

即食烧鹅胸肉的贮藏品质研究

谢进¹, 曹新志^{1*}, 杨建刚¹, 白婷², 张楷正¹

(1. 四川轻化工大学生物工程学院, 四川宜宾 644000) (2. 成都大学药学与生物工程学院, 四川成都 610106)

摘要: 分别在 -18、4、25 °C 的贮藏温度下, 分析真空包装下烧鹅胸肉的 pH 值、挥发性盐基氮 (Total Volatile Base Nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸值 (Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS)、质构特性、感官评价与菌落总数的变化, 采用修正的 Gompertz、Arrhenius 模型结合动力学方程分别与总菌落数进行拟合, 建立货架期模型, 并对模型预测精确度进行分析从而验证模型的可行性。分析可知: 低温贮藏可以明显缓解肉样的品质下降且可以在一定程度上延长其货架期, 具体表现减缓了 pH 值、弹性和硬度的下降, 抑制了丙二醛和 TVB-N 的上升、菌落总数的增长; 在 25 °C 下 TBARS 值在贮藏第二周显著增加, 对应的菌落总数在该时间段增长速率较快; 感官评价分别在贮藏 4、3、2 周下降至不可接受的标准。基于菌落总数变化拟合的 Arrhenius 模型回归系数基本在可接受范围内, 但是预测值与实际结果对比误差均大于 10%, 而 Gompertz 模型的回归系数 R^2 均大于 0.98, 且误差较小, 由该模型预测所得的 4、15、25 °C 下鹅肉的货架期约为 25、12、9 d。所建立的模型可为实时控制贮藏流通条件延长烧鹅胸肉的货架期提供实践指导。

关键词: 鹅肉; 货架期; 贮藏特性; 动力学方程

文章编号: 1673-9078(2024)11-210-218

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.11.1170

Study on the Storage Quality of Ready-to-eat Deep-fried Goose Breast

XIE Jin¹, CAO Xinzhi^{1*}, YANG Jiangang¹, BAI Ting², ZHANG Kaizheng¹

(1. College of Bioengineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644000, China)

(2. College of Pharmacy and Bioengineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: The changes in the pH, total volatile base nitrogen (TVB-N), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), textural and structural characteristics, sensory score, and total colony count of the deep-fried goose breasts in vacuum packaging stored at -18, 4, and 25 °C were determined. To construct a shelf-life model, the modified Gompertz and Arrhenius models combined with kinetic equations were used to fit the total colony counts, and the prediction accuracy of the model was assessed to ensure its feasibility. The analysis reveals that low-temperature storage could slow down the deterioration of meat quality and prolong its shelf life to a certain extent i.e. the decreases of pH, elasticity and hardness were slowed down, and the increases of malondialdehyde, TVB-N and total colony count were inhibited; At 25 °C, the TBARS value increased significantly in the second week of storage, and the corresponding total colony counts increased at a higher rate during this time period. The sensory evaluation score of the meat samples declined to unacceptable levels after storage for 4, 3, and 2 weeks. The regression coefficients of Arrhenius model for the fitting based on total colony counts were basically within

引文格式:

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 Jin, CAO Xinzhi, YANG Jiangang, et al. Study on the storage quality of ready-to-eat deep-fried goose breast [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 210-218.

收稿日期: 2023-09-27

基金项目: 四川省肉类研究重点实验室开放式基金 (22-R-080)

作者简介: 谢进 (1998-), 男, 硕士, 研究方向: 食品工程, E-mail: 1250960389@qq.com

通讯作者: 曹新志 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: caoxinzhi@163.com

the acceptable range, but the variations between the predicted values and the actual results were more than 10% , whilst the Gompertz model's regression coefficients R^2 were higher than 0.98 with smaller variations, indicating that the shelf-lives of the goose meat stored at 4, 15, and 25 °C predicted by the model, was were approximately 25, 12, and 9 days, respectively. The established model can provide practical guidance for real-time control of the storage and distribution conditions to extend the shelf life of deep-fried goose breasts.

Key words: goose breast; shelf life; storage characteristics; kinetic equations

鹅肉作为一种常见的优质的食品原料,其食性平和、清香不腻,富含多种人体必需氨基酸、蛋白质、维生素、微量元素等,且脂肪含量相对其他肉类较低,容易被人体消化吸收^[1],在2002年,被联合国粮农组织列为21世纪重点发展的绿色食品之一^[2]。我国的鹅肉产量在世界的占比高达90%以上且鹅肉加工方式种类繁多,例如酱卤制品和腌腊制品。工业化生产、真空包装的冷吃肉制品因其具有风味独特、方便卫生、富有营养等优点受到消费者的青睐,具有良好的发展势头和广阔的发展空间^[3,4]。

除了食品本身口味和营养健康外,食品货架期也是食品的一个非常重要的质量特征,通常定义为它可以储存而会被消费者接受的时间长度^[5]。影响食品货架期的主要因素有温度、湿度、微生物、杀菌方式、防腐添加剂、包装材料和包装形式等,而温度的影响尤为显著。肉类中的多种营养成分使其成为腐败菌和常见的食源性病原体增长和传播的理想环境,致使肉类腐败变质。由于酶的活性易导致肉类的腐败,肉制品中脂肪、蛋白质和碳水化合物的分解会导致异味的产生。与其他一般食品类似,消费者购买肉食品时需通过外观(颜色、质地)和气味等理化属性^[6]。除此之外,总挥发性盐基氮(TVB-N)常被用作蛋白质和胺降解的标志物,被广泛用于解释肉类的新鲜度^[7],并有相应的国家标准来定义其限值。脂肪的变化也可以很好地反映肉类质量的变化^[8],因此TBARS被作为评估脂质氧化的重要指标,用于量化多不饱和脂肪酸降解的次生副产物。

