

# 冷链条件下气调包装酱卤鸭肉制品货架期预测模型的建立

刘浩越, 吴 婷, 徐晓云\*

(华中农业大学食品科学与技术学院, 武汉 430070)

**摘要: 目的** 以气调包装酱卤鸭肉制品为研究对象, 在冷链温度范围内建立一套准确、高效的货架期预测模型。**方法** 利用选择性培养基测定不同温度下的产品各微生物数量, 确定(4~25) °C条件下产品优势腐败菌。对乳酸菌数量与感官评定值进行了回归分析确定最小腐败量  $N_s$ 。分别采用修正的 Gompertz 方程和平方根方程建立一、二级模型, 并通过预测值与实测值对比验证模型的可靠性。**结果** 确定了(4~25) °C条件下产品优势腐败菌为乳酸菌, 最小腐败量  $N_s=6.14 \lg(\text{CFU/g})$ 。一、二级模型拟合度均良好, 3种温度下模型预测值与实际值间的差异均在30%左右, 波动幅度在10%以内。**结论** 本研究实现了对(4~25) °C内任何时间点产品剩余货架期的预测, 为冷链条件下气调包装酱卤鸭肉制品品质的变化提供了理论指导。

**关键词:** 气调包装; 酱卤鸭肉制品; 优势腐败菌; 货架期预测模型

## Establishment of shelf-life prediction model of modified-atmosphere packaged pot-stewed duck product in cold chain conditions

LIU Hao-Yue, WU Ting, XU Xiao-Yun\*

(College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a set of accurate and efficient shelf-life prediction models within the temperature range of the cold chain with modified-atmosphere packaged braised duck products with sauce as the research object. **Methods** The selective medium was used to determine the number of microorganisms in the product at different temperatures and the dominant spoilage bacteria of the product at (4–25) °C was determined. Regression analysis was performed on the number of lactic acid bacteria and sensory evaluation values to determine the minimum amount of spoilage  $N_s$ . The modified Gompertz equation and square root equation were respectively used to build the primary and the secondary models, and the reliability of the models was verified by comparing the predicted value with the measured value. **Results** The dominant spoilage bacteria of the product was lactic acid bacteria under the condition of (4–25) °C, and the minimum spoilage amount  $N_s$  was 6.14 lg(CFU/g). The fitting degrees of the primary and secondary models were good, the difference between the predicted value and the actual value at the 3 types of temperatures was about 30%, and the fluctuation range was within 10%. **Conclusion** This study has achieved the prediction of the remaining shelf-life of the product at any point in time between 4 and 25 °C, and provided theoretical guidance for the changes in the quality of stewed duck products with modified-atmosphere packaging under cold chain conditions.

\*通信作者: 徐晓云, 教授, 主要研究方向为植物性农产品深加工和综合利用。E-mail: xuxiaoyun@mail.hzau.edu.cn

\*Corresponding author: XU Xiao-Yun, Professor, Huazhong Agricultural University, No.1, Shizishan Road, Hongshan District, Wuhan 430070, China. E-mail: xuxiaoyun@mail.hzau.edu.cn

**KEY WORDS:** modified-atmosphere packaging; pot-stewed duck product; dominant spoilage bacteria; shelf-life prediction model

## 0 引言

酱卤鸭肉制品属于传统酱卤肉制品的一类,其富含人体所需氨基酸、脂肪酸,且具有高蛋白、低脂肪、低胆固醇等特点,深受广大消费者喜爱。目前市面上酱卤鸭肉制品销售方式主要分为常温真空包装、冷链散装和冷链气调包装,其中气调包装一般选用气体通过性较差的材料,通过向包装中通入保护气体来降低包装内部的微生物活性、延缓化学反应从而延长食品货架期<sup>[1]</sup>。早在20世纪70年代,欧美地区便开始研究CO<sub>2</sub>对肉制品的保鲜作用<sup>[2]</sup>。目前市面上的气调包装所使用的气体主要为CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>和N<sub>2</sub><sup>[3]</sup>,不仅能很好地维持鸭肉的营养成分和感官品质,而且基本隔绝了产品在运输和销售过程中与环境中氧气和微生物接触的途径,起到了“锁鲜”和延长产品货架期的作用,相较于真空包装和散装有着非常明显的优势。而在实际冷链过程中,常出现温度不稳定或冷链中断现象,导致产品品质下降或货架期缩短,从而造成巨大损耗甚至引发食品安全问题。采用传统微生物培养法预测产品货架期,往往无法应对冷链过程中温度的波动,预测结果与实际值存在较大误差,且无法实时监控产品在流通过程中的剩余货架期,存在“后知后觉”的缺陷<sup>[4]</sup>。

