

真空包装狮子头货架期预测模型的建立

杨欢,刘毅,邵乐乐,戴瑞彤*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院,北京 100083)

摘要:为建立真空包装狮子头货架期预测模型,分析不同温度贮藏期间狮子头中菌落总数的变化情况,分别用线性模型、修正的 Gompertz 模型、修正的 Logistic 模型和 Baranyi 模型对狮子头中菌落总数进行一级模型的拟合,在此基础上使用平方根模型建立二级模型。通过比较各模型的评价参数选择最优模型,并进一步建立货架期预测模型。结果表明在一级模型中,修正的 Gompertz 模型对真空包装狮子头中菌落总数生长曲线的拟合优度最高;基于修正的 Gompertz 模型建立的平方根模型可较好地描述温度对狮子头最大比生长速率和迟滞期的影响。在 4、10、15、20、25 ℃ 条件下贮藏狮子头的货架期分别为 80.79、45.22、10.96、4.96、4.01 d,货架期实测值与预测值的相对误差值均在 10% 以内,表明建立的模型可以较准确地对贮藏在 4~25 ℃ 条件下的狮子头进行货架期预测。

关键词:真空包装狮子头,菌落总数,预测模型,货架期预测

Establishment of Shelf-life Prediction Models for Vacuum-packed Shizitou

YANG Huan, LIU Yi, SHAO Le-le, DAI Rui-tong*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, Chinese Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the shelf-life prediction model of vacuum-packed Shizitou (a traditional Chinese-style meatball), the changes of the total viable counts in Shizitou, stored at different temperatures were investigated. The linear model, modified Gompertz model, Logistic model and Baranyi model were used to establish the primary growth models, the square root equation was used as a secondary model. An optimal model was chosen for the establishment of shelf life prediction model based on the evaluation parameters. The results indicated that the modified Gompertz model worked best to fit the experimental data, and the effect of temperature on the maximum growth rate and lag phase could be well described with the square root model. The predicted shelf-life of Shizitou at 4, 10, 15, 20, 25 ℃ were 80.79, 45.22, 10.96, 4.96, 4.01 d, respectively. The relative deviation between the measured value and the predicted value were within 10%, indicating that the shelf life of Shizitou stored at 4~25 ℃ could be satisfactorily predicted with the modified Gompertz model.

Key words: vacuum-packed Shizitou; total viable counts; predictive model; shelf-life prediction

中图分类号:TS251.6

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2019)19-0266-07

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2019.19.046

引文格式:杨欢,刘毅,邵乐乐,等.真空包装狮子头货架期预测模型的建立[J].食品工业科技,2019,40(19):266-272.

狮子头是淮扬菜系中的传统菜肴,在扬州“三头宴”中最为著名^[1]。传统狮子头通常以猪肉为主料,经过切粒、腌制、成型后熟制而成,属于熟制的肉丸制品,因其具有肥而不腻、软嫩爽口、四季皆宜、加工方式多样等特点,深受消费者喜爱。目前市场上已经出现一些真空包装的狮子头产品,既便携即食,又能够最大程度地保留狮子头原有风味和品质。但狮子头中水分含量较高,为微生物生长繁殖提供了良好条件,不当的贮藏温度极易引起其腐败变质,引发食品安全隐患,危害人体健康^[2]。因此,构建不同贮藏温度下狮子头产品的微生物生长预测模型对预判食品货架期、提高食品的安全稳定性具有重要意义。

预测食品微生物学(predictive food microbiology, PFM)用数学方法描述特定条件下食品中微生物的生长规律,通过建立数学模型,不需要进行传统检测就能快速判断微生物的生长情况,并准确预测产品的货架期^[3]。1993年 Whiting 和 Buchanan 将模型划分为三个等级^[4],一级模型为微生物的生长模型,描述微生物数量与时间之间的函数关系,常见的一级模型为线性模型、修正的 Gompertz 模型、修正的 Logistic 模型以及 Baranyi 模型。二级模型为微生物的生长动力学模型,表达的是环境条件对一级模型中参数的影响,其中平方根模型的使用最为广泛。三级模型是在一级和二级模型基础上建立的应用

收稿日期:2019-01-28

作者简介:杨欢(1995-),女,硕士研究生,研究方向:肉制品加工及贮藏,E-mail:798498992@qq.com。

*通讯作者:戴瑞彤(1966-),女,博士,教授,研究方向:肉品科学与肉品加工技术研究,E-mail:dairuitong@hotmail.com。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项(2016YFD040040302)。

