

基于挥发性盐基氮的油坛肉货架期预测

何 丽¹ 但 利¹ 刁尚鹏² 邢亚阁¹ 杨路林¹ 刘艾明¹

(1. 西华大学食品与生物工程学院, 四川 成都 611743; 2. 德昌茂源长童耳朵食品有限公司, 四川 凉山 615500)

摘要: [目的] 建立基于挥发性盐基氮(TVB-N)的油坛肉货架期预测模型。[方法] 测定 4, 25, 37 °C 贮藏条件下油坛肉的水分活度、pH 值、TVB-N 值、硫代巴比妥酸(TBARS 值)、过氧化值(POV 值)及感官品质变化, 结合一级动力学模型与 Arrhenius 方程进行综合分析。[结果] 贮藏温度显著影响油坛肉品质劣变速率, TVB-N 值与贮藏时间呈强相关性($R^2=0.992$), 选定其为关键指标构建货架期预测模型。结合 Arrhenius 方程($R^2=0.956$, $E_a=19\ 809.28\ \text{kJ/mol}$), 预测油坛肉在 4, 25, 37 °C 下的货架期分别为 327, 178, 130 d, 预测值与实测值相对误差分别为 $\pm 2.9\%$, $\pm 8.1\%$, $\pm 1.8\%$ 。[结论] 基于 TVB-N 的模型可精准预测不同温度下油坛肉货架期, 且填补了传统腌腊肉制品货架期定量预测的空白。

关键词: 油坛肉; TVB-N; 一级动力学模型; Arrhenius 方程; 贮藏温度

Shelf-life prediction of oil-preserved meat based on volatile basic nitrogen

HE Li¹ DAN Li¹ DIAO Shangpeng² XING Yage¹ YANG Lulin¹ LIU Aiming¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Xihua University, Chengdu, Sichuan 611743, China;

2. Dechang Maoyuanchang Tong'erduduo Food Co., Ltd., Liangshan, Sichuan 615500, China)

Abstract: [Objective] To establish a shelf-life prediction model for oil-preserved meat based on total volatile basic nitrogen (TVB-N). [Methods] Under the storage conditions of 4, 25, and 37 °C, changes in the following parameters of oil-preserved meat are determined: water activity, pH value, TVB-N value, thiobarbituric acid (TBARS value), peroxide value (POV value), and sensory quality. A comprehensive analysis is conducted using the first-order kinetic model and the Arrhenius equation. [Results] Storage temperature significantly affects the quality deterioration rate of oil-preserved meat. The TVB-N value is closely correlated with storage time ($R^2=0.992$) and is therefore selected as the key indicator to construct the shelf-life prediction model. Combined with the Arrhenius equation ($R^2=0.956$, $E_a=19\ 809.28\ \text{kJ/mol}$), the predicted shelf-lives of oil-preserved meat at 4, 25, and 37 °C are 327, 178, and 130 days, respectively. The relative errors between the predicted values and the measured values are $\pm 2.9\%$, $\pm 8.1\%$, and $\pm 1.8\%$, respectively. [Conclusion] The TVB-N-based model can accurately predict the shelf-lives of oil-preserved meat at different temperatures, filling the gap in the quantitative shelf-life prediction of traditional cured meat products.

Keywords: oil-preserved meat; TVB-N; first-order kinetic model; Arrhenius equation; storage temperature

油坛肉以其独特风味深受四川凉山民众喜爱^[1]。然而,传统家庭式制作工艺受限于简陋的贮藏条件和包装技术,油坛肉在保存过程中品质难以保证,不能满足市场需求和消费者期望^[2-3]。这些家庭作坊多采用简易包装,缺乏有效密封与保鲜措施,无法阻隔氧气接触,产品易受微生物侵袭,加速氧化和变质^[4]。

工业化生产可确保原料精选、标准化流程管理以及科学包装和贮藏。特别是巴氏杀菌结合真空包装技术,能有效隔绝氧气和微生物,延长保鲜期,同时保留独特风味^[3]。然而,工业化生产环境下油坛肉的货架期仍受温度、湿度等多因素协同影响,其中温度波动对脂肪氧化及微生物增殖的促进作用尤为显著。为量化温度对品质衰

基金项目:四川省科技计划项目-跨区域创新合作项目(编号:2024YFHZ0207)

通信作者:邢亚阁(1980—),男,西华大学教授,博士。E-mail: xingyagel@aliyun.com

收稿日期:2025-03-19 改回日期:2025-08-09

引用格式:何丽,但利,刁尚鹏,等. 基于挥发性盐基氮的油坛肉货架期预测[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 108-116.

Citation: HE Li, DAN Li, DIAO Shangpeng, et al. Shelf-life prediction of oil-preserved meat based on volatile basic nitrogen[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 108-116.

变的影响规律,亟需通过加速破坏性试验建立动力学模型,进而构建基于实际贮藏温度的货架期预测体系。目前,动力学模型主要基于化学动力学和微生物生长动力学的原理构建。化学动力学模型侧重于利用理化指标和菌落总数来建立预测模型,而微生物生长动力学模型侧重于利用菌落总数及其特定腐败菌来构建。张德福等^[5]以4种不同处理方式的三文鱼为研究对象,用Pearson相关系数分析和Arrhenius方程,成功构建了烟熏三文鱼贮藏温度与品质变化(以菌落总数、挥发性盐基氮和组胺含量为指标)之间的动力学方程。李彦等^[6]基于一级Gompertz修正模型和二级Belehradek模型,建立了红烧卤牛肉的货架期预测模型,并进一步预测不同贮藏温度下的货架期数值。李廷妮等^[7]采用Gompertz方程建立了贮藏时间和腐败菌群变化关系的一级和二级模型,最后对比预测值和实际值之间的差距以验证模型的可靠性。目前,有关其他肉制品在不同贮藏温度下的品质变化及货架期预测已有较多报道^[8-10],但对于油坛肉这一特色腌腊肉制品,尤其是真空包装成品在不同温度条件下的货架期预测模型研究,仍是一个亟待填补的空白。