目前,食品微生物预测模型已广泛应用于食品货架期的预测和安全评估<sup>[5-6]</sup>,但有关气调包装酱卤鸭肉制品货架期预测模型的研究鲜有报道。本研究针对冷链过程中可能出现的温度波动和极端条件[(10~25) °C]对产品货架期的影响,在(4~25) °C条件下建立了一套能准确、高效地预测冷链条件下气调包装酱卤鸭肉制品货架期的预测模型,旨在改善传统货架期预测方法的诸多不足,提高气调包装酱卤鸭肉制品的食用安全性,以期帮助企业解决货架期安全性等相关问题。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品与主要试剂

气调包装酱卤鸭翅(购自湖北某酱卤食品企业,为净含量约250 g/盒独立包装,包装中气体成分为100% N<sub>2</sub>);平板计数琼脂(plate count agar, PCA)、乳酸细菌培养基(man rogosa sharpe medium, MRS medium)、结晶紫中性红胆盐琼脂(violet red bile agar, VRBA)(北京陆桥技术股份有限公司);甘露醇氯化钠琼脂(mannitol salt agar, MSA)、假单胞菌集落形成细胞选择性培养基(*Pseudomonas* colony-forming cells selective medium, CFC)、STAA培养基(streptomycin-thallos acetate-actidione medium, STAA

medium)、1%亚碲酸钾溶液(*V:V*)、STAA 琼脂添加剂、假单胞菌 CFC 选择性培养基添加剂(青岛海博生物技术有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

SPX-150BIII生化培养箱(天津市意博高科实验仪器厂); DHP-9082 电热恒温培养箱(上海一恒科学仪器有限公司); SW-CJ-2D 双人净化工作台(浙江苏净净化设备有限公司); HBM-400 拍打式均质机(天津市恒奥科技发展有限公司); GI54DP 立式自动压力蒸汽灭菌器(致微仪器有限公司); CP1502 电子分析天平(奥豪斯仪器有限公司)。

### 1.3 样品处理与检测方法

#### 1.3.1 样品的采集与处理

取当天同批次生产的气调包装酱卤鸭翅,分别运送至不同温度的恒温恒湿培养箱中进行贮藏。由于气调包装酱卤鸭肉制品属于低温肉,其贮藏、运输、销售过程必须全程保持在冷链[(4~10) °C]条件下,考虑到冷链中断情况下温度常会超过10 °C,在15 °C上下波动,而又难以达到室温25 °C,因此本研究在(4~25) °C范围内设置5个贮藏温度。根据不同温度下样品中微生物生长速率的差异性分别设置不同的取样时间点,如表1所示。每个取样点做3次重复实验,每次测定随机取3组平行样品。

表1 各温度下样品取样时间点  
Table 1 Sampling time points of each temperature

温度/°C	取样时间/d
4	0、3、6、9、12、15、18
10	0、2、4、6、8、10
15	0、1、2、3、4、5、6、7
20	0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5
25	0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5

#### 1.3.2 微生物的计数

微生物数量监测包括菌落总数、乳酸菌、微球菌、假单胞菌、肠杆菌科、热杀索丝菌、霉菌和酵母,不同种类的微生物所采用的培养基及培养条件如表2所示。所有微生物检测操作严格遵循GB 4789.1—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 总则》,其中菌落总数、乳酸菌、霉菌和酵母的测定分别按GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》、GB 4789.35—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》、GB 4789.15—2016《食品安全国家标准 食品

微生物学检验《霉菌和酵母计数》中测定方法进行的操作; 微生物、假单胞菌、肠杆菌科和热杀索丝菌的测定参照 GB 4789.2—2016 中的操作方法。

表 2 各选择性培养基及培养条件  
Table 2 Selective media and culture conditions

培养基	微生物	培养温度/°C	培养时间/h
PCA	菌落总数	37	48
MRS	乳酸菌	37	48
MSA	微球菌	37	48
CFC	假单胞菌	30	48
VRBA	肠杆菌科	37	24~48
STAA	热杀索丝菌	30	48
孟加拉红	霉菌、酵母	30	120