系统。

目前关于微生物预测模型的研究多集中于水产品^[5-7]、生鲜肉^[8-10]以及少数散装熟肉制品^[11-13]等方面,而对于真空包装的中国传统熟肉制品却很少见。对肉制品建立的微生物预测模型大多都是以液体的肉汤培养基作为基质,该方法虽然便于操作,但是液体培养基较为单一,忽略了原料肉成分的复杂性及其对微生物的影响,目前已有较多研究证实由液体培养基中获得的实验数据会高于原料肉中微生物生长的真实情况^[14],进而导致预估的保质期与实际偏差较大。也有学者通过向原料肉中接种特定菌株来构建模型,但该方法接种的通常为一种菌株,而导致食品腐败的微生物并不是单一的,各种微生物之间会互相影响,因此以一种微生物为对象构建生长模型并不能很好地体现原料肉中所有微生物的真实生长状况;此外很多研究表明,在不同贮藏温度下,食品中微生物的种类和数目存在差异,随着贮藏温度的改变,肉制品中优势腐败菌的种类和数量也可能发生变化^[15-19]。因此选择单一菌种作为建模对象不具有代表性,无法推算出食品准确的货架期^[20]。直接从原料肉中获得微生物数据则可以忽略基质和微生物间相互作用带来的影响,使模型更具可信性和准确性。

本研究直接从狮子头原料中获得实验数据,分别用线性模型、修正的 Gompertz 模型、修正的 Logistic 模型以及 Baranyi 模型对 4、10、15、20、25℃ 贮存条件下狮子头中的菌落总数进行一级方程的拟合,采用平方根模型描述温度对微生物生长速率和延滞期的影响,并通过决定系数 R^2 、残差平方和(residual sum of squares, RSS)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、准确因子(accuracy factor, Af)、偏差因子(bias factor, Bf)、赤池信息量准则(kaike information criterion, AIC)以及贝叶斯信息准则(bayesian information criterion, BIC)对模型进行评价和验证,进而选择最优模型,并以此为基础建立真空包装狮子头的货架期预测模型,以期为提高狮子头食用安全性提供有力支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

猪后臀尖肉、猪背膘脂肪、鸡蛋、淀粉、调味料(食盐、酱油、料酒、白砂糖、葱姜等) 北京美廉美超市;铝箔袋、无菌拍打袋、一次性无菌培养皿 北京索莱宝科技有限公司;平板计数琼脂 北京奥博星生物技术有限责任公司;氯化钠 北京化工厂。

EF-12 型电炸锅 Topkitchen 公司;PIB02 型电磁炉 上海奔腾电器有限公司;TP300 笔式探针温度计 武强县华洋仪表厂;HH-W600 数显恒温水箱 金坛市科析仪器有限公司;RS-400 型真空包装机 北京日上科贸公司;LDZH-100L 型立式压力蒸汽灭菌锅 上海申安医疗器械厂;YP6002 型电子天平 上海佑科仪器仪表有限公司;西班牙 IUL Masticator 均质器(拍打式) 上海川翔生物科技有限公司;移液枪 美国 Eppendorf 公司;DHP-9082 型

电热恒温培养箱 上海一恒科技有限公司;YT-CJ-2ND 型超净工作台 北京亚泰科隆仪器技术公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备 狮子头的制作参考侯曼^[21]的方法并做适当修改:将猪后臀尖肉与猪背膘脂肪分别搅成肉糜,按照质量比 6:4 混合后,加入 10% 的蛋液、1.5% 食盐、2% 淀粉、2% 酱油、2% 料酒、1% 葱末、1% 姜末和 10% 的纯净水(以混合后猪肉糜质量为 100, w/w),搅拌均匀,取适量肉馅团成 60 g 左右肉丸,每次将四个肉丸放入 180℃ 油锅中炸 2 min,待其表面呈金黄色后取出。冷却后取 30 个炸制后的肉丸置于装有 3000 g 水的锅(水温 85℃,含 60 g 葱段、60 g 姜片和 30 g 酱油)中煮制。待肉丸中心温度为 72℃ 时捞出,装入无菌包装袋中真空包装,在 85℃ 水浴锅中进行二次杀菌 15 min,冷却后分别置于 4、10、15、20、25℃ 培养箱中贮藏,在设定的取样点取三袋样品进行实验。

1.2.2 菌落总数测定 菌落总数的测定参照 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》方法^[22]。

1.3 模型的拟合

1.3.1 一级模型的拟合 一级模型仅考虑微生物的生长情况,本文对狮子头贮藏期间菌落总数分别采用线性模型、经验模型中的修正 Gompertz 模型和修正 Logistic 模型以及机理模型中 Baranyi 模型进行拟合。

1.3.1.1 线性模型 线性方程的表达式为^[23]:

$$N_t = N_0 + \mu t \quad \text{式(1)}$$

式中: N_t 为 t 时刻时菌数的对数值, $\lg(\text{CFU/g})$; N_0 为随时间无限减小时的渐进对数值,相当于初始菌落, $\lg(\text{CFU/g})$; μ 为微生物的生长速率, d^{-1} ; t 为贮藏时间, d 。

1.3.1.2 修正的 Gompertz 模型 修正的 Gompertz 模型表达式如下^[24-25]:

$$N_t = N_0 + (N_{\max} - N_0) \times \exp\left\{-\exp\left[\frac{2.718 \times \mu_{\max}}{N_{\max} - N_0} \times (\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad \text{式(2)}$$