研究拟通过分析油坛肉成品在不同温度下的品质变化和理化特性,揭示各指标的变化规律和敏感程度,进而确定敏感指标并建立货架期预测模型。利用一级动力学方程与Arrhenius方程,共同构建油坛肉在贮藏过程中的动力学模型^[11-13],并对其在各贮藏条件下的货架期进行预测,旨在为油坛肉及其他肉制品的货架期预测模型的构建提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

真空包装油坛肉:德昌县茂源长(童耳朵)食品有限责任公司;

水分活度计:LabMaster-aw型,瑞士Novasia公司;

显数式pH计:PHS-320型,成都世纪方舟科技有限公司;

自动凯氏定氮仪:K9840型,济南海能仪器股份有限公司;

低速台式离心机:TD-5M型,四川蜀科仪器有限公司;

全波长酶标仪:K6600A型,北京凯奥科技有限公司;

电热恒温水浴锅:DK-98-11型,天津市泰斯特仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 原料处理及试验条件 将真空密封包装的油坛肉分别于4, 25, 37℃进行贮藏,其中,37℃为破坏试验、25℃为常温试验,4℃为对照试验,定期20 d取样检测,并对水分分布、pH值、挥发性盐基氮(TVB-N)、硫代巴比妥酸

(TBARS)、过氧化值(POV)和感官评价进行检测,直至100 d取样完毕。为减少取样部位带来的差异,各指标测定取用肥肉部位的油坛肉样品进行检测。

1.2.2 水分活度测定 使用水分活度计标准溶液0.50~0.97校准。称取1.00 g切碎成约1 mm粒径的油坛肉颗粒,迅速放入样品盒中,于平衡仓中静置30 min,转移至测试仓,封闭仓门进行检测,同一样品重复测量3次。

1.2.3 pH值测定 参照GB 5009.237—2016。

1.2.4 TVB-N值测定 参照GB 5009.228—2016。

1.2.5 TBARS值测定 参照张雪梅^[14]的方法并略加修改。取10 g绞碎搅匀的样品放入250 mL锥形瓶中,加入50 mL三氯乙酸(含0.1%乙二胺四乙酸)的7.5%水溶液,加入3 mL TBARS溶液,沸水浴20 min,冷却至室温。取3 mL上清液与等量的氯仿混合,4 000 r/min离心5 min。测定532, 600 nm处吸光值,按式(1)计算TBARS值。

$$A = (A_{532 \text{ nm}} - A_{600 \text{ nm}}) \times 4.68 \times \frac{1}{m \times 0.1}, \quad (1)$$

式中:

A ——TBARS值,mg/kg;

m ——油坛肉质量,g;

$A_{532 \text{ nm}}$ ——532 nm处吸光度;

$A_{600 \text{ nm}}$ ——600 nm处吸光度。

1.2.6 POV值测定 参照GB 5009.227—2016。

1.2.7 感官评价测定 感官评价小组由20名经阈值测试和一致性考核的专家型评价员构成(男12女8),均通过为期2周的油坛肉专项培训(包括工艺认知、缺陷风味识别及评分表校准)。评价过程中采用双盲法,每批次样品重复评价3次,按表1对油坛肉风味、口感、组织状态和外观感官指标进行评定。

1.2.8 油坛肉贮藏货架期预测模型的建立 食物贮藏过程中,大部分与食物品质紧密相关的变化均按照零级或一级动力学方程的模式发展^[15-18]。基于此,将恒定温度下测得的TVB-N值,通过特定的动力学方程进行拟合处理,具体数学表达式如式(2)和式(3)所示。

零级动力学方程:

$$A = A_0 - kt, \quad (2)$$

一级动力学方程:

$$A = A_0 \exp(kt), \quad (3)$$

式中:

A_0 、 A ——TVB-N的初始值和 t 时刻值,mg/kg;

k ——反应速率常数,mg/(kg·d);

t ——贮藏时间,d。

Arrhenius方程定量描述了化学反应速率常数 k 与热力学温度 T 之间的关联。

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (4)$$

表 1 油坛肉感官评分表

Table 1 Sensory scoring table for oil-preserved meat

风味(30分)	口感(40分)	组织状态(20分)	外观(10分)
香气浓郁、无异味(30~26)	软糯可口、不粘牙(40~31)	组织紧实、有弹性(20~16)	外观清晰、完整(10~8)
香气较浓、无异味(25~21)	略软、不粘牙(30~21)	组织较紧实、有弹性(15~11)	外观有少许汁液、完整(7~5)
香气较淡、有异味(20~15)	略软、粘牙(20~11)	组织变软、无弹性(10~5)	外观有汁液渗出、表皮少许腐烂、肉质少许变色(4~2)
无香味、严重的酸腐味(<15)	过软、粘牙(<10)	组织变烂、有霉斑(<5)	外观大量汁液渗出、表皮腐烂、肉质变色(<2)

式中:

k_0 ——前因子;

E_a ——反应活化能, kJ/mol;

T ——绝对温度, K;

R ——气体常数, 8.314 4 J/(mol·K)。

获取 3 个不同温度下的速率常数后, 对 Arrhenius 方程取自然对数, 可得:

$$\ln(k) = \ln(k_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

因此, 通过将一级动力学方程与 Arrhenius 方程相结合, 只要明确 TVB-N 的终点限值及目标贮藏温度, 即可直接计算理论货架期^[15]。将计算出的 TVB-N 值的 Arrhenius 方程中的活化能 E_a 和频率因子 k_0 代入式(5), 可得出油坛肉货架期模型方程:

$$SL = \frac{\ln(TVB) - \ln(TVB_0)}{18.634 \times e^{\frac{-2382.527}{T}}} \quad (6)$$

1.2.9 数据分析 所有试验均重复 3 次取平均值, 采用 Excel 2022 软件计算平均值和标准偏差, 用 SPSS 22.0 软件进行差异显著性分析(显著性水平为 $P < 0.05$)。此外, 基于 Pearson 相关系数进行相关性分析, 并利用 Origin 8.5 软件作图。试验结果以平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间油坛肉水分活度变化