### 1.3.3 感官值的评定

评定小组由 9 名长期从事酱卤鸭肉制品感官评定相关工作的人员组成, 从色泽、组织形态和气味 3 个方面对产品进行感官评定。采用 9 分制, 9 分为最好, 5 分为感官可接受的最低值, 打分分值精确至小数点后一位, 取平均值作为最终感官评定值<sup>[7]</sup>。表 3 为感官评定标准表。

### 1.4 模型的验证

另取一批同批次生产的气调包装酱卤鸭肉制品分别置于 4、15、25 °C 恒温条件下贮藏, 对该批次产品中乳酸菌数量进行微生物计数, 分析比较实测值和预测值。采用准确因子  $A_f$  和偏差因子  $B_f$  对所建模型的有效性进行验证<sup>[8]</sup>, 其计算公式为式(1):

$$A_f = 10^{[\sum(N_{\text{预测}} - N_{\text{实测}})]/n}, B_f = 10^{[\sum(N_{\text{预测}} - N_{\text{实测}})]/n} \quad (1)$$

其中:  $N_{\text{实测}}$ : 实验实际所得值, lg(CFU/g);  $N_{\text{预测}}$ : 预测模型预测值, lg(CFU/g);  $n$ : 实验次数。

### 1.5 数据统计与分析

菌落数以 lg(CFU/g) 形式进行分析, 利用 SPSS 25.0 软件对数据进行方差分析、差异性显著分析, 对微生物数量、感官评定值和理化指标相关性分析, 利用 Origin 2019 软件对数据进行拟合与曲线绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 气调包装酱卤鸭肉制品优势腐败菌的确定

微生物数量是评价食品腐败程度的重要指标, 本研究通过多种选择性培养基对产品中不同的微生物进行计数, 为优势腐败菌(specific spoilage organisms, SSO)的确定提供数据基础。测定了 4、15 和 25 °C 3 种温度下产品中各微生物数量的变化情况。如图 1~3 所示, 3 种温度条件下热杀索丝菌均未检出, 各温度条件下微生物数量随着贮藏时间的增加总体呈上升趋势, 第 0 d 均只有菌落总数和乳酸菌检出, 其他时间点乳酸菌相较于其他微生物数量也均处于绝对优势地位, 可以判定乳酸菌为 (4~25) °C 条件下气调包装(气体成分为 100% N<sub>2</sub>) 酱卤鸭肉制品的主要初始菌和优势腐败菌。4 °C 相较于其他 2 个温度, 菌群结构明显单一, 除乳酸菌外仅有少量微生物被检出, 贮藏至第 15 d 微球菌、葡萄球菌、假单胞菌和肠杆菌科的数量均小于 10<sup>3</sup> CFU/g, 霉菌、酵母检出数量也仅为 7.5 × 10<sup>3</sup> CFU/g, 因此未在图中展示。METAXOPOULOS 等<sup>[9]</sup>研究发现, 4 °C 条件下真空包装和气调包装(气体成分为 80% CO<sub>2</sub>+20% N<sub>2</sub>) 熟肉制品的优势腐败菌均为乳酸菌; 谢萍<sup>[10]</sup>以散装酱卤鸭肉制品为研究对象, 发现乳酸菌为 25 °C 条件下产品的优势腐败菌。乳酸菌属于革兰氏阳性菌, 适合在无氧或含氧量较低的环境下生长, 且对糖类物质的分解能力较强。而气调包装酱卤鸭肉制品中的酱汁含糖量丰富, 且内部环境非常适合乳酸菌的生长繁殖。因此将乳酸菌作为气调包装酱卤鸭肉制品优势腐败菌是符合理论依据的。

表 3 感官评分表  
Table 3 Sensory rating scale

感官特征	感官评分				
	1	3	5	7	9
色泽	颜色呈暗黑色, 无光泽, 无酱色	颜色较暗, 光泽较差, 无酱色	颜色略暗, 光泽, 酱色不明显	色泽较好, 有较明显酱色	具有产品典型的色泽, 酱色明显
组织形态	肉质松软, 表面严重皱缩、发粘, 油珠渗出明显	肉质松软, 表面皱缩, 有油珠渗出	肉质不够紧实, 表面略皱缩, 无出油	肉质较紧实, 无皱缩、出油等现象	肉质紧实有弹性, 组织形态好
气味	有严重异味	有轻微酸败气味	酱香味较淡, 无异味	气味较好, 有较明显的酱香味	具有产品典型的浓郁酱香气味