式中: N_t 为 t 时刻时菌数的对数值, $\lg(\text{CFU/g})$; N_0 为初始菌落数对数值, $\lg(\text{CFU/g})$; $N_{\max}$ 为稳定期的最大菌落数对数值, $\lg(\text{CFU/g})$; $\mu_{\max}$ 为微生物生长的最大比生长速率, d^{-1} ; λ 为微生物生长的迟滞时间, d ; t 为贮藏时间, d 。

1.3.1.3 修正的 Logistic 模型 修正的 Logistic 模型表达式为^[26-27]:

$$N_t = N_0 + \frac{N_{\max} - N_0}{1 + \exp[-u \times (t - M)]} \quad \text{式(3)}$$

式中: N_t 为 t 时刻时菌数的对数值, $\lg(\text{CFU/g})$; N_0 和 $N_{\max}$ 分别为初始菌落数和最大菌落数的对数值, $\lg(\text{CFU/g})$; u 为当 t 为 M 时的最大比生长速率, d^{-1} ; M 为微生物达到最大比生长速率所需要的时间, d ; t 为贮藏时间, d 。

基于上述参数,由如下公式计算最大比生长速

率和迟滞时间:

$$\mu_{\max} = \frac{u \times (N_{\max} - N_0)}{4} \quad \text{式(4)}$$

$$\lambda = M - \frac{u}{2} \quad \text{式(5)}$$

式中: $\mu_{\max}$ 为最大比生长速率, d^{-1} ; λ 为恒温条件下的迟滞时间, d 。

1.3.1.4 Baranyi 模型 Baranyi 方程如下^[28]:

$$N_t = N_0 + \mu_{\max} + \ln \left[\exp(-\mu_{\max} t) + \exp(-\mu_{\max} \lambda) - \exp(-\mu_{\max} - \mu_{\max} \lambda) \right] - \ln \left\{ 1 + \left[\exp(\mu_{\max} \lambda - \mu_{\max} \lambda) - \exp((- \mu_{\max} \lambda)) \right] / \exp(N_{\max} - N_0) \right\} \quad \text{式(6)}$$

式中, N_t 为 t 时刻菌数的对数值, $\lg(\text{CFU/g})$; N_0 和 $N_{\max}$ 分别为初始菌落数和最大菌落数的对数值, $\lg(\text{CFU/g})$; $\mu_{\max}$ 为最大比生长速率, d^{-1} ; λ 为恒温条件下的迟滞时间, d ; t 为贮藏时间, d 。

1.3.2 二级模型的拟合 采用平方根模型描述最大比生长速率和迟滞时间与温度间的线性关系,其公式如下^[29]:

$$1/\lambda = b_{\lambda} \times (T - T_{\min\lambda}) \quad \text{式(7)}$$

$$1/\mu_{\max} = b_{\mu} \times (T - T_{\min\mu}) \quad \text{式(8)}$$

式中: T 为贮藏温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\min\lambda}$ 、 $T_{\min\mu}$ 为微生物生长速度为零时的理论最低温度, $^{\circ}\text{C}$; b_{λ} 、 b_{μ} 为方程的常数。

1.3.3 模型的评价与验证

1.3.3.1 模型的评价 对模型进行评价是模型建立过程中的关键环节,采用决定系数 R^2 、残差平方和(RSS),均方根误差(RMSE)、赤池信息量准则(AIC)以及贝叶斯信息准则(BIC)综合评估模型的拟合能力,各参数表达式如下^[3,27,30]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - m)^2} \quad \text{式(9)}$$

$$\text{RSS} = \sum (O_i - P_i)^2 \quad \text{式(10)}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\text{RSS}}{n}} \quad \text{式(11)}$$

$$\text{AIC} = n \times \ln\left(\frac{\text{RSS}}{n}\right) + 2 \times p \quad \text{式(12)}$$

$$\text{BIC} = n \times \ln\left(\frac{\text{RSS}}{n}\right) + (p + 1) \times \ln(n) \quad \text{式(13)}$$

式中: n 是观测点的数量; O_i 是第 i 个数据点时的实测值; P_i 是第 i 个数据点时的预测值; m 是实测值的平均值; p 是模型自变量的个数。

R^2 越接近于1代表拟合优度越好,通常情况下 R^2 至少为80%才表示拟合的模型可以被接受^[31]。RSS、RMSE、AIC和BIC的值越小也代表模型的拟合性较好。

1.3.3.2 模型的验证 使用准确因子(Af)、偏差因子(Bf)对拟合的一级模型进行验证,验证公式如下^[32]:

$$\text{Bf} = 10^{\frac{\sum \log(N_{\text{测}}/N_{\text{预}})}{n}} \quad \text{式(14)}$$

$$\text{Af} = 10^{\frac{\sum \log |N_{\text{测}}/N_{\text{预}}|}{n}} \quad \text{式(15)}$$

式中: $N_{\text{预测}}$ 是通过拟合模型预测的菌落总数, (CFU/g) ; $N_{\text{实测}}$ 是在相同时间下实际测得的菌落总数, (CFU/g) ; n 为实验次数。