水分活度反映了食品中水分的存在状态^[16-18]。由图 1 可知, 4℃贮藏条件下, 油坛肉水分活度从初始 0.806 升至 0.824 后逐渐降至 0.682, 这可能与其高脂肪含量和真空包装阻氧性有关^[19]。相同贮藏时间点, 不同温度对水分活度的影响存在显著差异, 贮藏初期(第 20 天), 4℃下水分活度为 0.824, 而 25、37℃下分别为 0.804、0.769, 表明低温有助于维持较高的水分活度, 而高温则加速了水分散失^[17]。贮藏后期(第 60 天), 4℃下的水分活度保持在 0.682, 25℃下降至 0.855, 而 37℃下则快速下降至 0.658。这表明高温条件下, 水分活度的下降更为显著, 与剧烈的氧化反应和微生物活动有关^[15]。与王岸娜等^[20]的研究结果相似。表明无论是在传统腊肉还是新型肉制品中, 温度对水分活度的影响具有一定的共性。然而, 油坛肉的

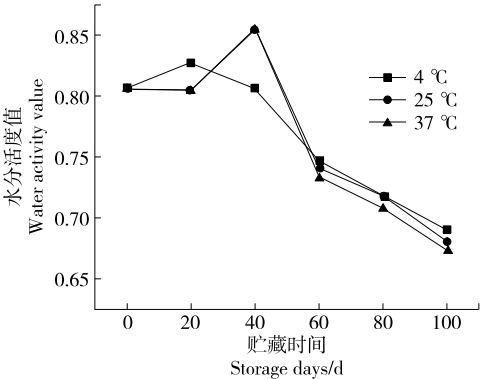


图 1 不同贮藏温度下油坛肉的水分活度值

Figure 1 Water activity values of oil-preserved meat at different storage temperatures

水分活度终值低于 3D 打印猪肉脯的^[20], 表明油坛肉中脂质氧化对水分迁移的抑制作用更强。此外, 与李廷妮等^[7]对酱卤鸭肉的气调包装研究相比, 其水分活度在 4℃下仅下降了 0.1, 而试验的水分活度降幅达 0.14, 进一步验证了真空包装结合低温对水分活度调控的高效性。25、37℃贮藏初期因微生物代谢及酶促反应消耗自由水, 水分活度分别降至 0.804 和 0.769; 中期因结合水生成出现短暂回升到达 0.855, 但 60 d 后随水分消耗和氧化反应加剧, 水分活度快速下降, 其中 37℃高温促使微生物活动与化学反应最剧烈, 终值降至 0.658。升高温度显著加速了水分活度的下降进程, 体现为 4℃<25℃<37℃的劣变梯度。

2.2 贮藏期间油坛肉 pH 值变化

新鲜肉类的 pH 值维持在 5.4~5.8^[21-22]。油炸后因高温烹饪导致肉中的蛋白质分解, 产生了氨和胺类等碱性物质, 使其 pH 值显著上升^[23-25]。

由图 2 可知, 贮藏第 20 天, 4℃下的 pH 值最低, 37℃下的最高, 表明低温抑制了微生物活动, 导致 pH 值下降, 而高温促进了微生物发酵, 导致 pH 值上升^[24]。与王素等^[26]的结论相反, 这是因为油坛肉腌制过程中少量磷酸盐残留导致初始 pH 值偏高。贮藏第 80 天, 4℃下的 pH 值升至 6.58, 25℃下降至 6.49, 37℃下降至 6.13, 这是微生物活动减弱、酸性物质减少及碱性成分累积所致, 同时氧气渗入或脂肪氧化也导致 pH 值上升^[25]。而高温条件下 pH

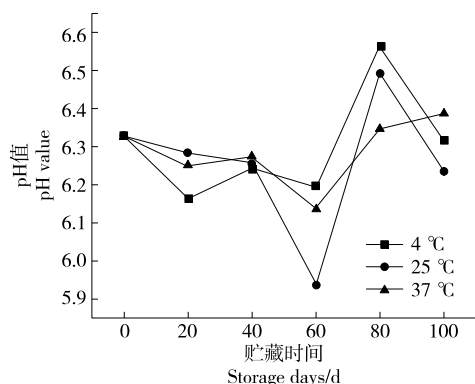


图2 不同贮藏温度下油坛肉的pH值

Figure 2 pH values of oil-preserved meat under different storage temperatures

值继续下降,可能是油坛肉中的脂肪、蛋白质等成分发生氧化等化学反应^[22]。脂肪氧化产生的某些醛类、酮类等化合物进一步与蛋白质等成分发生反应,生成酸性物质,使pH值降低^[23]。而在37 °C贮藏后期,pH值回升至6.40,与孙莹等^[27]的研究类似,均归因于高温下蛋白质分解产氨。相比之下,崔跃慧等^[28]的调理猪肉饼的pH值比较稳定,未出现显著波动,表明不同肉制品的pH值变化机制存在差异,油坛肉的脂肪-蛋白质基质可能更易受碱性代谢物影响。

2.3 贮藏期间油坛肉TVB-N值变化

TVB-N是蛋白质腐败分解产物(氨/胺类),其含量直接反映肉品新鲜度^[29]。由图3可知,贮藏期间,TVB-N随温度升高显著累积,与25、37 °C相比,4 °C下油坛肉TVB-N值变化极为显著($P < 0.01$),终值为10.35 mg/100 g,而25、37 °C下分别为14.75、16.95 mg/100 g。这主要是因为低温降低了蛋白质的分解速率,从而减少了TVB-N的生成^[29]。油坛肉TVB-N值在高温37 °C下从7.23 mg/100 g激增至16.95 mg/100 g,显著高于夏南等^[30]的,可能是油

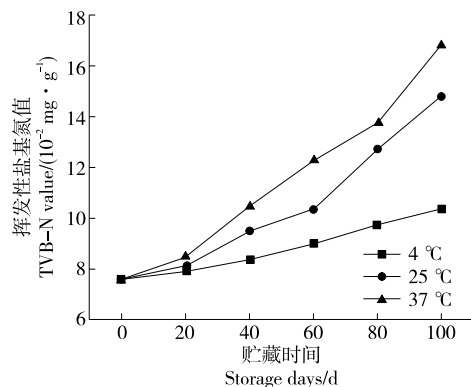


图3 不同贮藏温度下油坛肉的TVB-N值

Figure 3 TVB-N values of oil-preserved meat at different storage temperatures

坛肉的高脂肪含量延缓了微生物初期增殖,但后期高温加速了蛋白质腐败。黎财慧等^[31]的低温熟制鸽子的TVB-N增长速率显著高于试验的,可能是油坛肉通过高盐、高脂、高温加工及真空包装多重屏障,延缓了蛋白质的腐败进程。

