不同包装方式下生干与熟干虾皮贮藏品质变化

顾鑫[1]，尹明晓[1,2]，冯晨轩[1]，水珊珊[1*]，张宾[1,2*]

（1.浙江海洋大学食品与药学学院，舟山市海洋食品营养与智能加工重点实验室，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：生、熟干虾皮贮藏易氧化褐变、滋生微生物，目前缺少高低温多指标对比分析。为明确包装方式、贮藏温度等对虾皮品质的协调作用，将生、熟干虾皮分别采用常规封口袋（Conventional Packaging，CP）、锡箔袋（Aluminum Foil Packaging，AP）、真空包装（Vacuum Packaging，VP）于-18、25 ℃贮藏，冻藏组每 20 d、室温组每 4 d 取样，测定色差（L^*、b^*）、褐变指数（Browning Index，BI）、过氧化值（Peroxide Value，PV）、硫代巴比妥酸反应物（Thiobarbituric Acid Reactive Substances，TBARS）、总挥发性盐基氮（Total Volatile Basic Nitrogen，TVB-N）、菌落总数（Total Viable Count，TVC）、荧光强度、多酚氧化酶（Polyphenol Oxidase，PPO）活性及感官评分。结果表明，贮藏过程中 L^*值、感官评分下降，b^*值、BI、PV、TBARS、TVB-N、TVC 及荧光强度上升，-18 ℃下 PPO 活性先降后升，25 ℃各组变化各异。25 ℃下各指标劣变速率高于-18 ℃；相同条件下熟干虾皮劣变更严重；包装方式劣变速率为 CP>AP>VP。综上，生干虾皮贮藏稳定性更佳，-18 ℃结合真空或锡箔包装可有效抑制虾皮品质劣变，为虾皮保鲜包装筛选、工艺优化及产业化应用提供理论依据。

关键词：虾皮；包装方式；贮藏温度；品质劣变；脂肪氧化

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.0958

Changes of Different Packaging Methods on The Storage Quality of Raw-Dried and Cooked-Dried Shrimp

GU Xin[1], YIN Mingxiao[1,2], FENG Chenxuan[1], SHUI Shanshan[1*], ZHANG Bin[1,2*]

(1.Zhoushan Key Laboratory of Marine Food Nutrition and Intelligent Processing, College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China) (2.Pisa Marine Graduate School, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Raw-dried and cooked-dried shrimp are susceptible to oxidative browning and microbial proliferation during storage, and multi-index comparative researches under high and low temperatures are insufficient. To clarify the synergistic effects of packaging modes and storage temperatures on the quality of dried shrimp, raw-dried and cooked-dried shrimp were packaged in conventional packaging (CP), aluminum foil packaging (AP), and vacuum packaging (VP), and stored at -18 ℃ and 25 ℃, respectively. Samples were collected every 20 d for the frozen group and every 4 d for the room-temperature group. Color difference (L^* and b^*), browning index (BI), peroxide value (PV), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) content, total volatile basic nitrogen (TVB-N) content, total viable count (TVC), fluorescence intensity, polyphenol oxidase (PPO) activity, and sensory scores were determined. The results indicated that L^* values and sensory scores were reduced with extended storage time, while b^* values, BI, PV, TBARS, TVB-N, TVC, and fluorescence intensity were elevated. PPO activity was decreased first and then increased at -18 ℃, and distinct variation trends were found in all groups at 25 ℃. Significantly higher deterioration rates of all indicators were observed at 25 ℃ than at -18 ℃. More severe quality deterioration was detected in cooked-dried shrimp under identical conditions, and the deterioration rates of different packaging types followed the sequence of CP>AP>VP. In conclusion, superior storage stability was exhibited by raw-dried shrimp. The combined application of -18 ℃ low-temperature storage with vacuum or aluminum foil packaging could effectively restrain quality deterioration of dried shrimp, which offered theoretical support for packaging screening, process optimization and industrial preservation of dried shrimp.

收稿日期：2026-06-26；修回日期：2026-08-05；接受日期：2026-08-06

基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFD2100504）；国家自然基金项目（32301972&U23A20263）；浙江省自然基金项目（LRG25C200001）

作者简介：顾鑫（2001-），女，硕士研究生，研究方向：水产品加工及贮藏，E-mail：guxin2025@zjou.edu.cn

通讯作者：水珊珊（1989-），女，博士，副教授，研究方向：水产品加工及贮藏、水产食品分子营养，E-mail：shuiss@zjou.edu.cn；共同通讯作者：张宾（1981-），男，博士，教授，研究方向：水产品加工及贮藏，E-mail：zhangbin@zjou.edu.cn

Key words: dried shrimp; packaging method; storage temperature; quality deterioration; lipid oxidation

虾皮由中国毛虾（*Acetes chinensis*）干制而成，是我国沿海常见的调味品。依据加工工艺可分为生干虾皮（淡晒）与熟干虾皮（盐煮后晒制）两类[1]。虾皮富含蛋白质、矿物质及多不饱和脂肪酸，钙含量高，兼具营养与经济价值[2]。但虾皮水分活度较高、不饱和脂肪酸易氧化，在微生物、酶及氧气温度作用下，常发生褐变和脂肪氧化，导致感官下降、营养流失及安全风险[3]。

包装是延缓水产干制品贮藏品质劣变、延长货架期的常用手段，可通过阻隔氧气、光照及微生物，在样品周围形成相对稳定的微环境[4]。水产品包装形式多样，其中常规封口袋、锡箔袋及真空袋因操作简便、成本适中而应用广泛[4,5]。常规封口袋成本较低、操作简便，适用于小规模生产及短期流通[5]，但阻氧、阻湿及抑菌性能较差，易加速水产品氧化腐败[6]。Qiu 等[7]研究表明，淡干虾皮用常规封口袋在低温贮藏后期微生物大幅增加，抑菌保鲜效果有限。锡箔袋具有优异的阻氧、阻光、阻水汽性能[8]，可有效延缓品质劣变。赵燕芬等[9]在南极磷虾制品贮藏研究中发现，用锡箔袋包装后，褐变指数的增幅控制在 30%以内，保鲜效果显著优于普通塑料包装。真空袋则通过抽除包装内氧气，抑制需氧微生物和氧化反应[10][11]。虽然上述三种包装方式在水产品保鲜中各有应用，但针对生干与熟干虾皮贮藏品质的对比研究较少，特别是结合多项指标综合分析劣变机制的报道更为缺乏。

虾皮贮藏品质通常采用理化、微生物及感官指标进行评价。Jacobsen 等[12]证实冷藏条件下常规包装虾皮的菌落总数（Total Viable Count，TVC）增长速率较室温组下降 60%以上。多酚氧化酶（Polyphenol Oxidase，PPO）活性直接影响虾皮色泽稳定性[13]，Lyu 等[14]发现，常温贮藏 7 d 后 PPO 活性下降了 35%，但仍可催化酚类物质氧化并导致褐变指数升高。阮珊艳等[15]研究指出，结合色差（L^*值、b^*值）与褐变指数，可清晰地判断虾皮色泽的变质情况。此外，段静瑶等[16]还发现，荧光强度可间接反映美拉德反应及非酶促褐变进程。感官评价方面，郭莹莹等[10]将色泽与气味纳入虾皮品质判定的核心依据，品质分值指标越低，产品腐败程度越高。现有研究多限于单一贮藏条件或加工类型，不同包装下生干与熟干虾皮的多指标同步变化研究尚少。

本研究以生干与熟干虾皮为对象，分别于-18 ℃冷冻及 25 ℃室温条件下贮藏，测定褐变、脂肪氧化、微生物、美拉德反应及感官等相关指标。探究各包装方式对虾皮品质的影响，对比保鲜效果与适用条件。结果表明，贮藏温度、包装方式及加工类型共同影响劣变进程，为包装选择和保鲜改进提供参考，有助于产业标准化。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