Bf表示实测值与预测值的偏差程度,当 $\text{Bf} > 1$ 表示预测值大于实际值, $\text{Bf} < 1$ 表示模型的预测值低于实际值,其值在0.9~1.05之间时表示模型拟合效果很好,在0.7~0.9和1.06~1.15范围内表示拟合效果可以被接受^[26,33]。Af则反映了预测值与实测值的接近程度,其值在1附近时的拟合效果越好,Af越高则表明模型拟合的准确度较低,通常Af在1.1~1.9范围内可以被接受^[34]。

1.3.4 货架期预测模型的建立与验证 在最优一级模型的基础上,代入初始菌落数($N_{\max}$)和腐败限量值(N_s),计算菌落总数从初始值增加到腐败限量值所需的时间,建立狮子头的货架期预测模型,公式如下:

$$\text{SL} = \lambda - \left(\frac{N_{\max} - N_0}{2.718 \times \mu_{\max}} \right) \times \left\{ \ln \left[-\ln \left(\frac{N_s - N_0}{N_{\max} - N_0} \right) \right] - 1 \right\} \quad \text{式(16)}$$

式中:SL代表狮子头的货架期, d ; λ 为恒温条件下的迟滞时间, d ; N_0 为初始菌落数对数值, $\lg(\text{CFU/g})$; $N_{\max}$ 为不同温度下最大菌落数对数值的平均值, $\lg(\text{CFU/g})$; $\mu_{\max}$ 为最大比生长速率, d^{-1} ; N_s 为达到货架期终点时的菌落总数对数值, $\lg(\text{CFU/g})$ 。

将预测得到的货架期与实际货架期进行比较,计算相对误差值来验证货架期模型的准确性。

$$\text{相对误差值}(\%) = \frac{\text{预测值} - \text{实测值}}{\text{实测值}} \times 100 \quad \text{式(17)}$$

1.3.5 数据处理 利用Microsoft Excel 2007软件整理并计算实验数据,不同温度贮藏组实验重复三次,图表中数据为平均值 $\pm$ 标准偏差。单因素方差分析采用SPSS 19.0(IBM, USA), $P < 0.05$ 表示数据差异具有显著性。采用OriginPro 8.5.0软件(OriginLab, Northampton, Massachusetts, USA)拟合微生物生长曲线。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度下真空包装狮子头微生物生长曲线

菌落总数的生长曲线通常包含迟滞期、对数期和稳定期,随着时间的延长大致呈现“S”型,不同贮藏温度下,菌落总数生长曲线差异明显。如图1所示,贮藏初期狮子头中菌落总数数值较低,可能油炸、煮制和灭菌等工艺杀灭了大部分的微生物。在贮藏过程中,4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的微生物生长速度较为缓慢,前40 d内变化不大,40 d后缓慢上升,在贮藏85 d时,菌落总数达到4.09 $\lg(\text{CFU/g})$,超过国标GB2726-2016对熟肉制品的限量值4 $\lg(\text{CFU/g})$ ^[35],在140 d时达到菌落总数的最大值。随着贮藏温度的升高,微生物的生长速度加快。10 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,贮藏32 d后菌落总数呈现显著上升($P < 0.05$)。15、20、25 $^{\circ}\text{C}$ 下微生物生长的迟滞期不明显,菌落总数从贮藏初期即迅速生长。不同贮藏温度下微生物达到稳定期的时间随着贮藏温度的升高而下降,在4 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏时菌落总数在120 d后趋于稳定,而10、15、20、25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下到达稳定期的时间分别是64、24、16、12 d。狮子

表1 不同一级模型拟合的相关参数
Table 1 The parameters of different primary models

一级模型	参数	温度(℃)				
		4	10	15	20	25
线性模型	初始菌落数对数值 N_0 (lg CFU/g)	0.66 ± 0.24	0.74 ± 0.27	2.35 ± 0.63	3.05 ± 0.77	2.12 ± 0.51
	生长速率 μ (d ⁻¹)	0.04 ± 0.00	0.07 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.14 ± 0.04	0.40 ± 0.05
mGM	初始菌落数对数值 N_0 (lg CFU/g)	1.24 ± 0.04	1.56 ± 0.13	1.23 ± 0.10	1.21 ± 0.26	1.18 ± 0.44
	最大菌落数对数值 N_{max} (lg CFU/g)	5.32 ± 0.08	6.33 ± 0.35	6.40 ± 0.04	6.22 ± 0.11	7.22 ± 0.20
	最大比生长速率 μ_{max} (d ⁻¹)	0.07 ± 0.00	0.14 ± 0.02	0.42 ± 0.02	0.87 ± 0.20	0.91 ± 0.13
mLM	迟滞时间 λ (d)	42.85 ± 1.63	24.92 ± 2.50	4.39 ± 0.44	1.78 ± 0.71	0.96 ± 0.81
	初始菌落数对数值 N_0 (lg CFU/g)	1.13 ± 0.09	1.43 ± 0.11	0.98 ± 0.13	0.80 ± 0.50	0.62 ± 0.73
	最大菌落数对数值 N_{max} (lg CFU/g)	5.19 ± 0.11	6.05 ± 0.16	6.37 ± 0.04	6.22 ± 0.11	7.13 ± 0.17
	最大比生长速率 μ_{max} (d ⁻¹)	0.07	0.14	0.40	0.75	0.89
BM	迟滞时间 λ (d)	42.49	25.08	3.87	0.87	0.36
	初始菌落数对数值 N_0 (lg CFU/g)	1.17 ± 0.08	1.48 ± 0.11	1.06 ± 0.14	0.91 ± 0.51	0.77 ± 0.81
	最大菌落数对数值 N_{max} (lg CFU/g)	7.61 ± 0.17	7.84 ± 0.22	7.41 ± 0.07	6.81 ± 0.19	7.58 ± 0.22
	最大比生长速率 μ_{max} (d ⁻¹)	0.09 ± 0.00	0.17 ± 0.02	0.43 ± 0.03	0.79 ± 0.17	0.90 ± 0.16
	迟滞时间 λ (d)	22.24 ± 6.31	16.64 ± 3.58	2.05 ± 0.99	0.51 ± 1.71	-0.04 ± 1.77