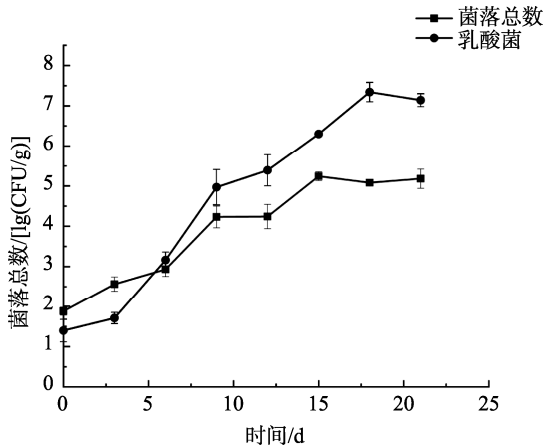


图1 4 °C下气调包装酱卤鸭肉制品微生物数量变化( $n=3$ )

Fig.1 Changes of microbial quantity of pot-stewed duck product in modified-atmosphere packaged at 4 °C ( $n=3$ )

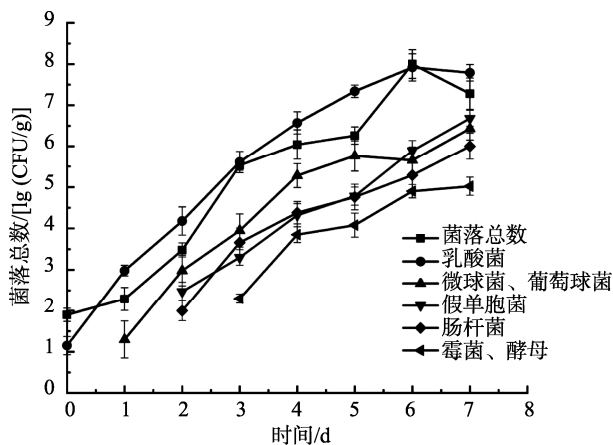


图2 15 °C下气调包装酱卤鸭肉制品微生物数量变化( $n=3$ )

Fig.2 Changes of microbial quantity of pot-stewed duck product in modified-atmosphere packaged at 15 °C ( $n=3$ )

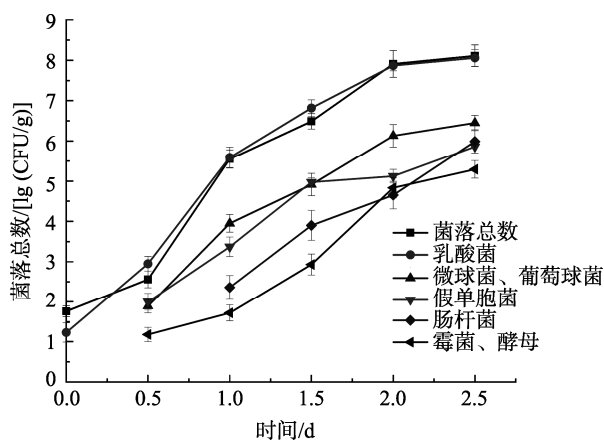


图3 25 °C下气调包装酱卤鸭肉制品微生物数量变化( $n=3$ )

Fig.3 Changes of microbial quantity of pot-stewed duck product in modified-atmosphere packaged at 25 °C ( $n=3$ )

## 2.2 感官评定值的变化

气调包装酱卤鸭肉制品在实际冷链过程中, 冷链的间歇性中断一般导致温度在 15 °C 上下波动, 因此选择 15 °C 作为典型劣变条件进行探究<sup>[11]</sup>。通过对比发现贮藏过程中感官品质下降的主要表现为: 色泽变暗; 组织形态变得松软、发粘, 伴有油珠渗出; 酱香味变淡, 出现异味。随着贮藏时间的增加, 感官评定值总体上呈极显著下降 ( $P<0.01$ ), 其中第 3 d 至第 4 d 降幅最大, 得分从 6.56 降至 4.75。第 4 d 后产品已达到感官拒绝水平, 这说明 15 °C 下产品的货架期低于 4 d。