生干虾皮和熟干虾皮于 2025 年 11 月至 12 月购自浙江舟山当地水产市场，-80 ℃冻藏备用。

氧化镁、硼酸、甲基红–溴甲酚绿指示剂、无水乙醇（均为分析纯），国药集团化学试剂有限公司；盐酸标准滴定液（0.1 mol Ł$^{-1}$），广州和为医药科技有限公司；磷酸盐缓冲液（0.02 mol Ł$^{-1}$，pH 7.0），平根科技有限公司；过氧化物测定试剂盒、多酚氧化酶（PPO）检测试剂盒（均为食品级），北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

TGL-16M 型台式高速冷冻离心机，湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；CR-10 型便携式色差仪，柯尼卡美能达（中国）投资有限公司；KDN-520 型全自动凯氏定氮仪，上海亿精密量仪有限公司；TMS-Pilot 型 pH 计，上海仪电科学仪器股份有限公司；UV-1910 型紫外可见分光光度计，上海棱光技术有限公司；JC-HD 型水分活度测量仪，青岛聚创环保集团有限公司；DZ-600-2S 型双室真空包装机，浙江创盟包装机械有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理与贮藏

将生干虾皮和熟干虾皮分别装入常规封口袋（Conventional Packaging，CP）、锡箔袋（Aluminum Foil Packaging，AP）和真空袋（Vacuum Packaging，VP），真空袋采用真空包装机抽真空密封。包装后样品分为两组，分别于-18 ℃冷冻贮藏和 25 ℃室温贮藏，每组设 3 个平行。冻藏组每 20 d、室温组每 4 d 取样测定。

1.3.2 色泽与褐变指数测定

采用便携式色差仪测定虾皮的 L^*值（明度）和 b^*值（黄蓝度），每个样品选取 3 个不同部位测定，结果取平均值。褐变指数（Browning Index，BI）参照 Ajandouz 等[17]方法测定：称取虾皮样品 5 g，加入 25 mL 去离子水，8 000 r·min^{-1} 匀浆 2 min，5 000×*g* 离心 10 min，取上清液于 420 nm 波长下测定吸光度，以吸光度值表示 BI。

1.3.3 过氧化值与硫代巴比妥酸反应物含量测定

过氧化值（Peroxide Value，PV）采用过氧化物测定试剂盒测定，结果以 meq·kg^{-1} 表示。硫代巴比妥酸反应物（Thiobarbituric Acid Reactive Substances，TBARS）含量参照 Khazaei 等[18]方法并稍作修改：反应产物于 532 nm 波长处测定吸光度，结果以 nmol·mg^{-1} protein 表示。

1.3.4 总挥发性盐基氮与菌落总数含量测定

总挥发性盐基氮（Total Volatile Basic Nitrogen，TVB-N）含量参照 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中半微量定氮法测定。

TVC 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，结果以 lg (CFU/g) 表示。

1.3.5 美拉德反应程度测定

参照毕日秀等[19]方法并稍作修改。称取 2 g 虾皮，加入 20 mL 蒸馏水匀浆，定容至 100 mL，滤纸过滤。取 2 mL 滤液与 2 mL 40%三氯乙酸溶液混合，离心后取 1 mL 上清液，加入 5 mL 磷酸盐缓冲液（pH 7.0），以蒸馏水作空白对照，于激发波长 345 nm、发射波长 415 nm 处测定荧光强度。

1.3.6 多酚氧化酶活性测定

熟干虾皮经高温煮沸后 PPO 已失活，故仅测定生干虾皮中 PPO 活性。采用 PPO 检测试剂盒测定：称取 0.1 g 生干虾皮，加入 1 mL 磷酸盐缓冲液冰浴匀浆，4 ℃、8 000×*g* 离心 10 min，取上清液按试剂盒说明书操作，结果以 U·g^{-1}·min^{-1} 表示。

1.3.7 感官评价

参照 Li 等[6]方法并稍作修改。由 10 名经培训的评价员组成感官评定小组，从色泽、外观、滋味、气味 4 个维度按 10 分制评分：8~10 分为优，6~8 分为良，4~6 分为中，2~4 分为差，0~2 分为极差。结果以平均值表示。

表 1 虾皮感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of dried shrimp

评价指标	评价标准	得分
色泽 (10 分)	呈天然色泽（生干：淡粉/乳白色；熟干：浅黄/金黄色），均匀有光泽	8~10
	色泽基本均匀，略带轻微褐变或色差	6~8
	颜色不均匀，光泽较暗，局部明显褐变	4~6
	大部分区域呈棕黄色，褐变范围广	2~4
	严重泛棕黄或深褐色，完全失去天然色泽	0~2
外观 (10 分)	形态完整、疏松干爽，无结块、霉变及杂质	8~10
	多数形态完整，略松散结块，无霉变及明显杂质	6~8
	部分形态破损，轻微结块或表面附着少量杂质	4~6
	表面皱缩明显，结块较多，可见少量霉点或异物	2~4
	严重皱缩、结块成团，霉变严重或杂质较多	0~2
滋味 (10 分)	鲜味浓郁纯正，无异味，口感酥脆或干爽有嚼劲	8~10
	鲜味较淡，口感基本正常，无明显异味	6~8
	鲜味微弱，口感偏软或偏硬	4~6
	略带哈喇味、酸味等异味，口感粗糙	2~4
	异味强烈（腐败味、酸败味），无法食用	0~2
气味 (10 分)	具有天然鲜腥味，无其他异味	8~10
	天然鲜腥味较淡，无异味	6~8
	鲜腥味不明显，无异味	4~6
	出现轻微胺味、哈喇味等异味	2~4

胺味、腐败味等异味强烈	0~2

1.4 数据处理与分析

所有实验均设 3 组平行，结果以平均值±标准差表示。采用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行单因素方差分析（One−way ANOVA），Duncan 法进行多重比较，P<0.05 表示差异显著。采用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 不同贮藏条件对虾皮色差与褐变特性的影响

