持续上升趋势。不同处理方式对风干带鱼脂质初级氧化的抑制效果存在差异,MAP-T组效果最好。冷藏第0天,各组PV无显著性差异。冷藏第6天,AP-C组PV显著高于其他组($P<0.05$),而MAP-C组和AP-T组的初级氧化物质积累量较低,且均显著高于MAP-T组($P<0.05$)。PV上升可能是由于鱼肉发生初级氧化,导致过氧化氢及多种代谢中间产物的形成与积累^[12]。当 $PV>39.4$ meq/kg时,食品将超出安全食用限度。冷藏第10天,4组的PV均符合要求,AP-C组和MAP-C组的过氧化产物含量于第6天后下降,而AP-T组于第8天后下降,可能是这些样品的油脂开始进入深度氧化阶段,导致先前产生的过氧化物发生分解^[13]。冷藏第10天,MAP-T组PV仍在持续累积,表明该组的脂质氧化程度相对较低。综上,气调包装和茶黄素均能有效抑制脂质过氧化,且与单独使用气调包装或单独使用茶黄素的样品相比二者联合使用效果更好,可显著延缓风干带鱼在贮藏期间脂质初级氧化的进程。



大写字母不同表示相同组别不同贮藏时间差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示不同组别相同贮藏时间差异显著($P<0.05$)

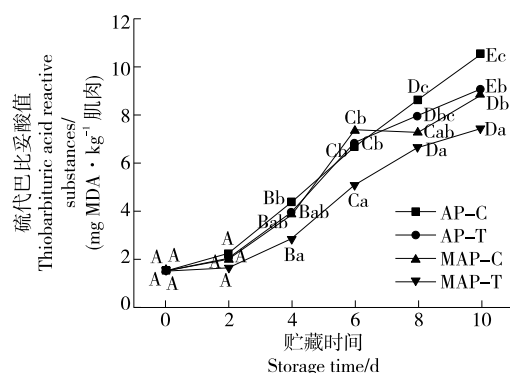
图1 茶黄素协同气调包装对PV的影响

Figure 1 Effect of theaflavin and MAP on PV

2.2 对冷藏风干带鱼TBARS的影响

作为脂质过氧化过程的次级产物,丙二醛(MDA)是评估样品内脂质氧化程度的关键指标。TBARS通过测定MDA与硫代巴比妥酸(TBA)反应生成的红色络合物以量化脂质氧化的严重程度。由图2可知,所有风干带鱼样品在第0天的TBARS水平相似,随后在冷藏过程中均呈递增趋势,表明各组样品均经历了明显的脂质氧化反应过程。这可能是鱼肉中的不饱和脂肪酸先被氧化成不稳

定的氢过氧化物,随后分解为一系列小分子化合物,如醛、酮等,其中MDA作为主要的降解产物在样品中逐渐累积^[14]。与其他组相比,MAP-T组在整个冷藏期间表现出更优异的次级氧化抑制能力。冷藏第10天,MAP-T组的TBARS值显著低于其他组,表明茶黄素和气调包装对风干带鱼MDA含量具有显著的抑制作用($P<0.05$),且二者联合使用效果更显著。茶黄素的抗氧化作用可能源于其清除自由基的能力,以及对生物体内与氧化作用相关酶活性的调节,从而延缓了脂质氧化速度^[15]。此外,气调包装通过提供无氧环境,直接隔断了鱼体与氧气的接触,抑制了微生物的生长繁殖,进而减少了微生物的代谢产物脂肪酶对脂质的催化氧化^[16]。这与PV的变化结果相一致。



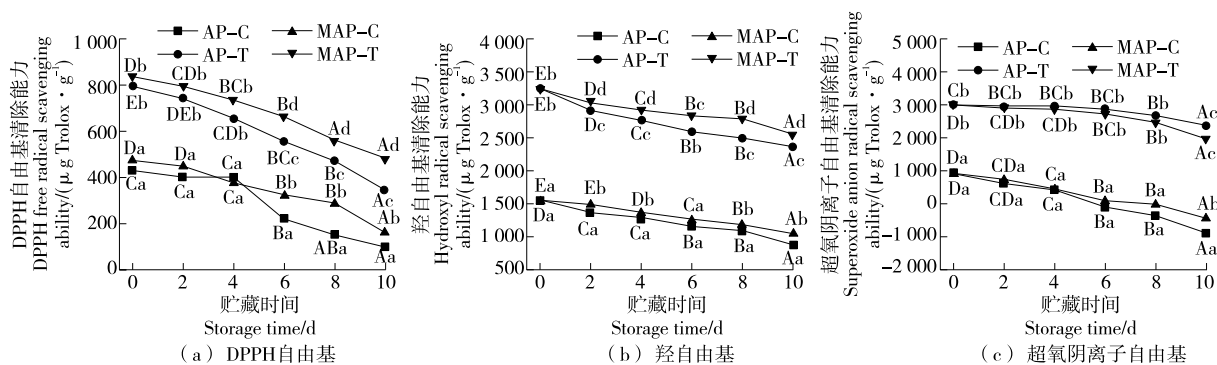
大写字母不同表示相同组别不同贮藏时间差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示不同组别相同贮藏时间差异显著($P<0.05$)