在食品研发生产中,厂商必须考虑的质量和安 全因素是微生物的稳定性、食品的理化和感官特性。为了确保持续的创新,食品工业需要能够在贮藏或配方改变期间预测食品品质变化的工具。因此,研究食品质量的变化,建立保质期模型,对食品质量的管理和控制具有重要意义。本研究通过分析不同贮藏温度下(-18、4、25 °C)烧鹅胸肉的

pH值、挥发性盐基氮(TVB-N)、硫代巴比妥酸值(TBARS)、感官评价、质构特性、菌落总数的变化,建立鹅肉货架期动力学模型,对研究烧鹅胸肉制品的货架期研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

白条鹅胸肉,购买于冻货市场;青花椒、白芝麻、白糖、八角、食盐、食用焦磷酸钠、木薯粉、姜、柠檬汁、料酒、老抽、陈皮、白术、桂皮、花椒、肉蔻、辣椒面、香叶、干辣椒、味精等均为市售。

1.2 试剂

2-硫代巴比妥酸;正丁醇;氧化镁(MgO);硼酸(H_3BO_3);硫酸(H_2SO_4);甲基红指示剂($C_{15}H_{15}N_3O_2$);溴甲酚绿指示剂($C_{21}H_{14}Br_4O_5S$); $\varphi=95\%$ 乙醇(C_2H_5OH);胰蛋白胨;琼脂;葡萄糖;磷酸盐缓冲液;酵母膏。

1.3 主要仪器与设备

TA-XT plus 质构仪(物性测试仪)、p50 探头,北京微讯超技仪器技术有限公司;HH-2 数显恒温水浴锅,常州普天仪器制造有限公司;TGL-16LG-B 离心机,湖南星科科学仪器有限公司;UV-1000 型紫外可见分光光度计,上海翱艺仪器有限公司;ESJ200-4A 电子天平,沈阳龙腾电子有限公司;DHG-9140A 型电热鼓风干燥箱,上海一恒科技有限公司;ZDJ-3A 自动电位滴定仪,上海仪电科学仪器股份有限公司;YX-280 手提式压力蒸汽灭菌锅,合肥华泰医疗设备有限公司;ZWYR-4912 智城恒温振荡器,上海智城分析仪器制造有限公司;BC /BD518HD 冰箱,青岛海尔特种电冰柜有限公司;SW-CJ-1D 型单人净化工作台,上海沪净医疗器械有限公司;KQ5200V 超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;HO1-1 数字显示恒温磁力搅拌器,上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司。

1.4 产品制作

将冷冻温度 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，时间保持 12 h 以上的鹅胸肉解冻 4 h，将解冻好的鹅肉切成 2~3 cm 的鹅肉丁，用清水反复清洗浸泡切割好的鹅肉丁，直至将血水、杂物、多余油脂清洗干净。将洗净的鹅肉块焯水 30~60 s，捞出并与抹料（食盐 3%、食用级焦磷酸钠 0.3%、柠檬汁 4%、料酒 4%）混合搅拌 10~20 min，放入腌制容器用保鲜膜密封腌制 60~90 min。在炒锅中加入植物油并加热到 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，自然冷却到 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，将沥干水分的鹅肉丁倒入锅中炒制 30 s，辅料按顺序添加，干辣椒 5%、青花椒 3% 炒 30 s，加入香辛料 5%（比例为陈皮 1:八角 2.5:白术 1.5:桂皮 2.5:花椒 1:肉蔻 2）转小火炒制 1 min，加入白糖 1%、味精 0.5%、芝麻 2%、米酒 4%，翻炒 2~3 min 至肉块表面变黄即可出锅。成品使用 PET/PE 材料并采用真空包装，将包装袋置于波长 253.7 nm 紫外线杀菌灯下照射 15 min，包装后的成品采用巴氏消毒法灭菌。（其中辅料炒料等的添加量以原料鹅肉质量分数表示）。

1.5 方法

1.5.1 pH值测定

称取绞碎后的烧鹅胸肉成品 10 g，加入 100 mL 蒸馏水，用磁力搅拌器搅拌 30 min，然后过滤至 200 mL 的烧杯中，最后用滴定仪测定收集到的滤液的 pH 值，试验重复 3 次。

1.5.2 质构特性测定

用物性质构仪测定鹅肉成品的质构特性，检测参数：直径 2 cm 的圆柱探头，测前速度 5 mm/s，测量速度 3 mm/s，测后速度 5 mm/s，压缩率 50%，两次压缩间隔 10 s，重复 3 次。

1.5.3 TBARS值

脂质氧化通过硫代巴比妥酸活性物质（TBARS）含量测定，依据余江泳^[9]和 GB5009.181-2016《食品中丙二醛的测定》^[10]的修改方法，基于分光光度法测定一分子丙二醛与两分子 2- 硫代巴比妥酸反应后形成的粉红色络合物确定 TBRAS 值，设置空白组，每组数据设置三个平行实验，数据取平均值并减去空白对照组的值。