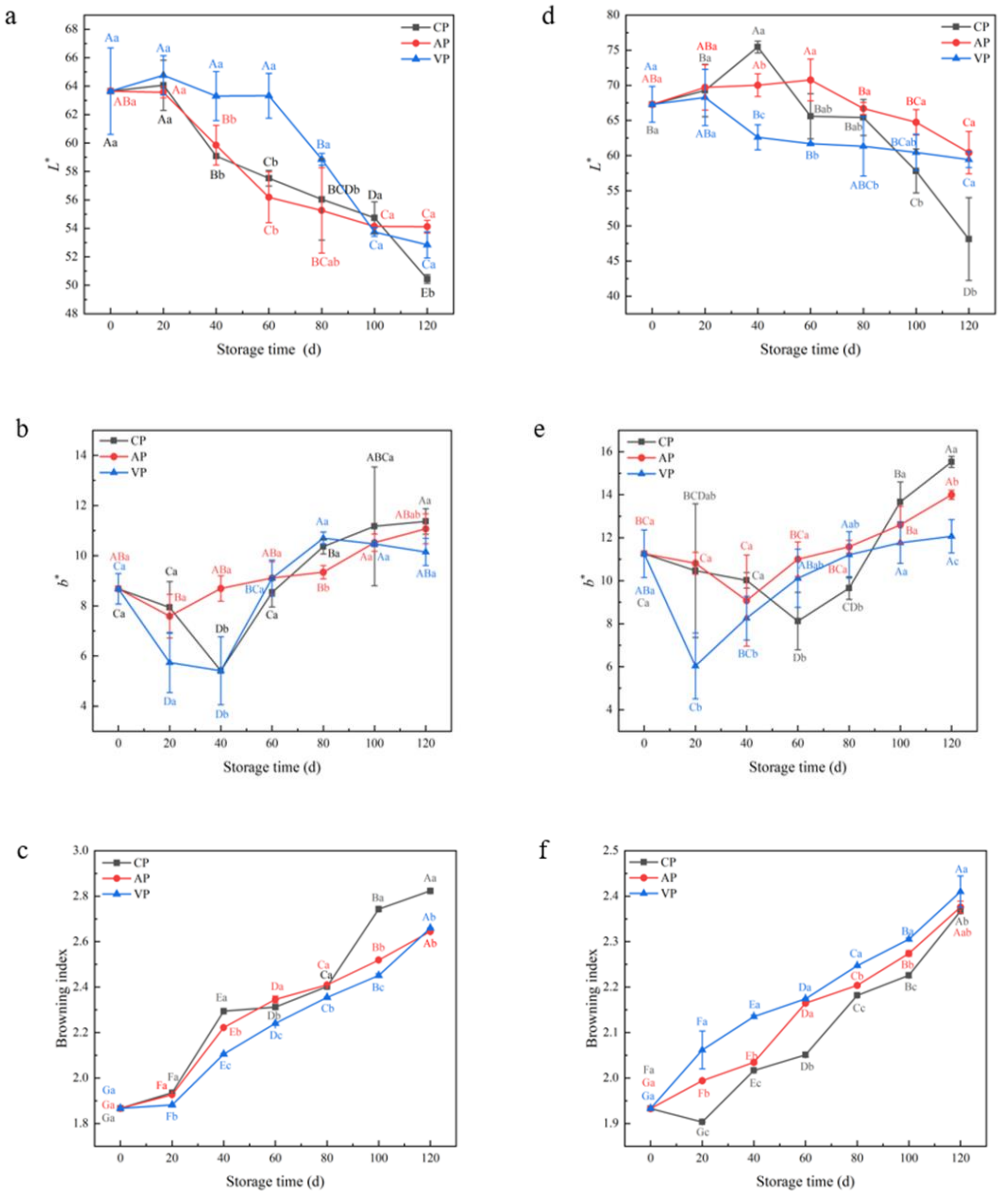


图 1 −18 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮 L^*、b^*及褐变指数的影响

Fig.1 Effects of different packaging methods on L^*, b^*, and browning index of shrimp during storage at -18 ℃

注：a、d: L^*值；b、e: b^*值；c、f: 褐变指数；a~c 为生干虾皮，d~f 为熟干虾皮；CP: 常规封口袋；AP: 锡箔袋；VP: 真空包装。不同大写字母表示同一包装方式不同贮藏时间差异显著（P<0.05）；不同小写字母表示同一贮藏时间不同包装方式差异显著（P<0.05）。图 2~9 同。

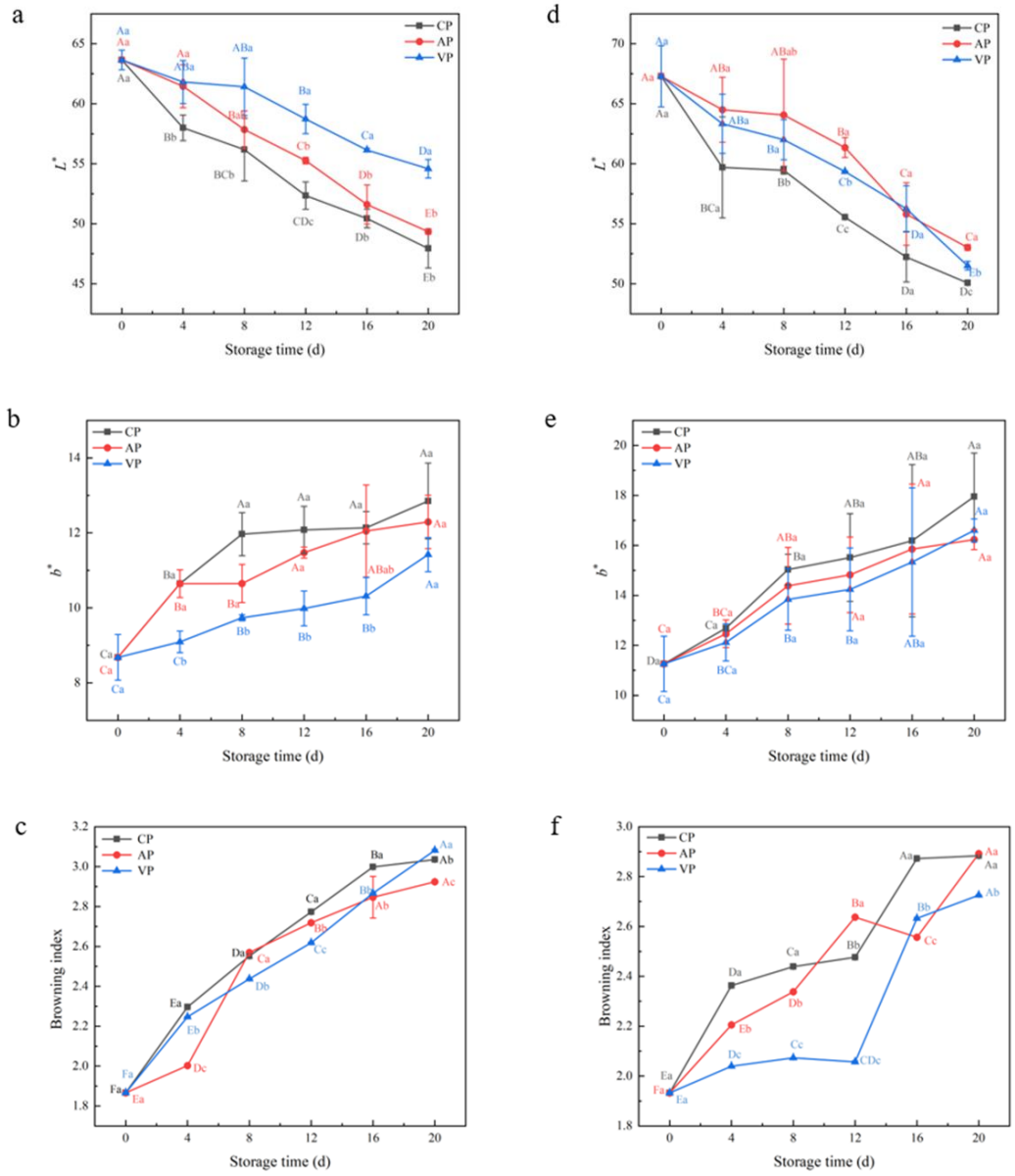


图 2 25 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮 L^*、b^*及褐变指数的影响

Fig.2 Effects of different packaging methods on L^*, b^*, and browning index of shrimp during storage at 25 ℃

注：a、d: L^*值；b、e: b^*值；c、f: 褐变指数；a~c 为生干虾皮，d~f 为熟干虾皮；CP: 常规封口袋；AP: 锡箔袋；VP: 真空包装。

L^*、b^*值及 BI 可直接反映虾皮色泽变化，L^*值降低与 b^*值、BI 升高均表示褐变加剧[15]。如图 1（-18 ℃）和图 2（25 ℃）所示，各组虾皮的 L^*值随贮藏时间延长而降低，b^*值与 BI 则相应升高，且不同温度、加工方式和包装方式之间存在差异。