贮藏第20天,4、25、37 °C下TVB-N值分别为7.90、8.13、8.48 mg/100 g,表明在贮藏初期,温度对TVB-N值影响尚不显著^[29]。贮藏第40天,各温度组的TVB-N值差异开始显现,4、25、37 °C下分别为8.35、9.51、10.47 mg/100 g,表明随着贮藏时间的延长,温度对TVB-N生成的促进作用逐渐增强。贮藏第80天,4、25、37 °C下的TVB-N值分别为9.75、12.73、13.75 mg/100 g。表明温度是影响油坛肉TVB-N值变化的关键因素,低温环境能够显著减缓TVB-N的生成速率,维持肉品的新鲜度;而高温则加速了这一过程,导致肉品品质快速劣化^[31]。

2.4 贮藏期间油坛肉TBARS值变化

TBARS值反映脂质氧化程度受包装阻氧性及贮藏温度共同影响。透气性差的包装会增加氧气渗透,从而加速脂肪的氧化分解。由图4可知,贮藏时间越长,3种温度下贮藏的油坛肉的TBARS不同程度上升,表明脂肪氧化的程度逐渐加深^[32]。贮藏第20天,4、25、37 °C下油坛肉TBARS值分别为0.067、0.065、0.073 mg/kg,25 °C下TBARS值略低于4 °C下的,这是由于25 °C下微生物和酶活性较低,尚未达到促进脂质氧化的高峰^[31]。同时,真空包装在25 °C下仍能有效抑制氧气渗透,减缓脂质氧化反应。从第20天开始,25 °C下的TBARS值逐渐上升,在第40天达到0.069 mg/kg,但仍低于4 °C下的。这是由于25 °C下微生物的代谢产物具有抗氧化作用,从而减缓了脂质氧化的速率^[19]。贮藏第60天,25、4 °C下的TBARS值分别为0.092、0.078 mg/kg,表明随着贮藏时间的延长,25 °C下脂质氧化反应逐渐加剧,超过了4 °C下的。这是由于25 °C下微生物和酶活性逐渐增强,促进了脂质氧化

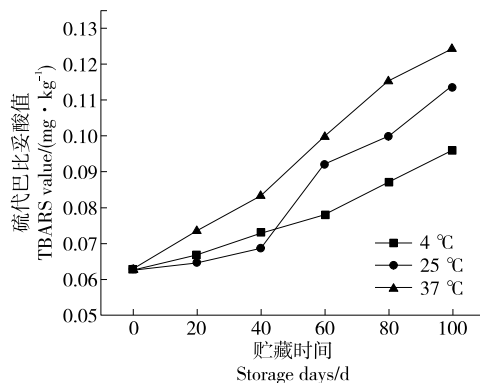


图4 不同贮藏温度下油坛肉的TBARS值

Figure 4 TBARS values of oil-preserved meat at different storage temperatures

反应^[25]。

37℃下,脂肪分子活化能降低且微生物/酶活性增强,TBARS 值从 0.060 mg/kg 显著升至 0.127 mg/kg ($P<0.05$),脂质氧化速率显著升高,但低于黄静等^[33]的增幅,表明真空包装可以有效抑制氧气渗透,但高温仍可加速脂肪氧化。25℃下脂肪氧化速率介于 4℃和 37℃之间,终值为 0.113 mg/kg;而在 4℃下虽然能抑制氧化,TBARS 值仍从 0.060 mg/kg 缓增至 0.094 mg/kg。通过调控微生物增殖与酶促反应强度,引起脂肪氧化速率差异:高温促进初期氧化启动与后期持续分解,而低温仅延缓非完全抑制氧化进程。谢进等^[34]研究发现,即食烧鹅胸肉的 TBARS 值也增长迅速,说明高温下加速了脂肪氧化。

2.5 贮藏期间油坛肉 POV 值变化

POV 值是衡量油脂氧化程度的关键指标,直接反映了油脂中过氧化物的含量^[35]。POV 值越高油脂氧化及酸败(哈败味)越显著,贮藏期间,光、热、氧气及酶促反应共同导致油脂氧化生成过氧化物,并进一步分解为醛酮类物质^[36-37]。