## 2.3 最小腐败量的确定

对 15 °C 恒温贮藏条件下的产品感官评定值和乳酸菌数量 [lg(CFU/g)] 进行线性回归分析, 所得回归方程为:  $Y=-0.90318X+10.54377$  ( $r^2=0.93334$ ,  $P<0.01$ )。以上数据表明, 感官评定值和乳酸菌数量呈良好的线性关系。根据回归方程, 可以计算出当产品达到感官拒绝水平(即感官评定值为 5)时乳酸菌数量为 6.14 lg(CFU/g), 即  $N_s=6.14$  lg(CFU/g)。谢萍<sup>[10]</sup>研究发现 25 °C 条件下散装酱卤鸭肉制品中乳酸菌数量为 6.71 lg(CFU/g) 时达到感官拒绝水平, 和本研究结果相符。

## 2.4 一级预测模型的建立和评价

Gompertz 模型最早被 GIBSON 等<sup>[12]</sup>应用于预测食品微生物, 后经 ZWIETERING 等<sup>[13]</sup>改进得到修正的 Gompertz 方程。修正的 Gompertz 方程最早被应用于描述植物乳杆菌的数量与时间的关系, 经过研究后发现修正的 Gompertz 模型简单有效, 能准确地描述微生物的生长动态, 已被广泛应用于食品预测微生物学领域<sup>[13-14]</sup>。本研究采用修正的 Gompertz 方程, 分别对 4、10、15、20 和 25 °C 贮藏条件下的酱卤鸭肉制品乳酸菌生长量进行拟合, 建立各温度下乳酸菌生长动力学模型。图 4 为各温度下气调包装酱卤鸭肉制品乳酸菌数量拟合曲线。修正的 Gompertz 方程函数为:  $N(t) = N_0 + (N_{\max} - N_0) \times \exp\{-\exp[(\mu_{\max} \times 2.718 / (N_{\max} - N_0)) \times (\lambda - t) + 1]\}$ 。其中各参数符号具体含义及拟合得出的不同温度下乳酸菌各生长动力学参数值见表 4。

从图 4 和表 4 可以看出, 采用修正的 Gompertz 方程对各温度下乳酸菌数量进行拟合, 拟合曲线呈典型的“S”型生长曲线, 且残差平方和(residual sum of squares, RSS) 较低, 决定系数  $R^2$  较高(均大于 0.97), 由此可得拟合度较好。从 4 °C~25 °C, 最大比生长速率  $\mu_{\max}$  由 0.0204 升高至 0.2150, 而延滞时间  $\lambda$  则由 48.6213 h 降至 2.4571 h, 说明温度对两者均有较大影响。赵国娇等<sup>[15]</sup>研究发现温度对散装卤制鸭翅尖中乳酸菌最大比生长速率影响较大, 而对延滞时间影响稍小, 说明在相同温度下, 包装方式的差别会对产品中优势腐败菌生长动力学参数造成一定的影响。

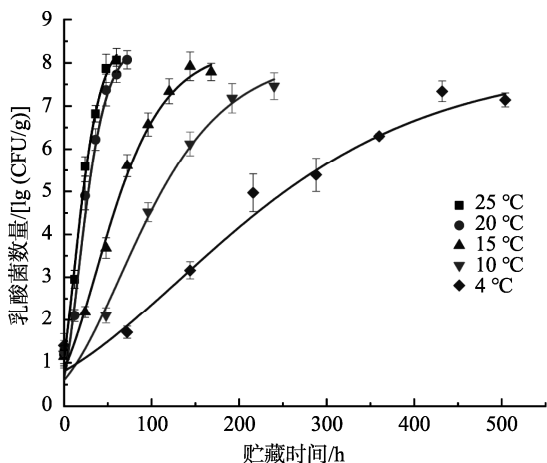


图4 修正的 Gompertz 模型对 5 种温度下产品中乳酸菌数量的拟合  
Fig.4 Fitting of the modified Gompertz model to the number of lactic acid bacteria in the product at 5 kinds of temperatures

### 2.5 二级预测模型的建立和评价

二级模型旨在表征一级模型的动力学参数与环境因子(如温度、水分活度、pH 等)之间的函数关系。平方根模型能较好地描述温度与微生物生长动力学参数之间的关系,是目前接受度较高的一种模型<sup>[16-17]</sup>。由于产品均取自同一生产线,原料和加工工艺均较稳定,  $N_0$  基本在一个固定的范围。而在特定产品中,当优势腐败菌数量达到稳定时,  $N_{max}$  也处于一个固定范围。因此产品中乳酸菌  $N_0$  和  $N_{max}$  的确定采用不同温度下  $N_0$  和  $N_{max}$  的平均值。在一级预测模型的基础上,采用平方根模型来描述温度对于酱卤鸭肉制品中乳酸菌  $\mu_{max}$ 、 $\lambda$  进行描述,该方程函数为:  
 $\sqrt{\mu_{max}} = b_{\mu} \times (T - T_{min})$ ;  $\sqrt{1/\lambda} = b_{\lambda} \times (T - T_{min})$  <sup>[18-19]</sup>。