-18 ℃贮藏期间，各组虾皮色泽变化相对平缓。以生干虾皮为例，贮藏 120 d 时，VP 组 L^*值由 63.65 降至 52.84，降幅 16.98%；AP 组降至 54.12，降幅 14.98%，CP 组降至 50.44，降幅 20.75%（图 1a）。生干虾皮 CP 组 BI 由 1.86 升至 2.82（增幅 51.61%）（图 1c）；熟干虾皮 CP 组 BI 由 1.93 升至 2.36（增幅 44.79%）（图 1f）。低温条件下，即使阻隔性能较差的 CP 组，120 d 内 BI 最高也仅为 2.82，未出现严重褐变，且不同包装间色泽差异较小。Ding 等[20]发现长期低温贮藏可使水产原料中多酚氧化酶、过氧化物酶等氧化还原酶活性降低 50%以上，同时低温可减缓美拉德反应速率，抑制糖–氨基化合物缩合和高级糖基化终末产物的生成。此外，刘娜等[1]指出低温还可抑制脂质氧化、蛋白质变性和微生物作用，从而延缓色泽劣变。本研究结果与此相符。

25 ℃贮藏条件下，色泽劣变明显加快，包装和加工方式的差异也更为显著。生干虾皮 CP 组贮藏 20 d 时，L^*

值由 63.65 降至 47.95，降幅 24.67%，BI 升至 3.19（增幅 71.51%），外观呈明显黄褐色。高温可从两方面促进褐变：一是提高 PPO 最大反应速率，加速酶促褐变，Zhang 等[21]指出温度由 4 ℃升至 25 ℃可使 PPO 最大反应速率提高 3~5 倍；二是促进美拉德反应中间产物生成与聚合，使非酶促褐变成为主导。此外，熟干虾皮 BI 始终高于生干虾皮，熟干虾皮经高温煮沸后细胞破裂，酚类底物与 PPO 充分接触，且蛋白质热变性后更易与还原糖发生美拉德反应，故对褐变更敏感[3]。

包装方式的护色效果为 VP>AP>CP。-18 ℃条件下，VP 组生干虾皮 L^*值下降最平缓，120 d 时仍维持在 52.84；CP 组 L^*值下降最快，120 d 降至 50.44。李学鹏等[22]研究发现鱿鱼丝贮藏过程中 L^*和 b^*值不断增加，且气调包装和真空包装显著优于空气包装，其色泽劣化程度得到有效缓解，与本研究结果趋势一致。这可能是因为隔绝氧气降低了脂肪氧化速率，减少了氧化产物生成，从而减缓了色泽劣变。结果表明，包装的护色效果与贮藏温度有关：-18 ℃下各包装组间色泽差异较小，而在 25 ℃下 VP 与 AP 的护色优势更为明显。

2.2 不同贮藏条件对虾皮脂肪氧化指标的影响

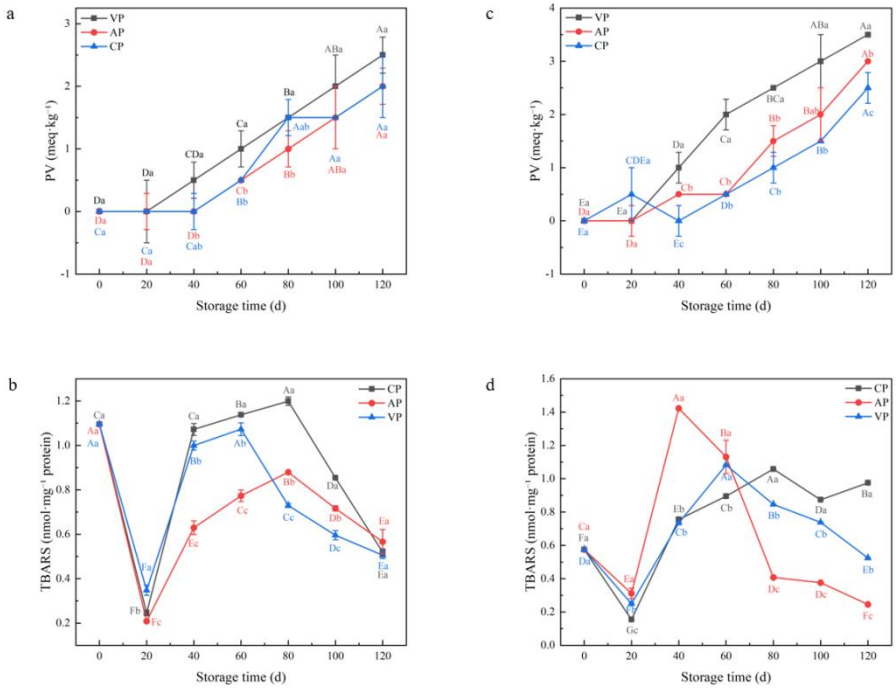
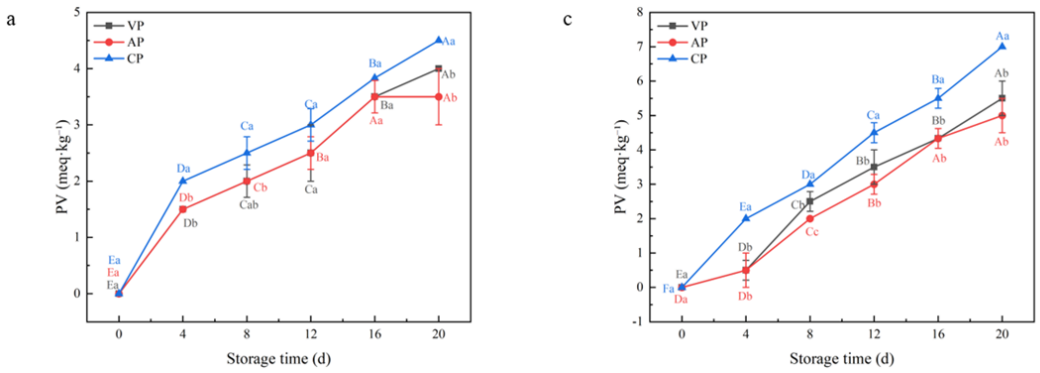


图 3 −18 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮过氧化值和 TBARS 含量的影响

Fig.3 Effects of different packaging methods on peroxide value and TBARS content of shrimp stored at -18 ℃

注：a、c：过氧化值；b、d：TBARS 含量；a~b 为生干虾皮，c~d 为熟干虾皮；CP：常规封口袋；AP：锡箔袋；VP：真空包装。



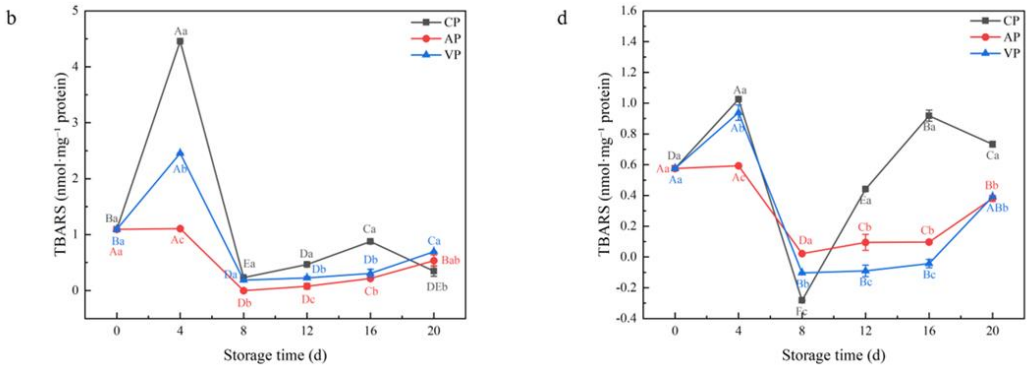


图 4 25 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮过氧化值和 TBARS 含量的影响

Fig.4 Effects of different packaging methods on peroxide value and TBARS content of shrimp stored at 25 ℃

注：a、c：过氧化值；b、d：TBARS 含量；a~b 为生干虾皮，c~d 为熟干虾皮；CP：常规封口袋；AP：锡箔袋；VP：真空包装。

脂肪氧化是虾皮品质劣变的重要原因。通过检测 PV 和 TBARS 含量可评价其氧化程度[23]。不同贮藏条件下虾皮 PV 与 TBARS 含量的变化如图 3（-18 ℃）和图 4（25 ℃）所示。