头中的最大菌落数随温度的升高而升高,由 4℃ 的 5.21 lg(CFU/g) 升高至 25℃ 的 7.21 lg(CFU/g),上升了 2 个对数级。15、20℃ 条件下狮子头中的最大菌落数非常接近,但 20℃ 贮藏的样品菌落总数在达到最高点后出现略微下降,说明在该温度下贮藏 16 d 就已经达到微生物的衰亡期,这与宋志强的试验结果一致^[6]。在 25℃ 贮藏条件下,菌落总数在第 15 d 达到最大值,此时狮子头出现涨袋、发粘等现象,并伴有异味产生。综上可知温度对于狮子头中微生物的生长繁殖有明显的影

响。温度升高可以加强微生物的酶促反应,进而缩短迟滞期并提高其生长速率^[36]。

对不同一级模型拟合得到的参数值进行比较,线性模型拟合的参数值与其他三个模型具有较大差异。mGM、mLM 与 BM 拟合的初始菌落值和最大比生长速率值非常接近。在 4、10℃ 时,mGM 与 mLM 拟合出的迟滞期的比值接近于 1,随着温度升高该比值不断变大,20℃ 时其值已经超过 2,25℃ 时则已经临近于 3。BM 拟合得到的迟滞期明显低于 mGM 和 mLM,其中 BM 拟合 25℃ 贮存样品所得的迟滞时间为 -0.04 d,但该值不可能为负值,由此表明 BM 拟合失败。

对使用不同一级模型拟合出的参数进行评价,其结果如表 2 所示。在三种模型中线性模型的 R^2 值最低,在 20℃ 时仅为 0.5551,且其 RSS、RMSE、AIC 和 BIC 值均较高,表明线性模型不适用于狮子头贮藏期间菌落总数的拟合。而 mGM 与 mLM 中这四个参数的数值相差不大,其 R^2 值均在 97% 以上,表明两种模型都可以较好地拟合不同温度下微生物的生长情况,需进一步比较其二级模型的拟合效果确定最优模型。

2.3 二级模型的拟合与评价

二级模型描述了一级模型拟合出的参数与环境条件(温度、pH、水分活度等)之间的函数关系。本文在一级模型的基础上,使用平方根模型将由 mGM 和 mLM 拟合得到的最大比生长速率和迟滞期分别与温度进行线性拟合,观察温度对两个参数的影响,并比较其拟合效果,选出最优模型。拟合效果图见图 2 和图 3。

平方根模型的方程式及评价参数如表 3 所示。

表 3 为分别以 mGM 和 mLM 为基础采用平方根模型拟合所得方程的相关参数。在由 mLM 中的参数拟合得到的二级模型中,温度与最大比生长速率拟合得到的线性方程的 R^2 达 0.9562,但温度与迟滞

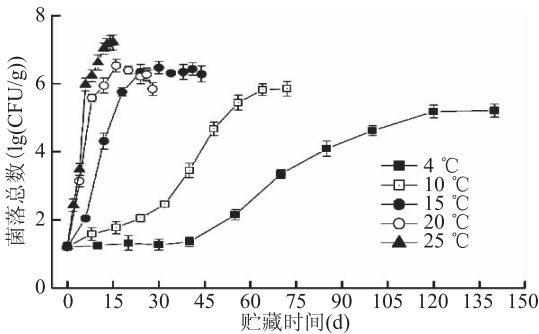


图1 不同温度下菌落总数生长曲线
Fig.1 Microbial growth curve at different temperatures

2.2 一级模型的拟合与评价

线性模型、修正的 Gompertz 模型(mGM)、修正的 Logistic 模型(mLM)以及 Baranyi 模型(BM)对不同贮藏温度下真空包装狮子头中菌落总数的生长曲线拟合所得的参数值如表 1 所示。

由表 1 可知,随着温度升高,最大比生长速率 μ_{max} 增大,迟滞期 λ 变短。这是因为低温抑制了狮子头中微生物的生长。而 25℃ 是常见微生物生长较适合的温度,因此在此温度下贮藏初期菌落总数不断上升。此外,温度对微生物体内的酶也会产生影响,进而影响微生物的生长繁殖速率。另有研究表明低温时微生物可能无法正常输送营养物质,而温