1.5.4 菌落总数

参考《食品微生物学检验菌落总数测定》（GB4789.2-2016）中所示方法略作修改进行测定。

1.5.5 挥发性盐基氮含量测定

参考《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》（GB5009.228-2016）中的半微量定氮法进行测定，每组实验重复三次。

1.5.6 感官评价标准

表 1 感官评价表

Table 1 Sensory evaluation table

色泽	滋味	口感	气味	等级
呈焦黄色，色泽鲜亮，有光泽	香味浓郁，咸淡适中，滋味鲜美	外焦里嫩，紧实有弹性，咀嚼性	肉香味浓郁，无异味	17~25
呈深黄色，色泽较分明，有光泽	肉味、麻辣味浓，无不良气味	弹性适中，咀嚼性一般	香味适中，无明显异味	9~16
有焦糊色，色泽较暗淡，无光泽	味道较差，存在不良气味	嫩度较差，咀嚼性较差，口感粗糙	香味较差，存在不良气味	0~8

选择 8 名业内研究人员组成感官评定小组，根据表 1 对烧鹅胸肉的色泽、滋味、口感、气味 5 个方面进行评价，将总分达到 60 分以上感官方面被视为可接受。

1.6 货架期模型的建立

1.6.1 一级模型

食品中微生物数量变化可以用一级模型来表达，采用目前初级模型中应用最为广泛的 Gompertz 模型，该模型具有使用简单而且预测较为准确的优点。

对 Gompertz 模型的表达式修正^[11]如下：

$$A(t) = A_0 + (A_{\max} - A_0) \exp \left\{ - \exp \left[\frac{\mu_{\max} e}{A_{\max} - A_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

式中：

A_0 ——菌落总数初始值，lg CFU/g；

A_{\max} ——体系中最大菌落数，lg CFU/g；

μ_{\max} ——微生物最大比生长速率，lg CFU/g/d；

λ ——迟滞时间，d；

t ——贮藏时间，d。

1.6.2 二级模型

在食品贮藏过程中，大多数食品品质变化都遵循的零级或一级动力学方程能够反映食品贮藏时间与大多数食品质量指标变化的关系，可用于食品货架期预测^[12]。本实验采用一级动力学方程结合二级模型 Arrhenius 方程^[13]建立货架期模型。一级动力学方程：

$$A=A_0 \exp(kt) \quad (2)$$

式中:

t —贮藏时间, d;

k —速率常数;

A_0 —初始值;

A —贮藏第 t 天的实际值。

Arrhenius 方程如下:

$$k=k_0 \times \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

两边取对数得

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (4)$$

式中:

k —即烧鹅胸肉品质指标变化的速率常数;

k_0 —频率因子;

E_a —活化能, kJ/mol;

R —摩尔气体常数, 8.314 J/mol·K;

T —贮藏温度, K。

由 (3) 可得对于不同温度下的 $\ln k$ 与 $1/T$ 进行拟合, 可以得出活化能 E_a 和频率因子 k_0 的值。货架期模型 SL 可由 (1) (2) 式得到:

$$SL = \frac{\ln A - \ln A_0}{k_0 \times \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (5)$$

1.6.3 模型的验证

利用统计指标对预测模型的拟合和精度进行评价, 用均方误差平方根 (Root Mean Square Error, RMSE) 和回归系数 R^2 检验模型拟合度^[14]。利用偏差度 B_f , 准确度 A_f 对建立的模型进行验证^[15-17]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

$$A_f = 10^{\frac{\left[\sum_{i=1}^n \left| \log\left(\frac{\hat{y}_i}{y_i}\right) \right| \right]}{n}} \quad (8)$$

$$B_f = 10^{\frac{\left[\sum_{i=1}^n \log\left(\frac{\hat{y}_i}{y_i}\right) \right]}{n}} \quad (9)$$

式中:

n —实际测量点数;

y_i —第 i 个测量点的实际菌落数, lg CFU/g;

\bar{y} —实验中观测值的平均值, lg CFU/g;