图2 茶黄素协同气调包装对TBARS的影响

Figure 2 Effect of theaflavin and MAP on TBARS

2.3 对冷藏风干带鱼自由基清除能力的影响

由图3可知,随着冷藏时间的延长,风干带鱼的DPPH自由基清除能力、羟自由基清除能力以及超氧阴离子自由基清除能力均呈下降趋势。这可能是由于风干带鱼脂质氧化的次级产物随着冷藏时间的延长而增加^[17],同时抗氧化酶,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)等活性下降^[18]。此外,随着氧化过程的持续,带鱼肌肉内的蛋白质羰基含量呈显著上升趋势,而巯基含量先上升后下降,蛋白质结构的改变使抗氧化功能减弱。此外,茶黄素和气调包装联用对风干带鱼中不同自由基清除能力产生了显著影响。茶黄素在清除自由基过程中发挥了重要作用,显著提升了风干带鱼的抗氧化能力。MAP-T组和AP-T组的自由基清除能力显著大于MAP-C组和AP-C组($P<0.05$)。冷藏第10天,各组自由基清除能力表现出明显差异,MAP-T组、AP-T组、MAP-C组和AP-C组的DPPH自由基清除能力分别为480.25, 341.70, 159.00, 96.50 $\mu\text{g Trolox/g}$,羟自



大写字母不同表示相同组别不同贮藏时间差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母不同表示不同组别相同贮藏时间差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 茶黄素联用气调包装对自由基清除能力的影响

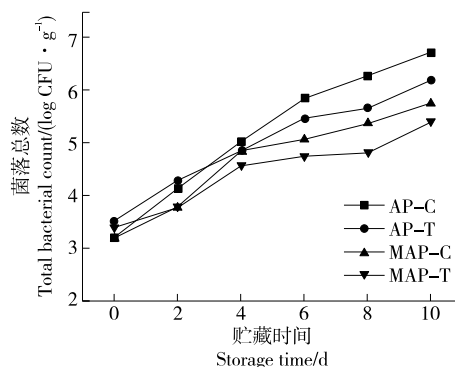
Figure 3 Effect of theaflavin and MAP on free radical scavenging activity

由基清除能力分别为 2 546.68, 2 371.49, 1 058.17, 880.27 U/mg, 超氧阴离子自由基清除能力分别为 1 984.08, 2 372.61, -426.75, -885.35 U/g。茶黄素的抗氧化性突出,可能源于其丰富的酚羟基结构,能显著激活风干带鱼细胞内 SOD 和 CAT 活性,从而增强自由基清除能力^[19]。此外,茶黄素还能与脂质链式氧化的中间产物相互作用,如与脂自由基或脂氧自由基反应,以终止链反应并抑制脂质的氧化过程^[20]。综上,茶黄素不仅发挥预防性的抗氧化作用,还能充当链终止型的抗氧化剂,发挥双重作用。