由图 5 可知,随着贮藏时间的延长,POV 值持续上升,

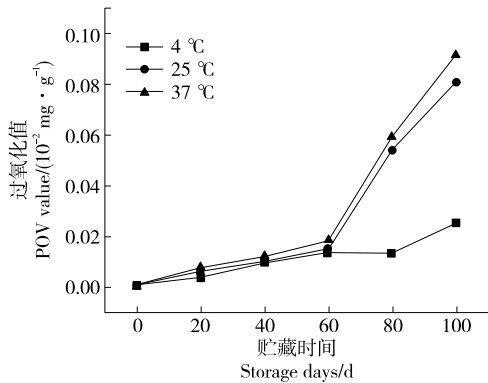


图 5 不同贮藏温度下油坛肉的 POV

Figure 5 POVs of oil-preserved meat at different storage temperatures

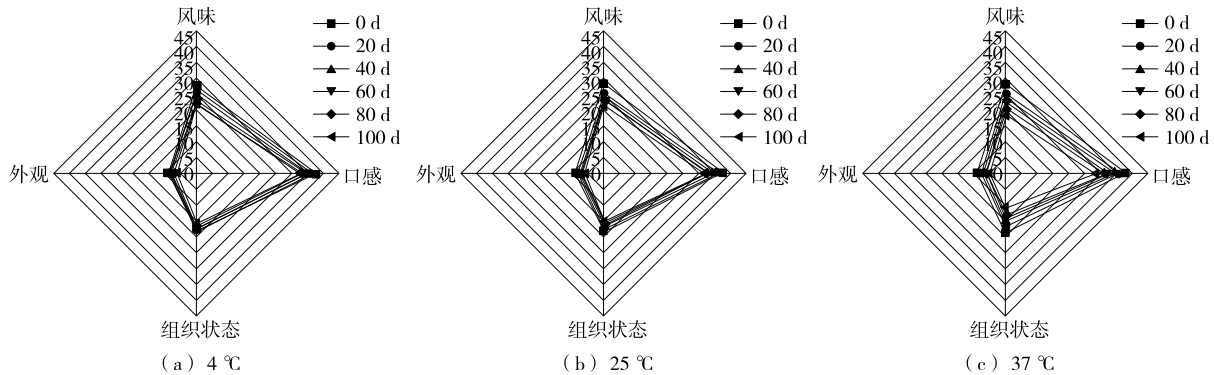


图 6 不同贮藏温度下油坛肉的感官评分

Figure 6 Sensory scores of oil-preserved meat at different storage temperatures

且温度越高升幅越大。油坛肉在 4℃下贮藏 100 d,POV 值仅从 0.001 07 mg/100 g 增加至 0.024 2 mg/100 g;而在 25、37℃下时,POV 值分别高达 0.080 90、0.093 30 mg/100 g,与 4℃下的相比,差异均具有统计学意义($P<0.05$)。37℃下,通过加速油脂分子运动、促进氧接触及增强微生物/酶活性,使氧化与水解反应加剧。因此,在此温度下贮藏的油坛肉,其 POV 值由 0.018 30 mg/100 g 激增至 0.093 30 mg/100 g。而在 4℃下其低温显著抑制了氧化进程,同期 POV 值仅从 0.014 60 mg/100 g 缓增至 0.024 20 mg/100 g,表明温度对油脂稳定性具有决定性影响。这与胡力等^[38]的 POV 变化相比,试验中 POV 终值更高,可能与油坛肉中不饱和脂肪酸比例较高有关。贮藏第 20 天,4、25、37℃下 POV 值分别为 0.003 85、0.006 54、0.007 64 mg/100 g。贮藏初期,温度对 POV 值影响不显著,但随着贮藏时间的延长,不同温度下的 POV 值差异逐渐显现^[38]。贮藏第 80 天,4、25、37℃下的 POV 值分别为 0.013 30、0.054 13、0.059 17 mg/100 g,说明随着贮藏时间的延长,温度对 POV 值上升的促进作用逐渐增强^[35]。

2.6 感官评分

由图 6 可知,油坛肉的感官评分均呈下降趋势,且温度越高,下降速率越快。贮藏第 20 天,4、25、37℃下的感官评分分别为 87.6、87.5、85.1,差异不显著,表明在贮藏初期,不同温度对感官品质的影响较小^[39]。贮藏第 60 天,4、25、37℃下的感官评分分别进一步降至 82.1、81.1、75.3,差异显著($P<0.05$),表明相同的贮藏时间下,温度越高,感官品质的劣化程度越严重^[40]。特别是 37℃下,油坛肉的风味、口感、组织状态和外观均出现了显著劣化,而 4、25℃下的劣化程度相对较轻。表明低温贮藏能有效延缓油坛肉品质下降,保持产品的贮藏性。

2.7 相关性分析

根据各指标的具体数据,对指标间的相关性进行分析,结果见表 2~表 4。由表 2 可知,4℃下,水分活度与 pH 值呈显著负相关($P<0.05$),与 TBARS 和 TVB-N 值呈极

表2 4℃下油坛肉各指标的 Pearson 相关系数[†]

Table 2 Pearson correlation coefficients of various parameters of oil-preserved meat at 4℃

指标	水分活度	pH 值	POV 值	TBARS 值	TVB-N 值
水分活度	1.000	—	—	—	—
pH 值	-0.515*	1.000	—	—	—
POV 值	-0.449	0.511*	1.000	—	—
TBARS 值	-0.925**	0.426	0.460	1.000	—
TVB-N 值	-0.951**	0.456	0.483*	0.957**	1.000
感官评分	0.957**	-0.540*	-0.494*	-0.959**	-0.983**

† *在0.05级别(双尾)相关性显著;**在0.01级别(双尾)相关性显著。

显著负相关($P<0.01$),与感官评分呈极显著正相关($P<0.01$)。

由表3可知,随着贮藏时间的延长,肉制品的 POV、TBARS 值和感官评分均显著降低;POV 值与 TBARS 和 TVB-N 值呈极显著正相关($P<0.01$),感官评分与 POV、TBARS 和 TVB-N 值呈极显著负相关($P<0.01$)。

表3 25℃下油坛肉各指标的 Pearson 相关系数[†]

Table 3 Pearson correlation coefficients of various parameters of oil-preserved meat at 25℃

指标	水分活度	pH 值	POV 值	TBARS 值	TVB-N 值
水分活度	1.000	—	—	—	—
pH 值	0.026	1.000	—	—	—
POV 值	-0.804**	0.224	1.000	—	—
TBARS 值	-0.843**	-0.079	0.911**	1.000	—
TVB-N 值	-0.770**	0.081	0.969**	0.947**	1.000
感官评分	0.793**	0.010	-0.915**	-0.973**	-0.970**

† *在0.01级别(双尾)相关性显著;**在0.05级别(双尾)相关性显著。

由表4可知,随着贮藏时间的延长,油坛肉中 POV、TBARS 和 TVB-N 值均不断上升,且水分活度与 POV、TBARS、TVB-N 值呈极显著负相关($P<0.01$),而感官评分也不断下降,感官评分与水分活度呈极显著正相关($P<0.01$)。POV 值与 TBARS 值和 TVB-N 值呈极显著正相关($P<0.01$),与感官评分呈极显著负相关($P<0.01$)。

基于表2~表4的 Pearson 相关性分析数据,相较于其他指标,TVB-N 值在温度梯度(4~37℃)中表现出一致性高、敏感性强的特性,且与感官劣化直接关联。因此,选定 TVB-N 值作为油坛肉货架期预测的核心指标。

2.8 不同贮藏温度下油坛肉货架期预测模型的建立

2.8.1 油坛肉品质变化动力学分析 将不同贮藏温度下的试验数据代入式(2)和式(3),计算出油坛肉 TVB-N 值

表4 37℃下油坛肉各指标的 Pearson 相关系数[†]