\hat{y}_i —第 i 个测量点的预测菌落数, lg CFU/g。

1.7 数据分析

所有数据采用 Microsoft 2021 Excel 进行整理, 试验中测定所得数据统计采用 Origin 21 和 Spss 24.0 图形绘制和数据分析。

2 结果与讨论

2.1 即食烧鹅肉在贮藏期间的品质特性变化情况

2.1.1 即食烧鹅肉在不同温度贮藏过程中 pH 值的变化情况

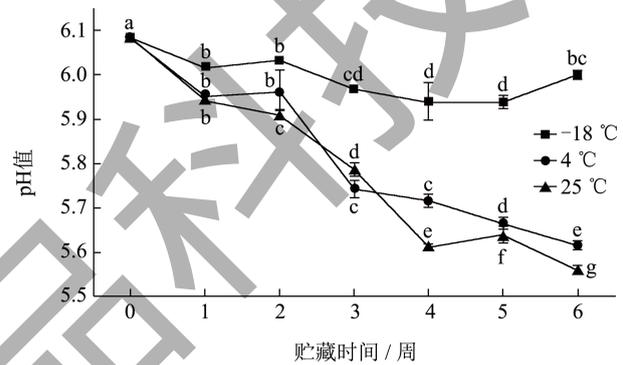


图 1 鹅肉的 pH 值在贮藏期间的变化情况

Fig.1 The change of pH value of goose meat during storage

注: 不同小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

pH 值是反应肉制品品质的重要理化指标, 贮藏过程中 pH 值的变化情况能够反映出肉制品的嫩度、保水能力、颜色、多汁性和保质期等特性^[18]。由图 1 可知, pH 值在 4 °C 和 25 °C 的贮藏温度下整体与贮藏时间的关系呈现负相关且有逐渐下降的趋势, 但是在 -18 °C 贮藏的鹅肉 pH 值的变化趋于平缓, 陈崇艳等^[19]对 25 °C 下贮藏的卤制鹅肉在贮藏 5 d 时测量的 pH 值与本实验中 25 °C 下贮藏 1 周的结果相近, 在贮藏后期肉样 pH 值小于本实验的测量结果, 而在添加防腐剂和进行微薄杀菌处理后的肉样 pH 值下降趋于平缓。而 Damaziak 等^[20]将 2 °C 真空包装下生鹅肉片和熏制鹅肉片分别贮藏 7 d 和 5 d 时测量的 pH 值分别为 5.74 和 5.68, 均低于本实验 4 °C 贮藏 1 周时的测量结果, 在贮藏时间分别为 10 d 和 15 d 时鹅肉 pH 值均出现小幅下降, 与本实验一致。可能是肉样中的肌糖原的无氧酵解产生得大量乳酸, 以及 ATP 分解生成的磷酸基团导致的。在 25 °C 的相对高温下, pH 值的变化速率相对较大, 可能是该温度更适合乳酸菌的生长繁殖。其次, 由

于肉制品中蛋白质被微生物分解为含氮碱性物质,从而导致肉样中 pH 值的上升。随着贮藏时间的增加低 pH 值会抑制无糖酵解酶的活性,之后随着贮藏时间的增加可能会导致整体 pH 值停止下降甚至出现上升的情况。在实验所涉及的贮藏时间内, pH 值在合理范围内变化,但是在实验中涉及的贮藏后期,肉样的微生物指标及感官评价等指标已经表明肉样已不再具备消费价值。

2.1.2 即食烧鹅肉在不同温度贮藏过程中TBARS值的变化情况

TBARS 值被用作肉类样品中脂质氧化的标志, TBARS 值的变化与肉类产生的醛、酸、酮等物质含量相关。相关研究中通常利用硫代巴比妥酸检测脂肪氧化产物丙二醛 (MDA), 根据丙二醛含量的多少推测肉类样品的脂肪氧化程度^[21]。如图 2 所示, 温度对于 TBARS 值的变化有显著影响, -18°C 肉样的增长速度明显低于其他两组, 显然是由于贮藏温度升高加速了肉样中脂肪的氧化, 导致了腐败变味, 该结果与 Werekńska 等^[22]对 -20°C 贮藏 30 d 鹅肉的 TBARS 值 0.57 mg/kg 相比略小。在贮藏 0 周时肉样的 TBARS 值为 0.11 mg/kg , 而 25°C 贮藏 6 周的肉样的 TBARS 值为 0.85 mg/kg , 参照 Esmaciili 等^[23]的方法, 当 TBARS 值 $>1.0\text{ mg/kg}$ 的肉制品被判定为变质肉, 可见在真空包装在一定程度上抑制了肉样的脂肪氧化, 其结果与 Orkusz 等^[24]对 4°C 下真空包装贮藏鹅肉在 7、11 d 下测量的 TBARS 值均略大于本实验值, 可能是由于本实验的鹅肉进行了熟制, 而且包装后采用了巴氏杀菌, 有待进一步实验验证。

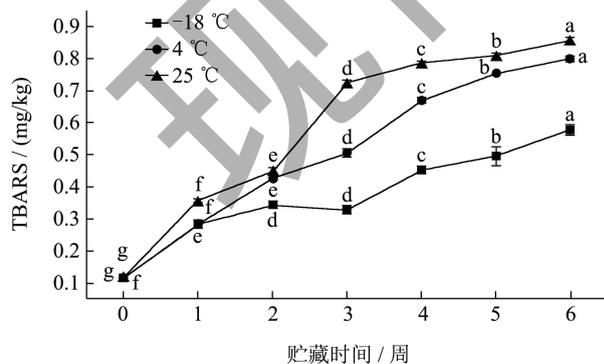


图 2 不同温度贮藏期间鹅肉 TBARS 值的变化情况

Fig.2 Changes in the value of goose meat TBARS during storage at different temperatures