拟合方程分别为:  $\mu_{max}^{1/2} = 0.01667T + 0.06528$  ( $r^2 = 0.93895$ ),  $(1/\lambda)^{1/2} = 0.02286T - 0.00831$  ( $r^2 = 0.90157$ ), 根据方程即可实现预测 (4~25) °C 内任何温度下气调包装酱卤鸭肉制品中乳酸菌的  $\mu_{max}$  和  $\lambda$ 。谢萍<sup>[10]</sup>、赵国娇等<sup>[15]</sup>、梁蓉蓉<sup>[20]</sup>所建立的二级模型判定系数均在 0.90~0.95 范围内,这说明二级预测模型

是在一级预测模型基础上的二次拟合,相较于一级模型拟合度难免会有所降低。本研究所建立的二级模型判定系数均大于 0.9, 在可接受范围内。

### 2.6 气调包装酱卤鸭肉制品货架期的预测

在 2.5 中已经确定了气调包装酱卤鸭肉制品中乳酸菌  $N_s = 6.14 \text{ lg(CFU/g)}$ , 各温度下的  $N_{max}$  取平均值为  $7.93 \text{ lg(CFU/g)}$ , 将其代入货架期预测模型得:

$$SL = \lambda - [(7.93 - N_0) / (\mu_{max} \times 2.718)] \times \{\ln\{-\ln[(6.14 - N_0) / (7.93 - N_0)]\} - 1\}$$

在二级预测模型的基础上可以预测(4~25) °C 内任何温度下气调包装酱卤鸭肉制品中乳酸菌的  $\mu_{max}$  和  $\lambda$ , 因此只需监测(4~25) °C 内任意温度下产品中乳酸菌的含量  $N_0$ , 代入货架期预测模型中就能立即计算出该产品的剩余货架期。

### 2.7 模型的验证

表 5 为气调包装酱卤鸭肉制品在 4、15 和 25 °C 贮藏条件下乳酸菌实际值与预测值, 表 6 为气调包装酱卤鸭肉制品在 4、15 和 25 °C 贮藏条件下乳酸菌数量预测值的准确度和偏差度。从表 6 可以看出, 3 种温度下产品中乳酸菌的准确度  $A_f$  基本维持在 1.3 左右, 而偏差度  $B_f$  则维持在 1%±10% 以内。谢萍<sup>[10]</sup>、梁蓉蓉<sup>[20]</sup>先后建立了散装酱卤鸭肉、骨肉相连货架期预测模型, 模型验证结果显示准确度  $A_f$  分别在 1.5 和 1.2 左右, 偏差度  $B_f$  也均在 1%±10% 以内。说明本研究所建立的微生物预测模型的准确性在可接受范围内, 3 种温度下模型预测值与实际值间的差异均在 30% 左右, 波动幅度在 10% 以内, 但还需通过获取更丰富的数据进一步优化和完善。

## 3 结论

本研究测定了 3 种温度下产品各微生物数量, 确定了 (4~25) °C 气调包装(气体成分为 100%  $N_2$ )酱卤鸭肉制品的优势腐败菌为乳酸菌, 确定了  $N_s$  值为  $6.14 \text{ lg(CFU/g)}$ 。修正的

表 4 不同温度下乳酸菌生长动力学参数  
Table 4 Growth kinetic parameters of lactic acid bacteria at different temperatures

温度/°C	$N_0$ /[lg(CFU/g)]	$N_{max}$ /[lg(CFU/g)]	$\mu_{max}$ /h <sup>-1</sup>	$\lambda$ /h	RSS	$R^2$
25	0.9489	8.2659	0.2150	2.4571	0.0380	0.9951
20	1.0572	8.0467	0.2045	6.4656	0.0609	0.9921
15	1.0215	8.1214	0.0764	11.5525	0.0255	0.9963
10	1.1465	7.6850	0.0505	30.4263	0.0134	0.9981
4	1.2053	7.5426	0.0204	48.6213	0.1258	0.9770