2.4 对冷藏风干带鱼 TBC 的影响

GB 10136—2015 规定,当 $TBC > 5.00 \log(\text{CFU/g})$ 时,食品将超出安全食用限度。由图 4 可知,各组风干带鱼的 TBC 随着冷藏时间的延长而快速上升,表明其腐败程度不断增加,且在整个冷藏期间 AP-T 组和 MAP-C 组的 TBC 均高于 MAP-T 组。冷藏第 0 天,各组样品的 TBC 均处于较低水平,冷藏第 4 天,AP-C 组的 TBC 为 $5.03 \log(\text{CFU/g})$,已超出安全食用限度。表明在冷藏条件下,尤其是在空气包装的对照组中微生物的生长速度较快。冷藏第 10 天,各组 TBC 分别为 6.71, 6.19, 5.74, $5.40 \log(\text{CFU/g})$,相较于初始值分别增长了 110.34%, 76.35%, 79.94%, 59.29%。与单独采用茶黄素的 AP-T 组和单独采用气调包装的 MAP-C 组相比,茶黄素结合气调包装的 MAP-T 组的 TBC 值明显下降,显著低于其他组 ($P < 0.05$),AP-C 组的 TBC 最高 ($P < 0.05$)。在风干带鱼的低温贮藏中,茶黄素或气调包装联合使用时抑制微生物生长效果最显著的原因可能是茶黄素与鱼体中的金属离子发生络合反应,生成的络合物具有的较强抗菌性^[21]。此外,茶黄素通过抑制细菌中葡糖转移酶活性,干扰了不溶性葡聚糖的生物生成过程,进而减少了鱼肉中细菌的黏附^[22]。与此同时,气调包装相较于空气包装能更有效地隔绝氧气,抑制鱼肉中常见的好氧腐败微生物的生长,

如李斯特菌属、沙门氏菌和环丝菌属等。高浓度的 CO_2 能够抑制微生物的生长,尤其是革兰氏阴性菌^[23]。单独使用茶黄素或气调包装均能有效抑制微生物的生长与繁殖,而茶黄素结合气调包装联合使用的效果最为显著。



大写字母不同表示相同组别不同贮藏时间差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母不同表示不同组别相同贮藏时间差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 茶黄素联用气调包装对 TBC 的影响

Figure 4 Effect of theaflavin and MAP on TBC

2.5 对冷藏风干带鱼感官评分的影响

由图 5 可知,随着冷藏时间的延长,各组样品的感官品质逐渐降低,冷藏第 10 天的感官评分达到最大值,主要表现为鱼肉切面暗淡无光泽,腥味浓重,肉质松软且缺乏弹性。冷藏第 2, 4, 6, 8 天,MAP-T 组的感官评分值均低于 AP-T 组和 MAP-C 组,表明茶黄素协同气调包装具有显著的保鲜效果。

2.6 相关性分析

由图 6 可知,AP-C、AP-T、MAP-C 和 MAP-T 组风干带鱼 PV、TBARS 和 TBC 之间呈显著正相关 ($P < 0.05$),表明鱼肉的氧化与腐败过程同时发生。随着冷藏时间的延长,带鱼品质迅速下降。微生物数量的增加可能与脂质氧化相互促进,共同导致带鱼品质劣化。4 组风干带鱼的