2.1.3 即食烧鹅肉在不同温度贮藏过程中TVB-N值的变化情况

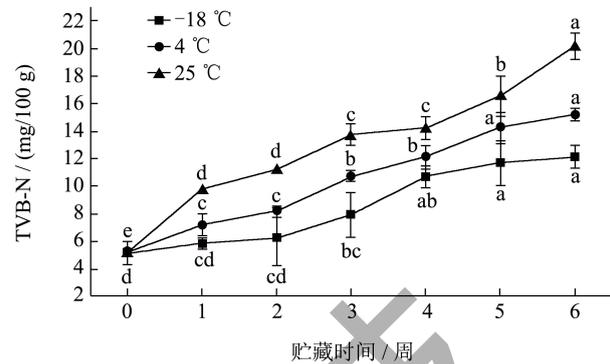


图 3 不同贮藏温度下鹅肉 TVB-N 值随贮藏时间的变化情况

Fig.3 Different storage temperatures of goose meat TVB-N worth changes

肉类蛋白质的水解和腐败菌的作用生成的包括氨、二甲胺和三甲胺类等在内的挥发性含氮化合物的积累都会影响 TVB-N 值。如图 3 所示, TVB-N 值与贮藏时间呈现正相关, 且随着贮藏时间越高, TVB-N 值增加越快, Nemati 等^[25]研究了膳食补充无机或有机硒对生鹅肉和肝脏在 4°C 下储存的 TVB-N 值的变化情况, 在贮藏结束时 (第 9 天) 基础饮食的鹅肉肉样的 TVB-N 值分别为 34.08 、 32.52 和 28.79 mg/100 g , 远大于本实验值, 可能原因是在实验过程中使用好氧聚丙烯袋保存肉样且未进行如本实验一样的抽真空和巴氏杀菌操作, 导致包装内残留空气和较多的微生物, 导致在贮藏过程中产生了更多的挥发性含氮化合物。根据彭健斌等^[26]按照鲜度分为三级: TVB-N 含量 $<15\text{ mg/100 g}$ 为一级鲜度, $15\text{ mg/100 g} \leq \text{TVB-N 含量} \leq 20\text{ mg/100 g}$ 为二级鲜度, TVB-N 含量 $>20\text{ mg/100 g}$ 为腐败变质。在 25°C 贮藏温度下, 第 6 周的 TVB-N 值显著大于其他贮藏时间的 TVB-N 值 ($P < 0.05$), 而且该处的 TVB-N 值已经达到腐败变质肉的标准。主要原因是在 25°C 下腐败菌快速增长以及相关酶活性的较高使肉制品中蛋白质较快分解成等碱性含氮物质, 到了贮藏后期微生物代谢物的不断积累会提高 TVB-N 的值。在冷藏 4°C 和冻藏 -18°C 的条件下, 鹅肉的 TVB-N 值保持低增长率, 这是由于低温会抑制相关腐败菌的生长并降低内源酶的活性。

2.1.4 即食烧鹅肉在不同温度贮藏过程中菌落总数的变化情况

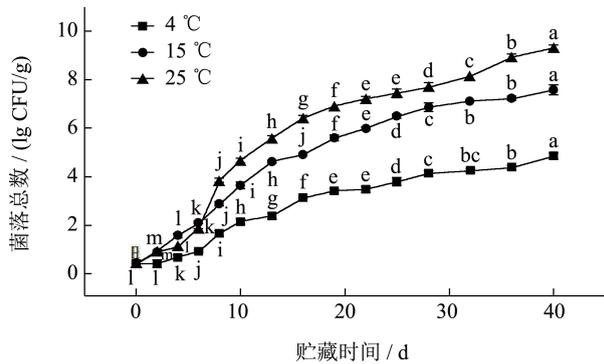


图4 鹅肉在不同贮藏温度下的菌落总数变化情况

Fig.4 Changes in the total number of colonies of goose meat at different storage temperatures

微生物是致使食品腐败变质的主要原因，因此肉制品中的菌落总数变化可作为其微生物污染的评判指标，经常被用于预测食品的货架期。在-18℃情况下微生物基本无法存活，因此选择15℃作为肉样的其中一个贮藏温度。为了观察方便通常菌落总数采用对数形式表达，由图4可知随贮藏时间增加菌落总数呈现增长趋势，而且随着贮藏温度升高，增长速率呈上升趋势。GB 2726-2016《食品安全国家标准熟肉制品》中限定熟肉制品中菌落总数为 10^4 CFU/g，4、15、25℃的贮藏温度下分别在27、12、9 d时菌落总数超过标准限值。

2.1.5 即食烧鹅肉在不同温度贮藏过程中质构特性的变化情况

质构特性是肉品品质的重要组成部分，其中硬度、弹性、内聚性等都是评价肉品品质的重要指标。肉制品的硬度是指探头第一次压缩样品时所用的最大压力，反映的是样品在受力被挤压时对变形的抵抗力的大小，是评价肉品嫩度常用的指标之一。由表2可知肉样的硬度随着贮藏时间的增加而增加，且受到贮藏时间的影响较为显著 ($P < 0.05$)，在贮藏过程中主要是持水量的下降以及微生物和酶对于肌肉组织的分解作用导致了肉样硬度的下降。弹性是指第一次下压结束与第二次下压开始时肉样能恢复的高度的大小，反映了样品压缩后恢复的程度，是评价肉品嫩度常用的指标之一。而图上数据显示，虽然肉样的弹性和内聚性虽然随贮藏时间的增加而降低，但贮藏时间对于肉样的弹性和内聚性影响并不显著 ($P > 0.05$)，这是由于在贮藏过程中肉样水分的流失，伴随着蛋白质的分解，肉样的组织结构