Table 4 Pearson correlation coefficients of various parameters of oil-preserved meat at 37℃

指标	水分活度	pH 值	POV 值	TBARS 值	TVB-N 值
水分活度	1.000	—	—	—	—
pH 值	-0.272	1.000	—	—	—
POV 值	-0.850**	0.577*	1.000	—	—
TBARS 值	-0.856**	0.264	0.907**	1.000	—
TVB-N 值	-0.842**	0.325	0.941**	0.969**	1.000
感官评分	0.888**	-0.308	-0.927**	-0.983**	-0.963**

† *在0.01级别(双尾)相关性显著;**在0.05级别(双尾)相关性显著。

在不同级别下的反应速率常数 k ,以及对应的线性回归模型的决定系数 R^2 ,具体参数见表5。

表5 油坛肉品质变化动力学参数

Table 5 Kinetic parameters of quality changes in oil-preserved meat

反应级数	贮藏温度/K	动力学方程	k 值	R^2
零级	277.15	$y=0.028\ 83t+7.378\ 9$	0.028 83	0.983
	298.15	$y=0.072\ 65t+6.883\ 4$	0.072 65	0.953
	310.15	$y=0.091\ 20t+6.994\ 8$	0.091 20	0.978
一级	277.15	$y=7.431\ 25\exp(0.003\ 30t)$	0.003 30	0.992
	298.15	$y=7.137\ 66\exp(0.007\ 15t)$	0.007 15	0.984
	310.15	$y=7.445\ 87\exp(0.008\ 04t)$	0.008 04	0.992

由表5可知,油坛肉 TVB-N 值的一级反应相关系数 R^2 均 >0.9 ,整体均比零级反应的大,表明一级反应线性关系优良。因此,选用一级动力学方程作为 TVB-N 值的能级方程。

2.8.2 不同贮藏温度下油坛肉 Arrhenius 方程的确定 基于不同贮藏温度下油坛肉在不同反应级数下的速率常数 k ,并结合 Arrhenius 方程,利用货架期终点时的指标值与指标初始值,对不同温度下的货架期进行预测。通过表5中的动力学方程中的 k 值和贮藏温度,计算 $\ln k$ 与 $1/T$ 的值,并使用 Arrhenius 方程在不同贮藏温度下进行线性回归拟合,结果如图7所示。

由图7可知,线性方程表达为 $y=2.925-2\ 382.527x$,对应的 $-E_a/R$ 值为 $-2\ 382.527$,相关系数 R^2 为 0.956,表明该方程具有较高的拟合度。回归直线的斜率为 $-2\ 382.527$,通过此线性方程可以计算出 TVB-N 变化的活化能 E_a 为 19 809.28 kJ/mol,而速率常数(k_0)为 18.634。将 k_0 值代入式(3)后,得到 Arrhenius 方程:

$$k=18.634 \times e^{-\frac{2\ 382.527}{T}} \quad (7)$$

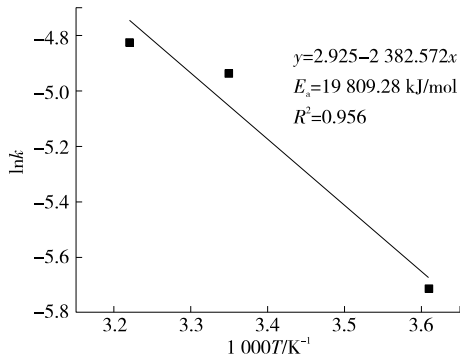


图 7 Arrhenius 曲线
Figure 7 Arrhenius curve

2.9 油坛肉货架期预测模型的建立

根据 Q/PLGK 002S—2019 腌腊肉标准要求,结合贮藏期试验结果,设定油坛肉的 TVB-N 值货架期终点限值为 22 mg/100 g,代入式(8),可得到以 TVB-N 值为关键指标的货架期预测模型:

$$SL = \frac{\ln(22/TVB_0)}{18.634 \times e^{\frac{-2382.527}{T}}} \quad (8)$$

通过式(8)可知,当已知油坛肉初始和货架期终点品质指标值,就可以预测油坛肉在某一贮藏温度下的货架期;当已知油坛肉初始的品质指标值和贮藏温度,可求出该温度下油坛肉在某一时间的 TVB-N 值。

2.10 油坛肉货架期预测模型的验证

为了验证油坛肉 TVB-N 值预测模型,评估在 4, 25, 37 °C 下,油坛肉贮藏第 60, 80, 100 天的 TVB-N 预测值与实测值之间的对比情况,结果见表 6。

表 6 油坛肉在 4, 25, 37 °C 下 TVB-N 值的预测值和实测值
Table 6 Predicted and measured TVB-N values of oil-preserved meat stored at 4, 25 and 37 °C

贮藏温度/°C	贮藏时间/d	预测值/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)	实测值/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)	相对误差/%
4	60	8.8	8.9	±1.1
	80	9.4	9.9	±5.0
	100	10.1	10.4	±2.9
25	60	10.5	10.9	±3.7
	80	11.9	12.6	±5.6
	100	13.5	14.7	±8.1
37	60	12.0	12.1	±0.8
	80	14.3	13.9	±2.9
	100	16.9	16.6	±1.8

由表 6 可知,试验所构建的货架期预测模型在 4, 25, 37 °C 下,TVB-N 预测值与实测值的相对误差分别为 ±2.9%, ±8.1%, ±1.8%, 整体误差控制在 ±8.1% 范围

内。尤其在高温(37 °C)和低温(4 °C)极端条件下,模型表现出更高的预测精度(误差<±3%)。表明该模型能够精准量化 4~37 °C 温度区间内真空包装油坛肉的 TVB-N 值动态变化,且对温度梯度具有强适应性。结合货架期终点阈值,模型预测 4, 25, 37 °C 下的货架期分别为 327, 178, 130 d,与实测值高度吻合。因此,该模型不仅适用于宽温域(4~37 °C)贮藏条件的货架期预测,还可为冷链中断或高温暴露等实际场景下的品质风险评估提供可靠依据。