注:  $N(t)$ : 优势腐败菌在  $t$  时刻的菌落数, lg(CFU/g);  $N_0$ : 初始菌落数, lg(CFU/g);  $N_{max}$ : 最大菌落数, lg(CFU/g);  $\mu_{max}$ : 最大比生长速率, h<sup>-1</sup>;  $\lambda$ : 延滞时间, h;  $t$ : 时间, h。

表 5 各温度下不同时间乳酸菌实际值与预测值  
Table 5 Actual and predicted values of lactic acid bacteria at different times at different temperatures

时间/h	72	144	216	288	360	
4 °C	预测值/[lg(CFU/g)]	1.8978	3.1575	4.5931	5.7473	6.5137
	实际值/[lg(CFU/g)]	1.9085	3.2625	4.6955	5.5441	6.3444
	残差	-0.0107	-0.1051	-0.1024	0.2032	0.1693
15 °C	时间/h	24	48	72	96	120
	预测值/[lg(CFU/g)]	2.0955	3.8052	5.4849	6.6620	7.8211
	实际值/[lg(CFU/g)]	2.0482	4.0792	5.5798	6.5682	7.7771
	残差	0.0473	-0.2740	-0.0949	0.0938	0.0440
25 °C	时间/h	12	24	36	48	60
	预测值/[lg(CFU/g)]	3.0072	5.4475	7.0206	7.7606	8.0678
	实际值/[lg(CFU/g)]	2.9494	5.5911	6.8235	7.8751	8.0569
	残差	0.0578	-0.1436	0.1971	-0.1145	0.0109

表 6 3 种温度下一级模型  $A_f$  和  $B_f$   
Table 6  $A_f$  and  $B_f$  of the primary model at 3 kinds of temperatures

贮藏温度/°C	实验次数 $n$	准确度 $A_f$	偏差度 $B_f$
4	5	1.31	1.07
15	5	1.29	0.92
25	5	1.27	1.00

Gompertz 方程对(4~25) °C内 5 种温度下气调包装酱卤鸭肉制品中乳酸菌的生长曲线拟合程度均较好。采用平方根方程描述了温度对最大比生长速率  $\mu_{\max}$  和延滞时间  $\lambda$  的影响,实现了对(4~25) °C范围内任何温度下最大比生长速率  $\mu_{\max}$  和延滞时间  $\lambda$  的预测。所建立的货架期预测模型可靠性在可接受范围内。总体来说,本研究为气调包装酱卤肉制品的品质变化提供了理论指导,并对其他食品货架期预测模型的建立具有借鉴意义。本研究主要针对的是气调包装酱卤鸭肉制品中优势腐败菌的生长量,而实际上导致食品腐败的因素往往不止一种,这就导致了预测模型的准确性受到一定程度的影响。如何综合食品基质中的各种腐败因素,开发出综合性更强、准确性更高的预测模型,是未来该领域的突破口。

#### 参考文献

- [1] ROSSAINT S, KLAUSMANN S, KREYENSCHMIDT J. Effect of high-oxygen and oxygen-free modified atmosphere packaging on the spoilage process of poultry breast fillets [J]. Poul Sci, 2015, 94(1): 96-103.
- [2] ALI S, ZHANG W, RAJPUT N, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of chicken breast meat [J]. Food Chem, 2015, 173: 808-814.