有所破坏，肉中汁液在不断流失，所以导致肉样的弹性不断下降。内聚性反映的是咀嚼食物时实物抵抗受损并紧密连接，使食物保持完整的性质，即组成样品内部结合键的强度。鹅肉的内聚性无显著变化可能是由于研制过程中添加了焦磷酸钠，而磷酸盐对肉制品有持水性、增进结着力等作用，稳固了鹅肉内部的结构。

表2 不同贮藏温度下鹅肉的质构特性

Table 2 Texture characteristics of goose meat at different storage temperatures

时间/d	硬度/g	弹性	内聚性
0	8 290.81±79.85 ^a	0.82±0.060 ^a	0.63±0.050 ^a
2 (-18℃)	7 376.62±1 133.83 ^a	0.72±0.047 ^{ab}	0.60±0.044 ^a
4 (-18℃)	6 952.96±365.02 ^{ab}	0.68±0.049 ^{ab}	0.57±0.035 ^a
6 (-18℃)	4 464.19±346.12 ^b	0.62±0.075 ^b	0.57±0.027 ^a
8 (-18℃)	6 065.47±431.56 ^{ab}	0.61±0.097 ^b	0.54±0.063 ^a
10 (-18℃)	4 468.20±466.16 ^b	0.60±0.070 ^b	0.56±0.064
2 (4℃)	6 064.73±620.67 ^b	0.67±0.070 ^b	0.61±0.016 ^{ab}
4 (4℃)	4 996.98±773.23 ^{bc}	0.63±0.059 ^{bc}	0.59±0.047 ^{ab}
6 (4℃)	4 548.90±314.21 ^{bc}	0.59±0.068 ^{bc}	0.62±0.039 ^{ab}
8 (4℃)	4 640.39±484.83 ^{bc}	0.54±0.055 ^c	0.60±0.048 ^{ab}
10 (4℃)	3 133.22±1311.31 ^c	0.51±0.056 ^c	0.52±0.079 ^b
2 (25℃)	6 509.84±926.55 ^c	0.81±0.060 ^a	0.52±0.043 ^c
4 (25℃)	3 353.04±157.24 ^d	0.76±0.024 ^{ab}	0.54±0.030 ^{bc}
6 (25℃)	5 318.42±702.39 ^c	0.84±0.016 ^a	0.59±0.036 ^{abc}
8 (25℃)	3 506.36±278.67 ^d	0.73±0.084 ^{ab}	0.55±0.030 ^{abc}
10 (25℃)	2 825.35±549.59 ^d	0.67±0.071 ^b	0.54±0.027 ^{ab}

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.1.6 即食烧鹅肉在不同温度贮藏过程中感官评分随时间变化情况

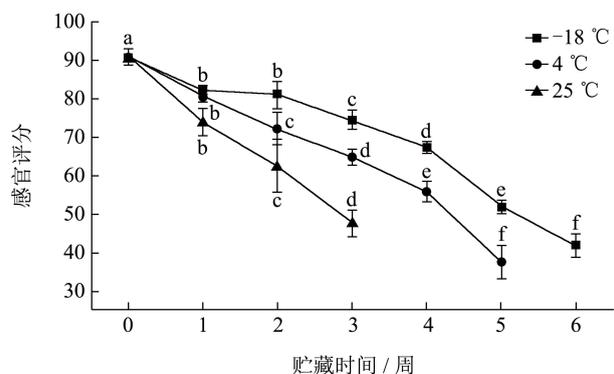


图5 鹅肉贮藏期间感官变化

Fig.5 Sensory changes during goose meat storage

图5显示了不同贮藏温度下的肉样感官评价的变化,由结果可知,低贮藏温度能保持更好的感官品质。由于微生物及酶的作用,肉样中脂肪氧化和蛋白质的分解造成的色泽的改变并且产生的一些不愉快的气味,导致贮藏期间的肉样品质逐降低。25、4℃的肉样分别在第3周和第5周之后产生了不同程度的异味,因此不做感官评价。-18、4、25℃贮藏的肉样在第2周第4周第5周的感官评分分别为62、56、52,此时的肉样色泽较为暗淡伴随着轻微异味,表面微微发粘口感不佳。

2.2 模型的拟合与验证

2.2.1 一级模型的拟合与验证

用 Origin 软件对不同贮藏温度下的贮藏时间和该时间下所测定的菌落总数按公式(1)进行拟合,从而得到 μ 和 λ 的值,将二者代入公式(1)中得到如下表3所示的拟合方程。通过公式(6)~(9)分别计算出 Gompertz 模型拟合参数和评价参数。由表4可知:鹅胸肉中微生物的最大生长速率 μ_{max} 随温度增加而增加,在 25℃时达到 0.52。所有方程拟合出的相关系数值都较高, R^2 分别为 0.98、0.99、0.98,均在 0.98 以上,表明建立的一级模型具有较好的拟合效果。RMSE 值均较小,表明拟合度较好。 A_f 和 B_f 的值分别在 1.1~1.9 和 0.75~1.25 之间,也均在可接受范围内,表明 Gompertz 模型适合作为鹅胸肉的货架期预测模型。