表 2 不同一级模型拟合结果评价参数的比较
Table 2 Comparison of the evaluation parameters of different primary models

参数	模型	温度(℃)				
		4	10	15	20	25
R^2	线性模型	0.9248	0.9412	0.7375	0.5551	0.8632
	mGM	0.9978	0.9857	0.9977	0.9811	0.9798
	mLM	0.9933	0.9937	0.9980	0.9808	0.9809
RSS	线性模型	1.9446	1.6235	8.1745	10.3267	5.4293
	mGM	0.0442	0.2969	0.0545	0.3139	0.6002
	mLM	0.1349	0.1298	0.0461	0.3183	0.5695
RMSE	线性模型	0.4204	0.4029	0.9041	1.0712	0.7368
	mGM	0.0634	0.1723	0.0738	0.1868	0.2450
	mLM	0.1107	0.1140	0.0679	0.1881	0.2386
AIC	线性模型	2.9385	1.8199	17.9843	19.2376	13.8923
	mGM	-38.6766	-15.1692	-32.1287	-12.2032	-8.1305
	mLM	-26.4152	-23.4397	-33.8041	-12.0781	-8.6555
BIC	线性模型	9.7132	7.1483	23.3127	23.2098	19.2207
	mGM	-31.9019	-9.8407	-26.8003	-8.2309	-2.8021
	mLM	-19.6404	-18.1113	-28.4757	-8.1059	-3.3270

表 3 不同二级模型方程及其拟合的相关参数
Table 3 The equations and parameters of different secondary models

模型	方程式	R^2	RSS	RMSE	AIC	BIC
mGM	$\sqrt{\mu_{\max}} = 0.03687(T + 2.4337)$	0.9193	0.0237	0.0689	-16.7544	-17.0977
	$\sqrt{1/\lambda} = 0.04353(T - 2.8518)$	0.9296	0.0286	0.0757	-15.8154	-16.1588
mLM	$\sqrt{\mu_{\max}} = 0.03541(T + 2.6252)$	0.9562	0.0115	0.0480	-20.3569	-20.7002
	$\sqrt{1/\lambda} = 0.07372(T - 5.0555)$	0.8642	0.1670	0.1827	-6.9975	-7.3409

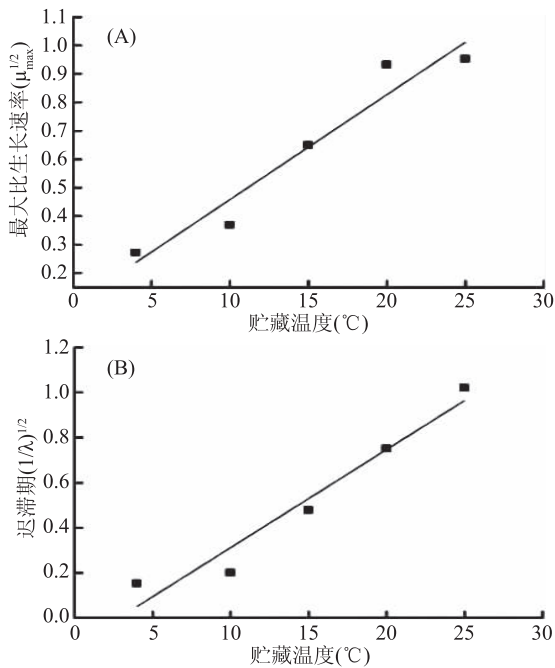


图 2 修正的 Gompertz 模型下温度与最大比生长速率(A)和迟滞期(B)的关系

Fig.2 Relationship between temperature and specific growth rate(A)and lag phase(B)derived from modified Gompertz model 期的线性关系较差,其 R^2 仅为 0.8642,表明 mLM 拟合所得方程效果不是很好。在由采用 mGM 拟合参

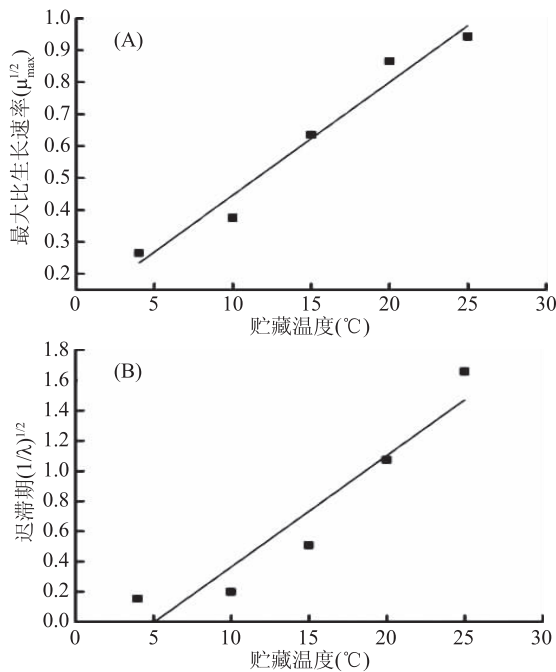


图 3 修正的 Logistic 模型下温度与最大比生长速率(A)和迟滞期(B)的关系

Fig.3 Relationship between temperature and specific growth rate(A)and lag phase(B)derived from modified Logistic model 数得到的二级模型中,两个模型的 R^2 分别为 0.9193 和 0.9296,均大于 0.9,且其 RSS、RMSE、AIC 和 BIC