- [3] SANDHYA. Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs [J]. LWT-Food Sci Technol, 2010, 43(3): 381-392.
- [4] 陈东杰. 气调包装对冷却猪肉菌相影响与货架期预测模型[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.  
CHEN DJ. Effect of different packaging on the dominant spoilage bacteria and shelf-life prediction model of chilled meat [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017.
- [5] 逢海英. 不同温度下鸡肉中沙门氏菌的生长与次氯酸钠杀菌的微生物预测模型[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
PANG HY. Predictive models for the growth and sodium hypochlorite inactivation of *Salmonella* in chicken fillets with different temperatures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [6] 董庆利, 王海梅, PRADEEP KM, 等. 我国食品微生物定量风险评估的研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(11): 221-229.  
DONG QL, WANG HM, PRADEEP KM, et al. Review of progress in quantitative microbiological risk assessment in China [J]. Food Sci, 2015, 36(11): 221-229.
- [7] 郭全友, 王晓晋, 姜朝军. 南美白对虾即食虾仁常温贮藏品质变化与货架期研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 121-126.  
GUO QY, WANG XJ, JIANG CJ. Quality changes and shelf life of ready-to-eat *Penaeus vannamei* stored in ambient temperature [J]. Food Mach, 2018, 34(6): 121-126.
- [8] 王军, 董庆利, 丁甜. 预测微生物模型的评价方法[J]. 食品科学, 2011, 32(21): 268-272.  
WANG J, DONG QL, DING T. An overview of evaluation methods for predictive microbial growth models [J]. Food Sci, 2011, 32(21): 268-272.
- [9] METAXOPOULOS J, MATARAGAS M, DROSINOS E. Microbial interaction in cooked cured meat products under vacuum or modified atmosphere at 4 °C [J]. J Appl Microbiol, 2002, 93(3): 363-373.
- [10] 谢萍. 散装酱卤鸭肉制品微生物多样性与货架期预测模型的研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.  
XIE P. Microbial diversity and shelf-life predictive model of bulk sauced duck products [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [11] 徐晓蓉, 邢家漂, 承海, 等. 马鲛鱼冷链流通过程中感官和鲜度变化的

- 相关性分析[J]. 核农学报, 2019, 33(11): 107–114.
- XU XR, XING JL, CHENG H, *et al.* Correlation analysis of sensory and freshness changes during cold-chain delivery and storage of *Spanish mackerel* [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2019, 33(11): 107–114.
- [12] GIBSON AM, BRATCHELL N, ROBERTS TA. Predicting microbial growth: Growth responses of salmonellae in a laboratory medium as affected by pH, sodium chloride and storage temperature [J]. *Int J Food Microbiol*, 1988, 6(2): 155–178.
- [13] ZWIETERING MH, KOOS J, HASENACK BBE, *et al.* Modeling of bacterial growth as a function of temperature [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1991, 57(4): 1094–1101.
- [14] JUNEJA VK, MELENDRES MV, HUANG L, *et al.* Modeling the effect of temperature on growth of *Salmonella* in chicken [J]. *Food Microbiol*, 2007, 24(4): 328–335.
- [15] 赵国娇, 王宏勋, 宋志强. 散装卤制鸭翅尖中乳酸菌生长预测模型研究[J]. 安徽农业科学, 2013, (3): 322–324.
- ZHAO GJ, WANG HX, SONG ZQ. Study on predictive model for growth of lactic acid bacteria from stewed duck wingtip for bulk [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2013, (3): 322–324.
- [16] 朱泓全, 唐雪姣, 王杨, 等. 卤鸡腿中大肠杆菌生长模型的研究[J]. 中国食物与营养, 2015, 21(1): 9–12.
- ZHU HQ, TANG XJ, WANG Y, *et al.* Study on predictive growth model for *Escherichia coli* in marinated chicken drumsticks [J]. *Food Nutr China*, 2015, 21(1): 9–12.
- [17] 魏钊异, 姚昱锟, 潘洁茹, 等. 巴氏杀菌奶的微生物生长动力学模型研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(8): 235–240.
- WEI ZY, YAO YK, PAN JR, *et al.* Microbial growth kinetics model of pasteurized milk [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(8): 235–240.
- [18] 闫玉雯, 崔跃慧, 朱迎春. 基于特定致腐菌的调理肉饼货架期预测模型构建[J]. 现代食品科技, 2020, 36(1): 133–141.
- YAN YW, CUI YH, ZHU YC. Construction of shelf life prediction model of prepared meat cake based on specific spoilage bacteria [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2020, 36(1): 133–141.
- [19] 彭亚博, 李晓婷, 方婷, 等. 鸡肉中沙门氏菌和背景菌群生长动力学模型[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 7–15.
- PENG YB, LI XT, FANG T, *et al.* Growth kinetic model of *Salmonella* and background flora in chicken [J]. *Food Sci*, 2019, 40(9): 7–15.
- [20] 梁荣蓉. 生鲜鸡肉调理制品菌群结构分析和货架期预测模型的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- LIANG RR. Bacterial community and shelf-life predictive model of freshly prepared chicken products [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2010.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

## 作者简介

刘浩越, 硕士, 主要研究方向为熟卤制品的微生物风险防控。  
E-mail: 380314459@qq.com

徐晓云, 教授, 主要研究方向为植物性农产品深加工和综合利用。  
E-mail: xuxiaoyun@mail.hzau.edu.cn