表3 Gompertz模型的函数表达式

Table 3 Functional expressions for the Gompertz model

贮藏温度/℃	函数表达式
4	$A(t) = 0.4 + 4.10 \cdot \exp\{-\exp[0.57 \cdot (3.12 - t) / 4.10 + 1]\}$
15	$A(t) = 0.4 + 7.07 \cdot \exp\{-\exp[0.87 \cdot (0.83 - t) / 7.07 + 1]\}$
25	$A(t) = 0.4 + 7.96 \cdot \exp\{-\exp[1.40 \cdot (2.28 - t) / 7.96 + 1]\}$

表4 Gompertz模型的拟合参数和评价参数

Table 4 Fitting parameters and evaluation parameters of the Gompertz model

温度/℃	$\mu_{max} / [\lg \text{CFU}/(\text{g} \cdot \text{d})]$	λ/d	R^2	RMSE	A_f	B_f
4	0.21	3.12	0.98	0.19	1.13	1.08
15	0.32	0.83	0.99	0.20	1.08	1.05
25	0.52	2.28	0.97	0.16	1.11	1.05

2.2.2 二级模型的拟合与验证

分别将菌落在恒温下的数据与贮藏时间代入

(2)式中,利用 Origin 2021 对不同温度下贮藏鹅肉产生的总菌落数和一级方程进行拟合,可以得到的如下表所示的方程和回归系数 R^2 以及变化速率常数 k 值,由表可知其以及方程的回归系数。

表5 不同贮藏温度下鹅胸肉品质变化的动力学参数

Table 5 Kinetic parameters of goose meat quality change at different storage temperatures

贮藏温度/K	动力学方程	R^2
277.15	$y = 2.51 \exp(0.2534t)$	0.95
288.15	$y = 2.51 \exp(0.4155t)$	0.84
298.15	$y = 2.51 \exp(0.5131t)$	0.93

由表5所示,在 277.15、288.15、298.15 K 温度条件下,变化速率常数 k 分别为 0.25、0.42、0.51。将数据应用于 Arrhenius 模型,以 $\ln k$ 为纵坐标, $1/T$ 为横坐标作图,得到鹅肉菌落总数变化的 Arrhenius 曲线。

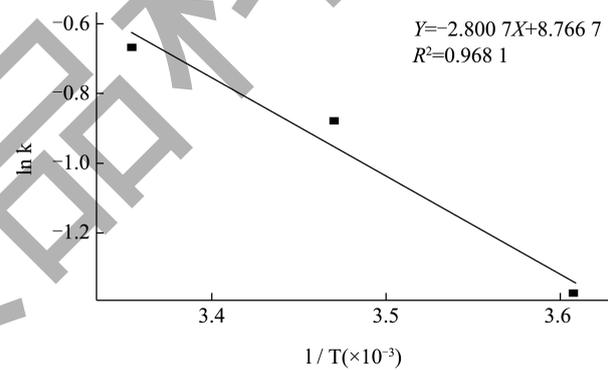


图6 鹅肉菌落总数变化的 Arrhenius 曲线

Fig.6 Arrhenius curve of total number of goose meat colonies

如图6所示肉样菌落总数变化的 Arrhenius 曲线的拟合方程为 $Y = -2.80X + 8.77$, 回归系数 $R^2 = 0.97$, 拟合度较好。将该方程代入公式(4)即可求得活化能 $E_a = 2.91 \times 10^4 \text{ J/mol}$, 频率因子 $k_0 = 7.70 \times 10^4 \text{ J/mol}$ 。再将 E_a 、 k_0 代入公式(3)可得不同温度下变化速率 k 的值。

$$k = 7.70 \times 10^4 \times e^{\frac{-2.91 \times 10^4}{8.314 \times T}} \quad (10)$$

式中:

k ——即烧鹅胸肉品质指标变化的速率常数;

e ——自然常数。

根据公式(5)即可计算出鹅肉在一定温度条件下的货架期。由于熟肉肉制品中菌落总数限定为 10^4 CFU/g , 因此在进行烧鹅胸肉货架期预测时,将菌落总数 10^4 CFU/g 作为货架期终点的菌落总数进行预测分析。

表 6 Arrhenius曲线模型的验证

Table 6 Validation of the Arrhenius curve model

贮藏温度/℃	k 值	预测 SL/d	实际 SL/d	相对误差/%
4	0.25	32	27	18.52
15	0.41	16	12	33.00
25	0.62	11	9	22.00

由表 6 可知,肉样在 4、15、25 °C 下的货架期预测值分别为 32、16、11 d,实际值分别为 27、12、9 d,预测值与实测值之间的相对误差均大于 10%,准确度较低,因此选择 Gompertz 模型用于鹅肉在 4~25 °C 下的货架期预测。

3 结论

随着贮藏时间的增加即食烧鹅胸肉的 pH 值、硬度、弹性均呈现下降趋势,而 TBARS 值、TVB-N 值和菌落总数均呈现上升趋势,且随着贮藏温度的升高变化更加明显;其中质构特性中的弹性和内聚性随贮藏时间的变化不显著;-18、4、25 °C 贮藏的肉样分别在第 2、4、5 周达到感官不可接受的程度。以上述数据为基础分析不同贮藏温度(4、15、25 °C)条件下品质指标变化及其相关性,最终选择菌落总数作为关键因子,并结合具有较高相关回归性($R^2 > 0.97$)的经过修正的 Gompertz 模型对鹅肉货架期模型进行预测,且用菌落总数构建的 Gompertz 模型的预测值得准确度和精确度均在可接受范围内,在(4、15、25 °C)下的预测货架期分别为(25、12、9 d)。