值都相对较低。考虑到上述拟合模型 R^2 的差异,并兼顾到 RSS、RMSE、AIC 和 BIC 等评价指标,进行平方根模型拟合时采用来自 mGM 的参数可以更准确地描述温度对生长速率和迟滞期的影响。

由上述分析可知,在四种模型中,mGM 拟合效果最好,因此本研究选择 mGM 对狮子头中的菌落总数进行拟合,并以此为基础建立货架期预测模型。微生物预测模型中,Gompertz 模型和 Logistic 模型同属经验模型,在熟腌肉^[26]、冷却猪肉^[37]、凉皮^[38]和对虾^[39]的微生物预测研究中,Gompertz 模型均表现出了较好的拟合效果,与本实验结果一致。但目前也有研究表明经验模型虽然可以对微生物生长数据进行较好地拟合,但缺乏生物学基础,较难解释拟合得到参数的生物学意义。Baranyi 模型为机理模型,是了解微生物生长规律后基于细胞分裂的生长规律而建立,模型具有生物学意义。张莉等^[24]、陈睿等^[27]研究认为 Baranyi 模型拟合准确度最高,与本研究结果出现差异的原因可能是不同的数学模型适合的生物学特性并不相同,模型中的变量在微生物生长后期会失去其生物学意义,因此选择的描述性模型越简单越适合^[40],而 Baranyi 模型在经验模型的基础上增添了线性函数,可能与真空包装狮子头中微生物的实际生长曲线不相符;此外微生物种类、食品基质和包装方式的不同也会对模型的拟合效果产生影响。

2.4 模型的验证

为了评价模型的可靠性,使用偏差因子 Bf 和准确因子 Af 对拟合的一级模型进行验证,结果如表 4 所示。5 种温度下偏差因子的范围为 0.8165~1.0684,准确因子在 1.1228~1.4175 之间,均属于可接受范畴,表示模型拟合的准确度较高,通过 mGM 获得的菌落总数数据具有可信度,该模型可用于货架期预测模型的建立。

表 4 细菌总数预测值的偏差度与准确度

Table 4 Bf and Af on predicted value of total bacterial count			
贮藏温度 (℃)	实验次数 (n)	偏差因子 (Bf)	准确因子 (Af)
4	7	1.0682	1.1228
10	7	1.0351	1.4175
15	7	1.0340	1.1455
20	7	1.0684	1.3645
25	7	0.8165	1.4127

2.5 货架期预测模型的拟合与验证

真空包装狮子头货架期终点时微生物的腐败限量值 N_0 采用国标 GB 2726-2016 中规定的限量值 10^4 CFU/g。最大菌落数 N_{max} 取不同温度下菌落数的平均值 $6.22 \lg(\text{CFU/g})$,由式(16)得到真空包装狮子头的货架期预测模型为下式:

$$SL = \frac{5.277}{(T-2.8518)^2} - \left[\frac{6.22 - N_0}{0.00369 \times (T-2.8518)^2} \right] \times \left\{ \ln \left[-\ln \left(\frac{4 - N_0}{6.22 - N_0} \right) \right] - 1 \right\}$$

式(18)

为验证该货架期预测模型的准确性,采用不同批次的狮子头进行模型验证。由表 5 可知,贮藏 4、10、15、20、25℃ 的真空包装狮子头的货架期的预测值分别为 80.79、45.22、10.96、4.96、4.01 d,预测值与实测值相对误差值的绝对值均在 10% 以内,表明拟合的货架期模型可以有效的对贮藏 4~25℃ 的真空包装狮子头进行预测。

表 5 不同贮藏温度条件下货架期的实测值和预测值

Table 5 Predicted and observed shelf-life stored at different temperatures			
温度 (℃)	预测值 (d)	实测值 (d)	相对误差 (%)
4	80.79	75	7.71
10	45.22	42	7.66
15	10.96	10	9.59
20	4.96	5	-0.74
25	4.01	4	0.32

3 结论

本文以不同贮藏温度下的真空包装狮子头为研究对象,测定 4~25℃ 条件下微生物的生长情况,分别用线性模型、修正的 Gompertz 模型、修正的 Logistic 模型以及 Baranyi 模型对菌落总数进行一级模型的拟合,并在此基础上用平方根模型构建二级模型。结果表明,随着温度升高,微生物的繁殖速率不断上升,迟滞期不断缩短。对比模型拟合的评价参数,修正的 Gompertz 模型表现出最高的拟合优度。用准确因子(Af)及偏差因子(Bf)对模型进行验证,表明建立的微生物预测模型具有可信性,可以快速准确地预测狮子头中微生物的生长态势。进一步建立狮子头的货架期预测模型,预测值与实测值的相对误差均在 10% 以内,表明该模型可以很好地预测 4~25℃ 贮藏真空包装狮子头的货架期。