-18 ℃冻藏条件下，生干虾皮 VP 组 PV 由 0 升至 2.50 meq kg^{-1}、AP 组和 CP 组升至 2.00 meq kg^{-1}，均处于较低水平；各组 TBARS 含量呈先降后升再降的趋势，整体未出现明显积累，低温延缓了氢过氧化物的生成、分解及次级产物转化，氧化状态相对稳定[24]。25 ℃贮藏条件下，脂肪氧化明显加快。熟干虾皮 CP 组 20 d 时 PV 升至 7.00 meq kg^{-1}，初级氧化产物快速积累。TBARS 含量呈先升后降趋势：0~4 d 急剧上升，4~8 d 快速下降，8~20 d 持续回落。前期丙二醛等次级产物生成快于消耗；后期这些产物与蛋白质交联或降解为小分子，导致检测值下降。因此，TBARS 下降不代表氧化减弱，而是脂肪氧化进入后期阶段，虾皮品质已发生不可逆劣变[25]。

相同贮藏与包装条件下，熟干虾皮 PV 与 TBARS 含量均高于生干虾皮（P<0.05）。-18 ℃贮藏 120 d 时，AP 组熟干虾皮 PV 为生干虾皮的 1.4 倍；25 ℃贮藏 16 d 时，VP 熟干虾皮 PV（4.30 meq kg^{-1}）为生干虾皮（3.50 meq kg^{-1}）的 1.2 倍。熟干虾皮经高温煮沸后脂肪发生预氧化，且蛋白质热变性导致脂肪失去蛋白包裹保护，不饱和脂肪酸更易与氧气接触而被氧化，进而影响风味和色泽[11]。

包装方式对脂肪氧化的抑制效果为 VP>AP>CP。25 ℃贮藏 20 d 时，VP 和 AP 组生干虾皮 PV 分别为 4.00 meq kg^{-1} 和 3.50 meq kg^{-1}，而 CP 组高达 4.50 meq kg^{-1}。真空包装和锡箔袋均能有效降低氧气暴露水平，抑制脂质氧化链式反应；常规封口袋阻隔性差，氧气持续渗入，加速氢过氧化物的生成与积累[7][8]。-18 ℃低温贮藏与 VP 或 AP 联用，可将脂肪氧化维持在较低水平。

2.3 不同贮藏条件对虾皮腐败变质特性的影响

TVB-N 是蛋白质在内源酶与微生物胞外酶作用下分解产生的氨、胺类等挥发性碱性含氮物质的总和，TVC 直接反映微生物污染水平与代谢活性。二者是评价虾皮腐败程度的关键指标[26]。不同贮藏条件下虾皮 TVB-N 与 TVC 的变化如图 5（-18 ℃）和图 6（25 ℃）所示。

-18 ℃冻藏条件下，各组 TVB-N 与 TVC 增长平缓。贮藏 120 d 时，生干虾皮 VP 组 TVB-N 含量为 11.65 mg/100 g，TVC 为 4.15 lg (CFU/g)，均低于 GB 5009.228-2016 中 TVB-N≤30 mg/100 g 及 GB 4789.2-2022 中 TVC≤5.00 lg (CFU/g)的限值要求；CP 组同期 TVB-N 为 12.05 mg/100 g，TVC 为 4.69 lg (CFU/g)，虽高于 VP 和 AP 组，但仍低于安全阈值。低温有效延缓了蛋白质腐败与微生物增殖[26]。

25 ℃贮藏条件下，各组腐败进程明显加快。CP 熟干虾皮贮藏 16 d 时 TVB-N 含量达 131.04 mg/100 g，远超安全限值，已丧失食用价值，TVC44.67 lg (CFU/g)；VP 组同期 TVB-N 为 70.70 mg/100 g，TVC 为 4.21 lg (CFU/g)，AP 组介于 CP 与 VP 之间。高温促进微生物繁殖，高氧条件进一步加速腐败；真空包装营造低氧环境，抑制了需氧微生物生长及蛋白质分解，从而延缓腐败[12]。

相同贮藏条件下，熟干虾皮 TVB-N 与 TVC 始终高于生干虾皮，表明其对腐败更为敏感。熟干虾皮经高温煮沸后，天然抗菌成分（如溶菌酶、抗菌肽等）热失活，自身抑菌能力下降；同时热处理破坏了虾皮表面结构，使

微生物更易侵入并繁殖[11]。

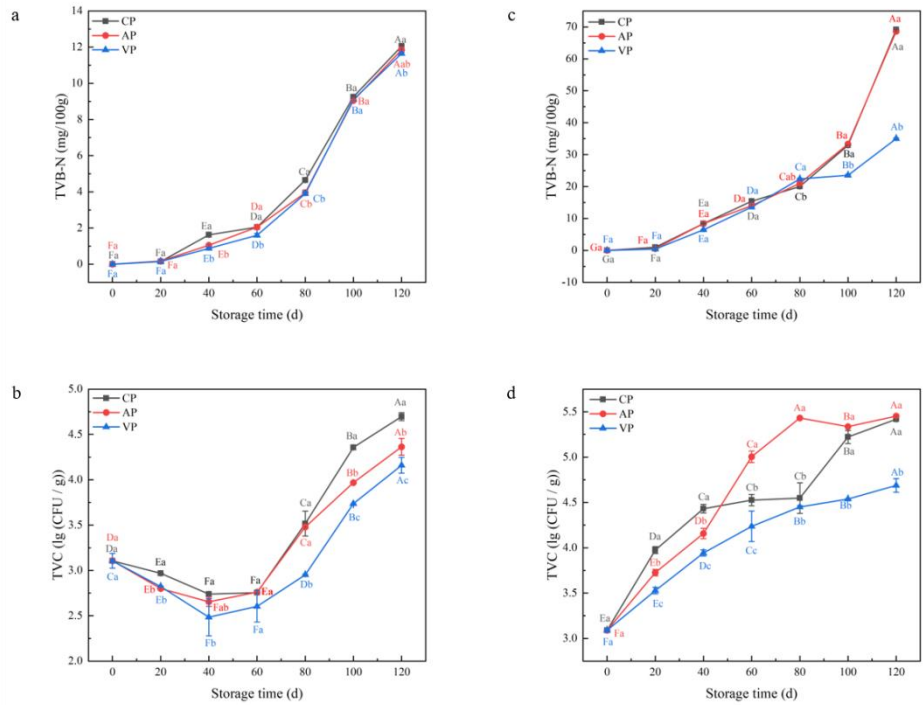


图 5 −18 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮 TVB-N 和 TVC 的影响

Fig.5 Effects of different packaging methods on TVB-N and TVC of shrimp stored at -18 ℃