参考文献

- [1] 钱爱萍,颜孙安,林香信,等.家禽肉中氨基酸组成及营养评价[J].中国农学通报,2010,26(13):94-97.
- [2] 陈实兴.灵芝水神仙鹅——记地理标志保护产品溪芝鹅[J].标准生活,2012,12:42-47.
- [3] 徐为民,诸永志,王道营,等.我国鸭鹅产品深加工新技术[J].中国家禽,2007,10:4-7.
- [4] 罗焱,钟世荣,袁玉梅,等.自贡冷吃肉制品研究现状与存在问题解析[J].中国调味品,2021,46(5):185-188.
- [5] MERCOGLIANO R, DE FELICE A, CORTESI M L, et al. Biogenic amines profile in processed bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) products [J]. CyTA-Journal of Food, 2013, 11(2): 101-107.
- [6] HOLMAN B W B, KERRY J P, HOPKINS D L. A review of patents for the smart packaging of meat and muscle-

based food products [J]. Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture, 2018, 9(1): 3-13.

- [7] BEKHIT A E D A, HOLMAN B W B, GITERU S G, et al. Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 280-302.
- [8] ENGLISH M M, SCROSATI P M, AQUINO A J, et al. Novel carbohydrate blend enhances chemical and sensory properties of lobster (*Homarus americanus*) after one-year frozen storage [J]. Food Research International, 2020, 137: 109697.
- [9] SALIH A M, SMITH D M, PRICE J F, et al. Modified extraction 2-thiobarbituric acid method for measuring lipid oxidation in poultry [J]. Poultry Science, 1987, 66(9): 1483-1488.
- [10] 余江泳. 调理滩羊肉丸贮藏品质变化规律研究[D].银川: 宁夏大学,2020.
- [11] ZWIETERING M H, JONGENBURGER I, ROMBOUTS F M, et al. Modeling of the bacterial growth curve [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56(6): 1875-1881.
- [12] YAO L, LUO Y, SUN Y, et al. Establishment of kinetic models based on electrical conductivity and freshness indicators for the forecasting of crucian carp (*Carassius carassius*) freshness [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(2): 147-151.
- [13] SONG Y, HU Q, WU Y, et al. Storage time assessment and shelf-life prediction models for postharvest *Agaricus bisporus* [J]. LWT, 2019, 101: 360-365.
- [14] BRUCKNER S, ALBRECHT A, PETERSEN B, et al. A predictive shelf life model as a tool for the improvement of quality management in pork and poultry chains [J]. Food Control, 2013, 29(2): 451-460.
- [15] LONGHI D A, DA SILVA N B, MARTINS W F, et al. Optimal experimental design to model spoilage bacteria growth in vacuum-packaged ham [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 216: 20-26.
- [16] HUANG L. Mathematical modeling and validation of growth of Salmonella Enteritidis and background microorganisms in potato salad-one-step kinetic analysis and model development [J]. Food Control, 2016, 68: 69-76.
- [17] LEE Y J, JUNG B S, KIM K T, et al. Predictive model for the growth kinetics of *Staphylococcus aureus* in raw pork developed using Integrated Pathogen Modeling Program (IPMP) 2013 [J]. Meat Science, 2015, 107: 20-25.
- [18] WEREŃSKA M, OKRUSZEK A, HARAF G, et al. Impact of frozen storage on oxidation changes of some components in goose meat [J]. Poultry Science, 2022, 101(1): 101517.
- [19] 陈崇艳.冷吃鹅肉特定腐败菌的鉴定、微波杀菌及防腐保质研究[D].自贡:四川轻化工大学,2021.
- [20] DAMAZIAK K, STELMASIAK A, MICHALCZUK M, et al.

- Analysis of storage possibility of raw and smoked breast meat of oat-fattened White Koluda® goose based on their quality characteristics [J]. *Poultry Science*, 2016, 95(9): 2186-2197.
- [21] 牛文秀,陈媛媛,秦建鹏,等.二次杀菌方式对红肠在冷藏过程中微生物及理化性质影响的研究[J].*保鲜与加工*, 2022,22(2):36-41.
- [22] WEREŃSKA M, OKRUSZEK A, HARAF G, et al. Impact of frozen storage on oxidation changes of some components in goose meat [J]. *Poultry Science*, 2022, 101(1): 101517.
- [23] ESMAEILI H, CHERAGHI N, KHANJARI A, et al. Incorporation of nanoencapsulated garlic essential oil into edible films: A novel approach for extending shelf life of vacuum-packed sausages [J]. *Meat Science*, 2020, 166: 108135.
- [24] ORKUSZ A, HARAF G, OKRUSZEK A, et al. Lipid oxidation and color changes of goose meat stored under vacuum and modified atmosphere conditions [J]. *Poultry Science*, 2017, 96(3): 731-737.
- [25] NEMATI Z, ALIREZALU K, BESHARATI M, et al. The effect of dietary supplementation with inorganic or organic selenium on the nutritional quality and shelf life of goose meat and liver [J]. *Animals*, 2021, 11(2): 261.
- [26] 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.