3 结论

在 4, 25, 37 °C 贮藏条件下,油坛肉的挥发性盐基氮含量、硫代巴比妥酸含量及过氧化值均随贮藏时间的延长显著上升($P<0.05$),感官评分则呈同步下降趋势。Pearson 相关性分析显示,挥发性盐基氮与贮藏时间、温度及感官评分均呈极显著关联,其动态变化规律符合一级动力学模型,拟合优度 $R^2=0.992$ 。利用挥发性盐基氮构建的 Arrhenius 曲线展现出了高度的回归相关性,其 R^2 值达 0.956。所建立的预测模型(7)对挥发性盐基氮含量的预测较为准确,相对误差保持在 ±8.1% 以内。因此,该模型在预测 4~37 °C 贮藏条件下油坛肉挥发性盐基氮含量时具有较高准确性和可靠性。依据模型(8)的预测,油坛肉在 4, 25, 37 °C 下的货架期预计分别为 327, 178, 130 d。尽管该研究明确挥发性盐基氮在油坛肉货架期预测的核心价值,但仍有不足。温度仅设 4, 25, 37 °C,未覆盖流通极端或波动温度,且未整合水分活度、包装等多因子协同影响。后续可补充过渡温度、变温试验,纳入多环境因子建立耦合模型;借助组学技术解析作用机制,跨批次工艺验证模型,提升预测精度与行业适配性,完善腌腊肉货架期管控体系。

参考文献

[1] 中国“八大菜系”之猪肉名菜:坛子肉[J]. 今日养猪业, 2022 (3): 69.
The famous pork dish of China's "eight major cuisines": crock meat[J]. Pigs Today, 2022(3): 69.
[2] 汪修意, 徐文泱, 易守福, 等. 坛子肉中氨基酸和脂肪酸营养成分评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(1): 71-76.
WANG X Y, XU W Y, YI S F, et al. Evaluation of nutritional quality of amino acid and fatty acid composition assay of fermented meat[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11 (1): 71-76.
[3] 何靖柳, 丁捷, 董赞, 等. 微波处理后坛子肉在不同温度下产品的贮藏特性及其货架期预测[J]. 食品与发酵科技, 2018, 54 (5): 18-24, 31.
HE J L, DING J, DONG Y, et al. Storage characteristics and shelf life prediction of ceramic-pot sealed meat with microwave

- treatment stored at different temperatures[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2018, 54(5): 18-24, 31.
- [4] 樊沁昕, 谢忆雯, 高振洪, 等. 不同贮藏温度对自热食品货架期的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 163-169.
- FAN Q X, XIE Y W, GAO Z H, et al. Effect of different storage temperature on shelf life of self-heating food[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 163-169.
- [5] 张德福, 曲耀天, 张永勤, 等. 不同加工方式的三文鱼货架期预测模型建立与应用[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 40-49.
- ZHANG D F, QU Y T, ZHANG Y Q, et al. Establishment and application of shelf-life prediction models for salmon with different processing methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(16): 40-49.
- [6] 李彦, 符慧靖, 邵乐乐, 等. 红烧牛肉肉货架期预测模型的建立[J]. 核农学报, 2023, 37(5): 1 005-1 011.
- LI Y, FU H J, SHAO L L, et al. Establishment of shelf life prediction model of braised beef[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(5): 1 005-1 011.
- [7] 李廷妮, 曾雪璐, 翟羽. 冷链运输条件下气调包装酱卤鸭肉制品货架期预测模型的建立[J]. 中国调味品, 2023, 48(11): 126-129.
- LI T G, ZENG X L, ZHAI Y. Establishment of shelf life prediction model for sauced duck meat products with modified atmosphere packaging under cold-chain transportation conditions[J]. China Condiment, 2023, 48(11): 126-129.
- [8] SARAFOJI P, MARIAPPAN V, ANISH R, et al. A study on the quality and shelf life of ripening mango using the PCM-based solar cold storage system[J]. International Journal of Ambient Energy, 2022, 43(1): 5 880-5 890.
- [9] KHAN M J, RAMIAH S K, SELAMAT J, et al. Utilisation of pullulan active packaging incorporated with curcumin and pullulan mediated silver nanoparticles to maintain the quality and shelf life of broiler meat[J]. Italian Journal of Animal Science, 2022, 21(1): 244-262.
- [10] AŞIK-CANBAZ E, ÇÖMLEKÇİ S, CAN SEYDİM A. Effect of moderate intensity pulsed electric field on shelf-life of chicken breast meat[J]. British Poultry Science, 2022, 63(5): 641-649.
- [11] 彭健斌. 发酵羊肉脯工艺优化及货架期预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 64-76.
- PENG J B. Study on the process optimization and shelf life prediction of fermented mutton jerky[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 64-76.
- [12] REDONDO-SOLANO M, GUZMÁN-SABORÍO P, RAMÍREZ-CHAVARRÍA F, et al. Effect of the type of packaging on the shelf life of ground rabbit meat[J]. Food Science and Technology International, 2022, 28(2): 190-199.
- [13] LIU P H, QIAO Y C, HOU B R, et al. Building kinetic models to determine moisture content in apples and predicting shelf life based on spectroscopy[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(12): e13907.
- [14] 张雪梅. 四川香肠生产过程中理化特性、微生物特性及产香葡萄球菌的筛选与应用[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010: 18-19.
- ZHANG X. Physical, chemical and microbial property of Sichuan sausage during processing and selection and application of staphylococcus[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2010: 18-19.
- [15] EKO IRIANTO H, GIYATMI G. Determination of rate constant, order reaction model and shelf life of crude hoki (*Macrurus novaezelandiae*) oil[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 860(1): 012072.
- [16] ZHANG W, LUO Z W, WANG A C, et al. Kinetic models applied to quality change and shelf life prediction of kiwifruits[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110610.
- [17] XI P S, ZHU D S, SHEN Y S, et al. Construction of shelf-life prediction model for golden delicious apple based on electronic nose[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1 952(4): 042009.
- [18] QUAN C L, XI Q, SHI X P, et al. Development of predictive models for egg freshness and shelf-life under different storage temperatures[J]. Food Quality and Safety, 2021, 5: 21.
- [19] 柴笑玉, 张德权, 王德宝, 等. 不同阻氧性材料包装对生鲜猪肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 331-340.
- CHAI X Y, ZHANG D Q, WANG D B, et al. Effects of packaging with different oxygen resistance materials on the quality of fresh pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 331-340.
- [20] 王岸娜, 崔启含, 吴立根. 3D打印猪肉脯贮藏期间品质变化的研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(15): 257-266.
- WANG A N, CUI Q H, WU L G. Quality changes of 3D printed pork jerky during storage[J]. Food and Fermentation Industry, 2025, 51(15): 257-266.
- [21] KUMAR S S, ARYA M, CHAUHAN A S, et al. Basella rubra fruit juice betalains as a colorant in food model systems and shelf - life studies to determine their realistic usability[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(8): e14595.
- [22] HE R, WANG Y J, ZOU Y C, et al. Storage characteristics of infrared radiation stabilized rice bran and its shelf-life evaluation by prediction modeling[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(6): 2 638-2 647.
- [23] BRAVI E, SILEONI V, PERRETTI G, et al. Accelerated shelf-life model of gluten-free rusks by using oxidation indices[J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126971.
- [24] LI X C, OEY I, LEONG S Y, et al. Understanding the volatile flavour changes during accelerated shelf-life testing of oats using chemometrics and kinetic modelling[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134864.