注：a、c：TVB-N；b、d：TVC；a~b 为生干虾皮，c~d 为熟干虾皮；CP：常规封口袋；AP：锡箔袋；VP：真空包装。

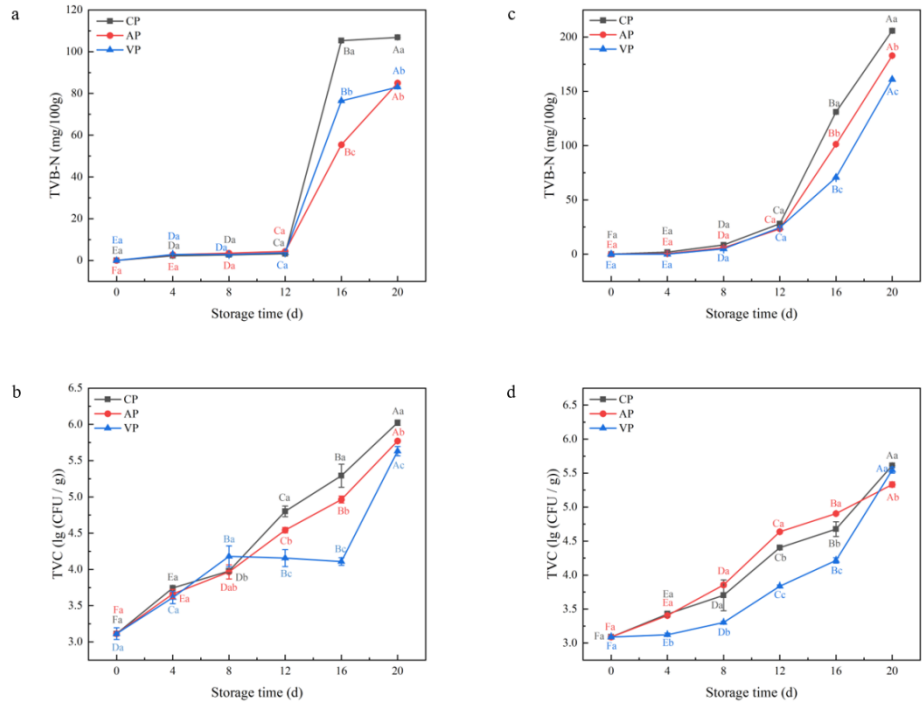


图 6 25 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮 TVB-N 和 TVC 的影响

Fig.6 Effects of different packaging methods on TVB-N and TVC of shrimp stored at 25 ℃

注：a、c：TVB-N；b、d：TVC；a~b 为生干虾皮，c~d 为熟干虾皮；CP：常规封口袋；AP：锡箔袋；VP：真空包装。

2.4 不同贮藏条件对虾皮美拉德反应程度的影响

荧光强度可间接反映美拉德反应程度，其值越高表明非酶促褐变越严重[27]。由图 7（-18 ℃）和图 8（25 ℃）所示，虾皮荧光强度随贮藏时间延长而升高，且与温度、包装方式及加工类型有关。

贮藏前期（25 ℃下 0~8 d、-18 ℃下 0~60 d），生干虾皮荧光强度显著高于熟干虾皮。以 CP 组为例，25 ℃贮藏 4 d 时，生干虾皮荧光强度为 1 818，熟干虾皮为 1 545。这是因为生干虾皮未经高温处理，还原糖与游离氨基酸保留较多；而熟干虾皮在煮沸加工中部分底物已提前参与反应，前期褐变速率较低[16]。贮藏中后期（25 ℃下 8 d 后、-18 ℃下 100 d 后），熟干虾皮荧光强度超过生干虾皮，25 ℃贮藏 20 d 时，CP 组熟干虾皮荧光强度约为生干虾皮的 1.03 倍。熟干虾皮腐败程度较高，蛋白质在微生物与内源酶作用下不断降解，释放游离氨基酸，为美拉德反应提供了更多底物，从而加快褐变[11][16]。

25 ℃贮藏加快了美拉德反应。CP 组生干虾皮贮藏 20 d 时，荧光强度由 799.50 升至 3 843.70，增幅 380.50%；而-18 ℃冻藏可抑制该反应，VP 组生干虾皮贮藏 120 d 后荧光强度由 799.50 至 4 854.60，增幅 507.20%，但单位时间内褐变速率较 25 ℃降低 1~2 倍。包装方式的影响同样明显，VP 与 AP 通过阻氧、阻光，减少了美拉德反应中间产物的氧化与光催化降解，荧光强度上升速率低于 CP 组；CP 组透氧透光性高，无法抑制外界促褐变因素，反应持续加剧[21]。

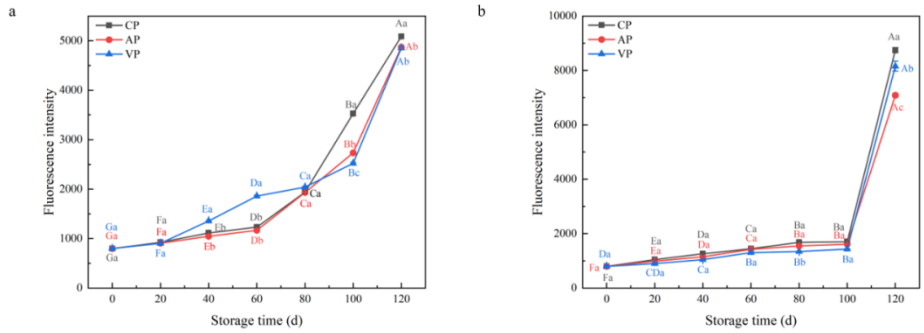


图 7 −18 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮荧光强度的影响

Fig.7 Effects of different packaging methods on fluorescence intensity of shrimp stored at -18 ℃

注：a：生干虾皮，b：熟干虾皮；CP：常规封口袋；AP：锡箔袋；VP：真空包装。

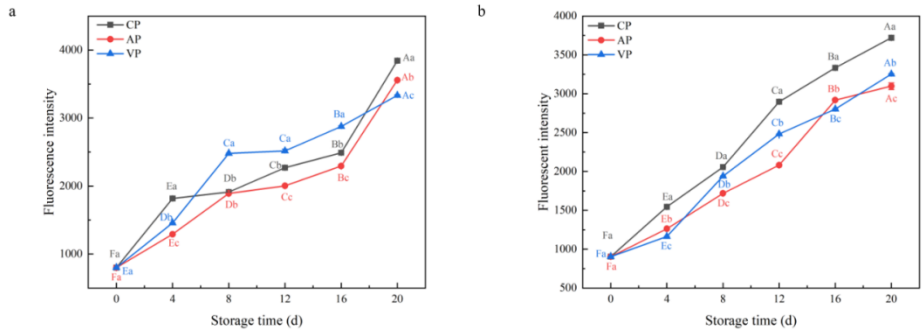


图 8 25 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮荧光强度的影响

Fig.8 Effects of different packaging methods on fluorescence intensity of shrimp stored at 25 ℃

注：a：生干虾皮，b：熟干虾皮；CP：常规封口袋；AP：锡箔袋；VP：真空包装。

2.5 不同贮藏条件对生干虾皮 PPO 活性的影响

PPO 可催化虾皮酶促褐变，其活性与褐变速率密切相关[12]。熟干虾皮经高温煮沸后 PPO 已失活，故本研究仅测定生干虾皮的 PPO 活性。

如图 9 所示，-18 ℃冻藏条件下，各组 PPO 活性在贮藏前 20 d 下降明显。VP 组由 136.10 U $g^{-1}min^{-1}$ 降至 42.30 U $g^{-1}min^{-1}$，随后缓慢回升，整个贮藏期间稳定在 95 U $g^{-1}min^{-1}$ 以下。低温降低酶分子热运动并改变其空间构象，从而抑制 PPO 催化能力，延缓酶促褐变，该结果与 Lyu 等[14]研究的多酚氧化酶与冷藏温度有关结论相符。

25 ℃贮藏条件下，PPO 活性变化幅度较大。CP 组 0~16 d 持续上升，由 136.10 U $g^{-1}min^{-1}$ 升至约 179.31 U $g^{-1}min^{-1}$，后期因酶蛋白氧化变性等因素有所下降，但全程活性仍显著高于-18 ℃组。这是因为高温提高了 PPO 催化效率，酶促褐变随之加快[28]。