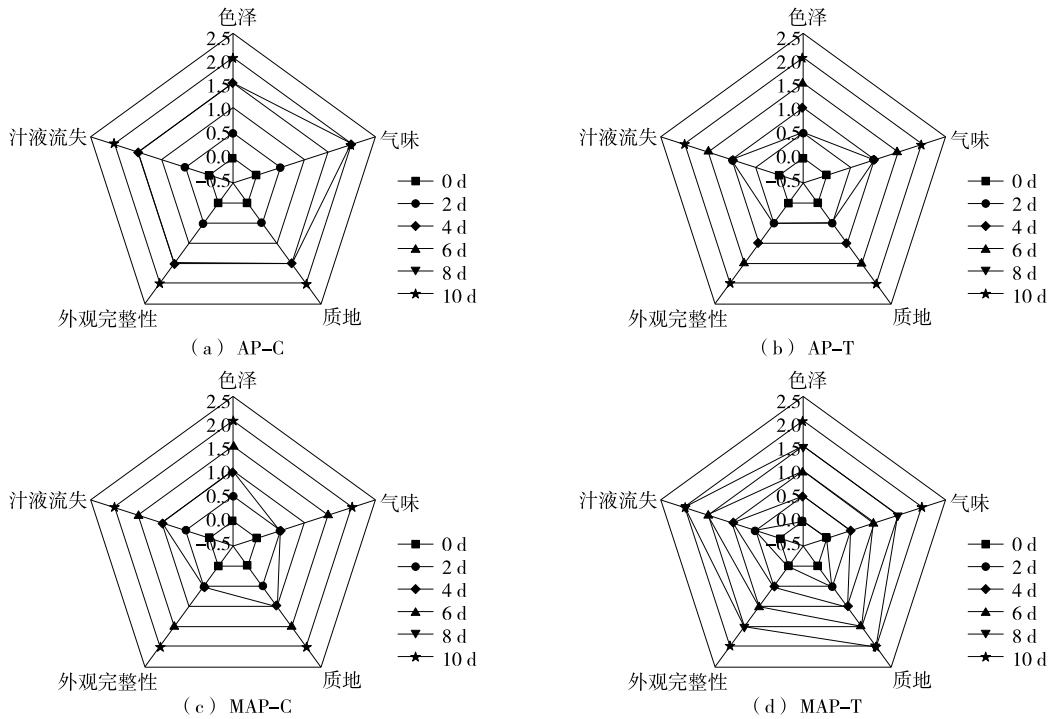


图5 茶黄素联用气调包装对风干带鱼感官评分的影响

Figure 5 Effect of theaflavin and MAP on sensory evaluation standard

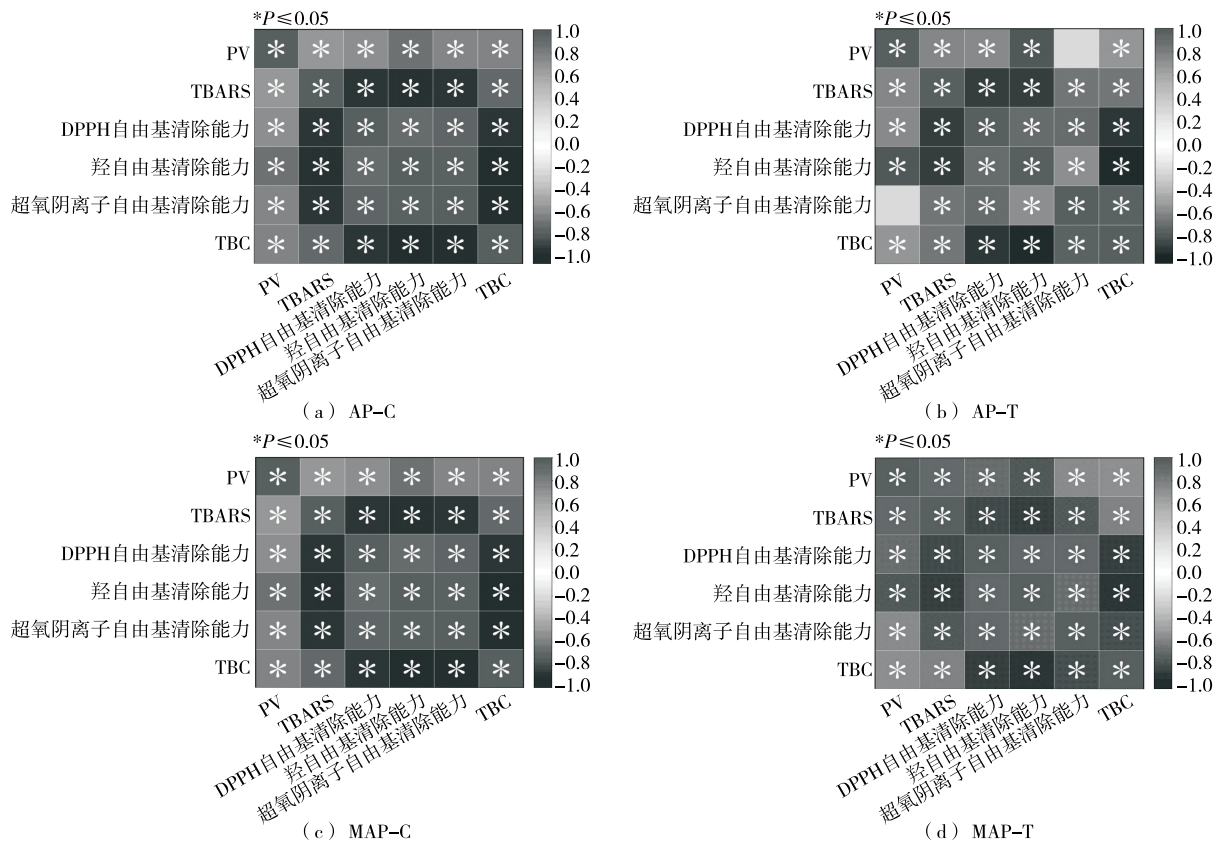


图6 冷藏期间风干带鱼TBC脂肪氧化、腐败和抗氧化程度的皮尔逊相关性分析

Figure 6 Pearson correlation analysis of TBC, lipid oxidation, spoilage, and antioxidant capacity in air-dried hairtail during refrigerated storage