- [25] KOSEGARTEN C E, RAMÍREZ-CORONA N, LÓPEZ-MALO A, et al. Wheat-based fried snacks shelf-life prediction using kinetic, probabilistic, and time-to-fail models[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(5): e16548.
- [26] 王素, 张德权, 王卫, 等. 超快速冷却结合不同包装贮藏对冷鲜猪肉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(10): 238-248. WANG S, ZHANG D Q, WANG W, et al. Effects of very fast chilling combined with different packaging on the quality of fresh pork[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(10): 238-248.
- [27] 孙莹, 周斌, 王龙, 等. 杀菌方式对大豆蛋白基小酥肉贮藏品质影响与其货架期预测[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 333-341. SUN Y, ZHOU B, WANG L, et al. Effect of sterilization methods on the storage quality of soybean protein-based small crisp meat and its shelf life prediction[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 333-341.
- [28] 崔跃慧, 范海潇, 王甜, 等. 不同贮藏温度下调理猪肉饼货架期预测模型的建立[J]. 核农学报, 2018, 32(12): 2 355-2 362. CUI Y H, FAN H X, WANG T, et al. Prediction model of the shelf-life of ready-to-eat pork patties at different storage temperature[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(12): 2 355-2 362.
- [29] ZHAO S S, HAN X Y, LIU B, et al. Shelf-life prediction model of fresh-cut potato at different storage temperatures[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 317: 110867.
- [30] 夏南, 刘晓媛, 向晨曦, 等. 温度和包装方式对茶香鳊鱼片储藏品质的影响及其货架期预测[J]. 中国调味品, 2024, 49(10): 133-139. XIA N, LIU X Y, XIANG C X, et al. Effect of temperature and packaging methods on storage quality of tea flavored bighead carp fillets and prediction of their shelf life[J]. China Condiment, 2024, 49(10): 133-139.
- [31] 黎财慧, 姚丽锋, 丁琦, 等. 真空包装低温熟制鸽子货架期预测模型的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 108-113. LI C H, YAO L F, DING Q, et al. Establishment of shelf life prediction model for vacuum-packed low-temperature cooked pigeon[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(5): 108-113.
- [32] ZHOU B, LUO Y G, HUANG L H, et al. Determining effects of temperature abuse timing on shelf life of RTE baby spinach through microbial growth models and its association with sensory quality[J]. Food Control, 2022, 133: 108639.
- [33] 黄静, 唐人杰, 罗丹, 等. 即食原切牛肉片贮藏过程中的品质变化及其货架期预测[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(6): 89-94, 114. HUANG J, TANG R J, LUO D, et al. Quality change and shelf-life prediction of instant raw cut beef slices during storage[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2022, 58(6): 89-94, 114.
- [34] 谢进, 曹新志, 杨建刚, 等. 即食烧鹅胸肉的贮藏品质研究[J]. 现代食品科技, 2024, 40(11): 210-218. XIE J, CAO X Z, YANG J G, et al. Study on the storage quality of ready-to-eat deep-fried goose breast[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(11): 210-218.
- [35] 王辉, 庄子通, 曾晓房, 等. 鸽肉贮藏品质变化和货架期预测模型[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(14): 185-188, 224. WANG H, ZHUANG Z T, ZENG X F, et al. Storage quality changes and shelf life prediction model of pigeon meat[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(14): 185-188, 224.
- [36] PARK J J, CHOI J H, PARK K J, et al. Shelf-life prediction of fresh ginseng packaged with plastic films based on a kinetic model and multivariate accelerated shelf-lifetime testing[J]. Korean Journal of Food Preservation, 2023, 30(4): 573-588.
- [37] 王唯, 赵武奇, 田媛, 等. 神仙豆腐的货架期预测模型[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 94-102. WANG W, ZHAO W Q, TIAN Y, et al. Shelf-life prediction model of *Premna microphylla* Turez jelly[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 94-102.
- [38] 胡力, 王芳梅, 吕明珊, 等. 不同贮藏温度下真空包装鸡肉酱品质变化及货架期模型的建立[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 132-138. HU L, WANG F M, LYU M S, et al. Quality changes during storage at different temperatures and establishment of shelf-life model of vacuum packaged chicken paste[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(10): 132-138.
- [39] 毛青秀, 徐远芳, 陈渠玲, 等. 辐照方式对南酸枣糕品质及货架期的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 109-116, 138. MAO Q X, XU Y F, CHEN Q L, et al. Effects of irradiation methods on the quality and shelflife of *Choerospondias axillaris* pastilles[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 109-116, 138.
- [40] 宣伟, 李铁, 薛锡佳, 等. 臭氧杀菌联合壳聚糖涂膜对冷鲜黄牛肉的保鲜效果[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 173-178. XUAN W, LI T, XUE X G, et al. Effects of ozone sterilization edible combined with coatings chitosan on the preservation of chilled yellow cattle[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 173-178.