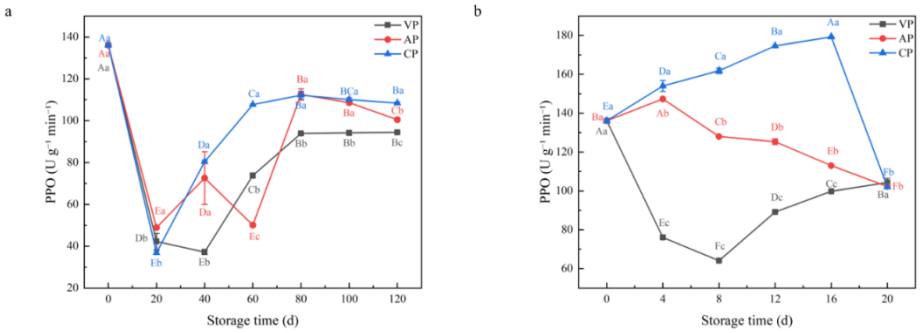


图 9 不同贮藏温度下不同包装方式对生干虾皮 PPO 活性的影响

Fig.9 Effects of different packaging methods on PPO activity of raw-dried shrimp under different storage temperatures

注：a：-18 ℃贮藏；b：25 ℃贮藏；CP：常规封口袋；AP：锡箔袋；VP：真空包装。

2.6 不同贮藏条件对虾皮感官品质的影响

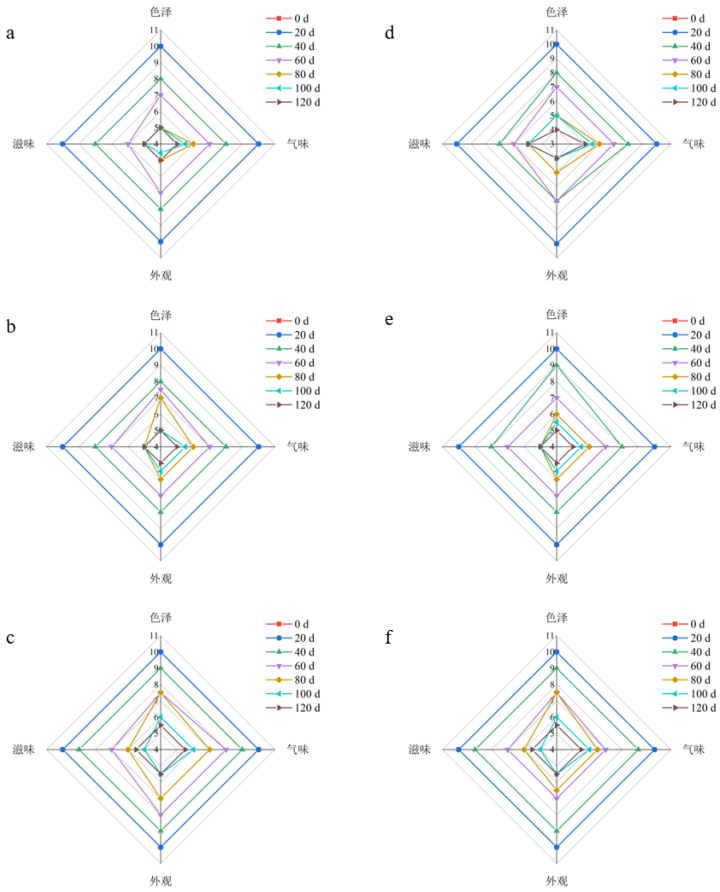


图 10 −18 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮感官品质的影响

Fig.10 Effects of different packaging methods on the sensory quality of shrimp during storage at -18 ℃

注：a、d：常规封口袋；b、e：锡箔袋；c、f：真空包装；a~c 为生干虾皮，d~f 为熟干虾皮。

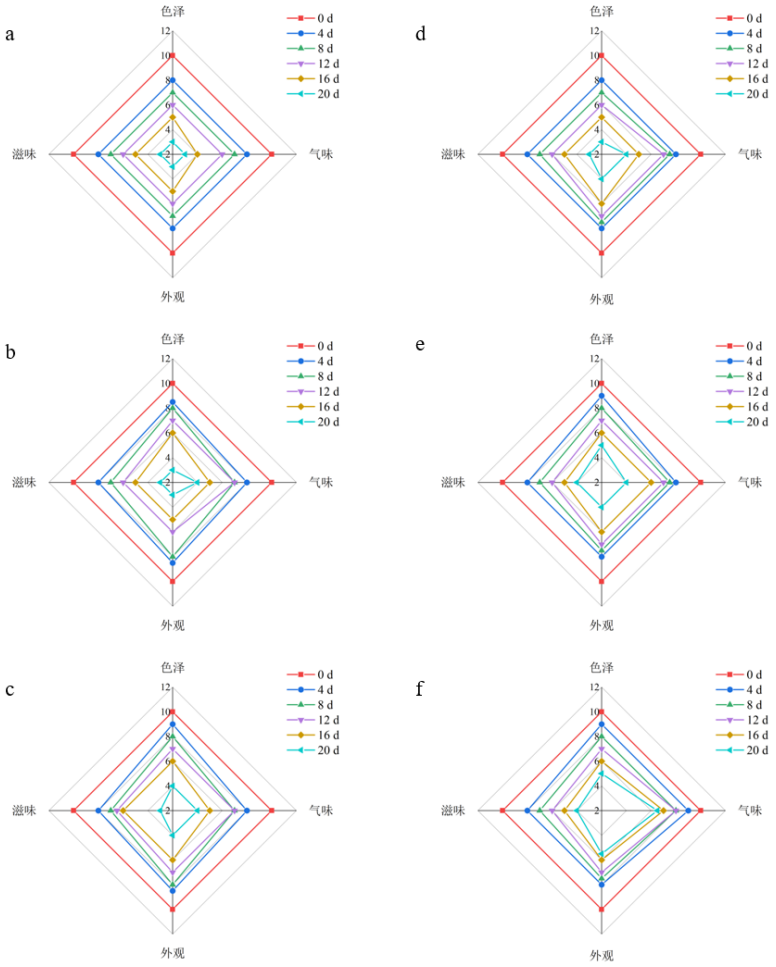


图 11 25 ℃贮藏条件下不同包装方式对虾皮感官品质的影响

Fig.11 Effects of different packaging methods on the sensory quality of shrimp stored at 25 ℃

注：a、d：常规封口袋；b、e：锡箔袋；c、f：真空包装；a~c 为生干虾皮，d~f 为熟干虾皮。

感官评分可直接反映虾皮在贮藏期间的色泽、气味、滋味及外观变化[29]。由图 10（-18 ℃）和图 11（25 ℃）可知，各组虾皮的 4 项感官评分均随贮藏时间延长而降低（P<0.05）。贮藏前期，微生物增殖与酶促反应较弱，生干虾皮与熟干虾皮仅出现轻微褐变和鲜味减弱；贮藏后期，酚类物质酶促氧化生成黑色素，脂肪氧化与蛋白质降解产生挥发性异味物质，同时微生物大量繁殖，导致虾皮褐变加重、异味明显、质地粗硬[29]。

贮藏温度对虾皮感官品质影响显著，25 ℃下劣变快于-18 ℃（P<0.05）。25 ℃贮藏时，CP 熟干虾皮贮藏 20 d 后感官评分由初始 10.00 分降至 4.00 分以下，生干虾皮同期亦降至极差，伴有明显褐变与腐败异味；-18 ℃条件下，相同包装熟干虾皮贮藏 120 d 后滋味与气味评分仍在 5.00 分左右，生干虾皮总体评分也保持在相同水平，均具有食用可接受性。这归因于低温通过降低微生物细胞膜流动性、抑制 PPO 等内源酶活性、减缓脂肪氧化与美拉德反应等，从而延缓品质劣变[30]。

同一温度下，熟干虾皮劣变速率较生干虾皮更快，且各时间点评分均低于生干虾皮（P<0.05）。25 ℃贮藏 12 d 时，VP 生干虾皮滋味评分为 6.50 分，熟干虾皮仅 6.00 分。熟干虾皮经高温煮沸后，脂质已发生初始氧化，且肌肉蛋白质热变性导致组织结构松散、细胞完整性破坏，脂肪失去蛋白包裹保护，同时微生物更易侵入[3]，故劣变更快。