DPPH 自由基清除能力、羟自由基清除能力和超氧阴离子自由基清除能力之间均呈显著正相关($P < 0.05$)。这表明在风干带鱼氧化过程中,3 种自由基可能具有协同作用,推测是带鱼中存在一种或多种抗氧化物质或机制,能够同时清除 DPPH 自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基。这种协同作用可能与带鱼中天然存在的生物活性成分,如生物活性肽、多酚等有关^[24]。此外,4 组风干带鱼的抗氧化能力与 PV、TBARS 和 TBC 均呈显著负相关($P < 0.05$),表明在冷藏过程中,风干带鱼的抗氧化能力与脂肪氧化程度和腐败程度密切相关。DPPH 自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基清除能力的增强,有助于减少风干带鱼在冷藏过程中的氧化损伤。由此可进一步推测,通过添加天然抗氧化剂或优化冷藏条件,可以有效增强风干带鱼的抗氧化能力,减少氧化损伤,延缓脂肪氧化进程。

3 结论

以风干带鱼为研究对象,通过评估过氧化值、硫代巴比妥酸值、DPPH 自由基清除能力、超氧阴离子自由基清除能力、羟自由基清除能力、菌落总数以及感官评分等指标,探究了茶黄素和气调包装联用对风干带鱼脂质品质在 4 °C 冷藏条件下的影响。结果表明,气调包装和茶黄素对脂质过氧化具有显著的抑制过氧化值、硫代巴比妥酸值和菌落总数的升高,有效延缓风干带鱼在冷藏期间脂质初级和次级氧化的进程。同时,茶黄素处理显著提升了风干带鱼对自由基的抑制能力,且这种抗氧化活性在冷藏期间表现出良好的稳定性。此外,经茶黄素结合气调包装处理的风干带鱼在冷藏过程中的感官评分值上升缓慢,表明该处理能够改善风干带鱼的感官品质。相关性分析结果表明,脂肪氧化程度、腐败程度与抗氧化程度密切相关。综上,茶黄素和气调包装联用在风干带鱼冷藏过程中发挥了显著的保护作用,不仅延缓了脂质的氧化进程,还显著抑制了微生物的生长。该研究也存在一些不足之处,例如如在 4 °C 冷藏条件下进行试验,未能全面评估不同贮藏温度下保鲜技术的适应性;对茶黄素的具体作用机制尚未深入探讨,缺乏分子水平上的相互作用研究;未对风干带鱼的感官品质进行系统评价,无法确定其在保鲜后的感官品质是否符合消费者期望。未来研究可从拓展温度条件、深入探究茶黄素的作用机制、建立完善的感官评价体系等方面开展,以进一步完善风干带鱼的保鲜技术。

参考文献

[1] 郑文雄, 杨榕琳, 水珊珊, 等. 热加工对 3 种带鱼肌球蛋白功能特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 211-217.

ZHENG W X, YANG R L, SHUI S S, et al. Effect of heat processing on the functional properties of myosin in three kinds of hairtail[J]. Food Science, 2024, 45(7): 211-217.

[2] DENG H, WU G, ZHOU L Y, et al. Microbial contribution to 14 biogenic amines accumulation in refrigerated raw and deep-fried hairtails (*Trichiurus lepturus*) [J]. Food Chemistry, 2024, 443: 138509.

[3] 廖月琴, 吴盈茹, 杜琪, 等. 新鲜与风干带鱼肌肉品质及营养成分分析与评价[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(1): 185-191.

LIAO Y Q, WU Y R, DU Q, et al. Analysis and evaluation of fresh and air-dried hairtail muscle quality and nutritional components[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(1): 185-191.

[4] ZHENG W X, YANG R L, SHUI S S, et al. Comparative analyses of muscle quality in hooked, trawl-net, and radar-net hairtail (*Trichiurus haumela*) during thermal processing[J]. Foods, 2024, 13(18): 3 005.

[5] GHALY E A, BROOKS M S, BUDGE S, et al. Fish spoilage mechanisms and preservation techniques: review[J]. American Journal of Applied Sciences, 2010, 7(7): 859-877.

[6] 谢虹, 罗志聪, 李熙灿. 茶黄素抗氧化化学机制研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 23-26.

XIE H, LUO Z C, LI X C. Chemical mechanism of antioxidation of theaflavin[J]. Food & Machinery, 2018, 34(3): 23-26.

[7] 刘伟, 周洁, 龚正礼. 茶黄素的功能活性研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 386-391.

LIU W, ZHOU J, GONG Z L. Research progress in functional activity of theaflavins[J]. Food Science, 2013, 34(11): 386-391.

[8] 毛俊龙. 茶黄素对大黄鱼贮藏过程中品质特性的影响作用[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021: 97-99.