不同包装方式下，虾皮感官劣变速率为 CP>AP>VP。-18 ℃贮藏 120 d，VP 生干虾皮感官评分仍维持较高水平，而 CP 组评分显著偏低；25 ℃贮藏 16 d，AP 与 VP 生干虾皮色泽稍暗但未发生严重褐变，无明显异味产生，略有鲜味，外观较为完整，而 CP 组已失去光泽，出现明显腐败异味。分析其原因，真空包装通过抽除氧气抑制需氧微生物生长与酶促氧化反应，锡箔袋依托铝箔层致密结构实现阻光、阻氧的协同防护，而常规封口袋阻隔性

能差，无法有效阻隔氧气与微生物侵入[9]。

3 结论

本研究比较了常规封口袋、锡箔袋和真空包装对生干虾皮与熟干虾皮在-18 ℃和 25 ℃贮藏期间品质的影响。结果表明，贮藏温度、加工方式和包装方式均显著影响虾皮品质。25 ℃贮藏时，各指标劣变明显快于-18 ℃；熟干虾皮经高温煮沸后脂肪发生预氧化，蛋白质热变性导致组织结构松散，其色泽、脂肪氧化程度、腐败指标及感官评分均差于生干虾皮。包装方式中，真空包装和锡箔袋的护色、抗氧化及抑菌效果优于常规封口袋。真空包装通过抽除氧气抑制需氧微生物生长和氧化反应，锡箔袋依托铝箔层致密结构实现阻光、阻氧。低温是控制虾皮色泽劣变的主导因素，-18 ℃下各包装间色泽差异较小。美拉德反应前期生干虾皮荧光强度高于熟干，后期因熟干虾皮蛋白质降解释放游离氨基酸而反超。低温抑制 PPO 活性，高温则使其活性升高。因此，生干虾皮贮藏稳定性优于熟干虾皮，-18 ℃结合真空包装或锡箔袋是延缓虾皮品质劣变的有效方式，可为虾皮贮藏包装选择提供参考。

参考文献

[1] 刘娜,翁佩芳,朱亚珠,等.贮藏温度对中国毛虾(*Acetes chinensis*)品质变化影响的研究[J].海洋与湖沼,2015,46(4):838-844.

[2] 曹文红,章超桦,谌素华,等.中国毛虾营养成分分析与评价[J].福建水产,2001,23(1):8-14.

[3] 邱绪建,陈申如,郝更新,等.淡干虾皮在 4 ℃及 25 ℃贮藏条件下的品质变化[J].集美大学学报(自然科学版),2018,23(4):265-271.

[4] 张建友,陈立帆,周广成,等.气调包装对中国毛虾贮藏稳定性的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(17):212-219.

[5] 何耀辉,卢敏仪,刘康,等.气调包装技术用于草虾保鲜的研究[J].食品与发酵工业,2001,27(2):26-29.

[6] LI D Y, YUAN Z, LIU Z Q, et al. Effect of oxidation and maillard reaction on color deterioration of ready-to-eat shrimps during storage [J]. Food Science and Technology, 2020, 131: 109696.

[7] QIU X J, WU Y M, CHEN S J, et al. Oxidative Stability and Browning Development of Semi-dried Shrimp (*Acetes chinensis*) with Different Salt Contents and Packaging Methods Stored at Refrigerated Temperature [J]. Food Science and Technology Research, 2020, 26(2): 239-245.

[8] 林婷,杨胜平,谢晶,等.虾黑变形成机制及其抑制方法研究进展[J].江苏农业学报,2020,36(6):1605-1611.

[9] 赵燕芬,孙培梓,满昊,等.南极磷虾和凡纳滨对虾复合虾丸软罐头贮藏品质变化及货架期预测[J].水产科学,2025,44(1):26-35.

[10] 郭莹莹,王联珠,朱文嘉,等.虾皮产品质量评价关键指标研究[J].食品安全质量检测学报,2016,7(12):4834-4840.

[11] SHAFIEI N, MOOSAVI-NASAB M, KHALESI, 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.

[12] JACOBSEN C. Some strategies for the stabilization of long chain n-3 pufa-enriched foods: a review [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2015, 117, 1853-1866.

[13] ZHANG B X, FU J L, WANG C, YIN M X, et al. Inhibitory effect of oxyresveratrol on the browning and PPO of fresh-cut potato [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 219: 113224.

[14] LYU M, HUANG G H, YANG H Z, et al. Purification and characterization of polyphenoloxidase (PPO) from *Solenocera crassicornis* in the east sea of China [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(11): 138-144.

[15] 阮珊艳,杨丽凤,周志,等.冻藏期间鳙鱼肉色泽及食用品质的变化规律[J].现代食品科技,2025,41(1):145-152.

[16] 段静瑶,王禹,王志龙,等.美拉德反应在水产制品中的应用[J].中国调味品,2024,49(2):199-202.

[17] AJANDOUZ, EL Hassan, et al. Effects of on caramelization and Maillard reaction kinetics in Fructose-lysine model systems [J]. Journal of Food Science, 2001, 66: 926-931.

[18] KHAZAEI N, ESMAIILI Z, EMAM-DJOMEH. Effect of active edible coatings made by basil seed gum and thymol on oil uptake and oxidation in shrimp during deep-fat frying [J]. Carbohydr Polym, 2016, 137: 249-254.

[19] 毕日秀,芦晶,张书文,等.市售褐色酸奶在不同贮藏条件下美拉德反应副产物变化规律[J].食品与发酵工业,2021,47(1):116-124.

[20] Ding X Y, LI Z T, DUAN P F, et al. Effects of long-term cryopreservation on ultrastructure and enzyme activity of Epinephelus lanceolatus sperm [J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(7): 50-66.

[21] ZHANG F G, JIANG S, JIA S, et al. Broccoli stem extract enhances browning inhibition in fresh-cut peach fruit by inhibiting polyphenol

oxidase activity and improving antioxidant capacity [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 222: 113399.

[22] 李学鹏,邹朝阳,仪淑敏,等.气调包装对秘鲁鱿鱼丝储藏过程中甲醛及相关品质指标的影响[J].食品科学技术学报,2017,35(2):36-44.

[23] BUNGER A, MOYANO P, RIOSECO V. Nacl soaking treatment for improving the quality of french-fried potatoes [J]. Food Research International, 2003, 9(2): 161-166.

[24] YANG F, JING D, YU D, et al. Differential roles of ice crystal, endogenous proteolytic activities and oxidation in softening of obscure pufferfish (Takifugu Obscurus) fillets during frozen storage [J]. Food Chemistry, 2019, 278: 452-459.

[25] LAN W Q, SUN Y Q, LIU S C, et al. Effects of ultrasound-assisted chitosan grafted caffeic acid coating on the quality and microbial composition of pompano during ice storage [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106032.

[26] ANACLETO P, TEIXEIRA B, MARQUES P, et al. Shelf-life of cooked edible crab (Cancer pagurus) stored under refrigerated conditions [J]. Food Science and Technology, 2011, 44(6): 1376-1382.

[27] TREVISAN A J B, DE ALMEIDA LIMA D, SAMPAIO G R, et al. Influence of home cooking conditions on Maillard reaction products in beef [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 161-169.

[28] LIU X, YANG Q, LU Y Z, et al. Effect of purslane (Portulaca oleracea L.) extract on anti-browning of fresh-cut potato slices during storage [J]. Food Chemistry, 2019, 283: 445-453.

[29] LUNA-ACOSTA A, BREITWIESER M, RENAULT T, et al. Recent findings on phenoloxidases in bivalves [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 122(1): 5-16.

[30] 周向辉.不同气调包装对米糠贮藏期间油脂氧化的影响[J].包装与食品机械,2023,41(4):13-19.