MAO J L. Effect of theaflavin on quality characteristic of large yellow croaker during storage[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021: 97-99.

[9] 向明月. 生鲜农产品冷链物流包装技术研究及应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 103-109, 141.

XIANG M Y. Research and application progress of cold-chain logistics packaging technology of fresh agricultural products[J]. Food & Machinery, 2023, 39(8): 103-109, 141.

[10] CHA H Y, LIANG S M, SHI K Y, et al. Effect of modified atmosphere packaging on the quality characteristics and bacterial community succession of super-chilled chicken meat in biopreservation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 189: 115547.

[11] 管彬彬, 肖蓓, 熊金恩. 水产品新鲜度快速检测技术研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2024, 31(3): 22-26, 30.

GUAN B B, XIAO B, XIONG J E. Research progress on rapid detection technology of freshness of aquatic products[J].

- Cereal & Food Industry, 2024, 31(3): 22-26, 30.
- [12] 赵腾飞, 应晓国, 张宾, 等. 不同贮藏时间对大黄鱼鱼油脂质氧化的影响[C]// 中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集. 北京: 中国食品科学技术学会, 2020: 2.
ZHAO T F, YING X G, ZHANG B, et al. The impact of different storage times on lipid oxidation in arge yellow croaker[C]// Proceedings of the 17th Annual Conference of the Chinese Institute of Food Science and Technology. Beijing: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020: 2.
- [13] ZHAN Y X, LI J G, LI T Y, et al. Investigation of the alternations in lipid oxidation and lipase activity in air-dried hairtail (*Trichiurus lepturus*) during chilled storage[J]. Foods, 2024, 13(2): 229.
- [14] DOMÍNGUEZ R, PATEIRO M, GAGAOUA M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products[J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 429.
- [15] 张睿, 张艺华, 周家萍. 茶黄素的生物活性、作用机制和应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 408-417.
ZHANG R, ZHANG Y H, ZHOU J P. Research progress on the bioactivity, mechanisms, and applications of theaflavins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 408-417.
- [16] TAŞKAYA L, YAŞAR E. Determination of some quality properties of "hamsi kaygana" prepared with different additives [J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(2): 483-491.
- [17] 段茹碧, 何燕富, 邱丹, 等. 模拟物流运输条件下冻半干金鲷鱼品质和风味变化[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 143-151.
DUAN R B, HE Y F, QIU D, et al. Changes in quality and flavor of frozen semi-dried pomfret under simulated logistics and transportation conditions[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 143-151.
- [18] DE JORGE GOUVÊA F, DE OLIVEIRA V S, MARIANO B J, et al. Natural antioxidants as strategy to minimize the presence of lipid oxidation products in canned fish: research progress, current trends and future perspectives[J]. Food Research International, 2023, 173: 113314.
- [19] 汪晟羽, 兰林, 段树华, 等. 超声辅助酶法提取绿茶中茶黄素的工艺优化及活性研究[J]. 食品科技, 2022, 47(7): 188-194.
WANG S Y, LAN L, DUAN S H, et al. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction of theaflavins from green tea and study on its activity[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(7): 188-194.
- [20] YIN H Y, XU L B, PORTER N A. Free radical lipid peroxidation: mechanisms and analysis[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(10): 5 944-5 972.
- [21] WANG J, SHAN H Y, LI P, et al. Antibacterial effects of theaflavins against *Staphylococcus aureus* and *Salmonella paratyphi B*: role of environmental factors and food matrices [J]. Foods, 2023, 12(13): 2 615.
- [22] LI M Q, DONG Y X, KANG M J, et al. Potential anti-hyperglycemic activity of black tea theaflavins through inhibiting α -amylase[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101296.
- [23] 曹启予, 高宇杰, 张晓荟, 等. 糖基转移酶 WekM 参与禽致病性大肠杆菌脂多糖合成和环境适应[J]. 微生物学报, 2024, 64(8): 2 702-2 712.
CAO Q Y, GAO Y J, ZHANG X H, et al. The glycosyltransferase WekM is involved in the lipopolysaccharide biosynthesis and environmental adaptation of avian pathogenic *Escherichia coli*[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(8): 2 702-2 712.
- [24] 吴园园, 郑克炜, 李文珠, 等. 带鱼生物活性肽酶法制备和功能特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 425-433.
WU Y Y, ZHENG K W, LI W Z, et al. Research progress on enzymatic preparation and functional properties of bioactive peptides in hairtail[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 425-433.