参考文献

[1]周晓燕,唐建华,陈剑,等.影响狮子头口感的关键工艺标准研究[J].食品科学,2010(16):145-150.
[2]陈睿,徐幸莲,周光宏.真空包装鸡胸早餐肠货架期预测模型的建立[J].食品科学,2014(6):209-213.
[3]Velugoti P R,Bohra L K,Juneja V K,et al.Dynamic model for predicting growth of *Salmonella* spp.in ground sterile pork[J]. Food Microbiology,2011,28(4):796-803.
[4]Whiting R C,Buchanan R L.A classification of models for predictive microbiology[J].Food Microbiology,1993,10(2):175-177.
[5]张新林,谢晶,钱韵芳,等.不同温度条件下三文鱼中荧光假单胞菌生长预测模型的建立[J].食品科学,2017(21):74-79.
[6]宋志强,刘超群,侯温甫.草鱼鱼整片中热杀索丝菌的生长预测模型[J].肉类研究,2013(5):1-4.
[7]Powell S M,Ratkowsky D A,Tamplin M L.Predictive model for the growth of spoilage bacteria on modified atmosphere packaged Atlantic salmon produced in Australia[J].Food

Microbiology, 2015, 47: 111-115.

[8] 刘莹莹, 罗瑞明, 卢君逸, 等. 冷却羊肉贮藏中品质变化及假单胞菌生长预测模型的建立[J]. 肉类研究, 2013(5): 5-9.

[9] Møller C O A, Ilg Y, Aabo S, et al. Effect of natural microbiota on growth of *Salmonella* spp. in fresh pork - a predictive microbiology approach [J]. Food Microbiology, 2013, 34 (2): 284-295.

[10] 王京, 张明赞. 基于假单胞菌生长模型预测冷却猪肉的货架期[J]. 食品研究与开发, 2018(13): 175-182.

[11] 宇盛好, 曹慧, 徐斐, 等. 烤鸭中金黄色葡萄球菌生长模型的建立[J]. 食品科学, 2015(13): 154-159.

[12] Mansur A R, Park J, Oh D. Predictive model for growth of *Staphylococcus aureus* on raw pork, ham, and sausage[J]. Journal of Food Protection, 2016, 79(1): 132-137.

[13] 林睿, 王亚楠, 王宏勋. 裸装卤制鸭掌中乳酸菌生长预测模型的构建[J]. 食品工业科技, 2013(9): 112-114.

[14] Gill C O, Greer G G, Diltz B D. The aerobic growth of *Aeromonas hydrophila* and *Listeria monocytogenes* in broths and on pork [J]. International Journal of Food Microbiology, 1997, 35 (1): 67-74.

[15] 刘肫. 不同贮藏温度对冷鲜鸡微生物和肉品质影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.

[16] 郑玉玺. 盒装豆腐腐败菌多样性及品质变化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

[17] 孙丹丹, 卢士玲, 李开雄, 等. 贮藏温度对冷鲜羊肉微生物菌群生长变化的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 327-331.

[18] 呼红梅, 王彦平, 张印, 等. 不同贮藏温度对热缩真空包装冷却猪肉微生物菌相变化和肉品质的影响[J]. 畜牧与兽医, 2015, 47(12): 40-44.

[19] 温冬玲, 成淑君, 刘悦, 等. 高通量测序分析不同增菌温度下冷鲜鸡肉细菌的群落多样性[J]. 食品科学, 2018, 39 (24): 156-161.

[20] 刘超群, 陈艳丽, 王宏勋, 等. 冷鲜猪肉中热杀索丝菌生长预测模型的建立与验证[J]. 食品科学, 2010(18): 86-89.

[21] 侯曼. 狮子头冷藏过程品质及微生物菌群变化规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.

[22] 国家质量技术监督局. 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[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[23] 田金玲. 模拟蟹肉中副溶血性弧菌生长预测模型的建立及应用[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2010.

[24] 张莉, 尹德凤, 张大文, 等. 常温下热鲜猪肉中沙门氏菌生长预测模型的建立[J]. 食品工业, 2017(7): 201-205.

[25] Oscar T P. Predictive models for growth of *Salmonella typhimurium* DT104 from low and high initial density on ground chicken with a natural microflora[J]. Food Microbiology, 2007, 24 (6): 640-651.

[26] Matagagas M, Drosinos E H, Vaidanis A, et al. Development of a predictive model for spoilage of cooked cured meat products and its validation under constant and dynamic temperature storage conditions [J]. Journal of Food Science, 2006, 71 (6): M157-M167.

[27] 陈睿, 徐幸莲, 周光宏, 等. 真空包装鸡肉早餐肠中细菌总数生长预测模型的拟合优度比较[J]. 食品科学, 2014(15): 113-117.

[28] Baranyi J, Roberts T A. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food [J]. International Journal of Food Microbiology, 1994, 23(3-4): 277.

[29] Silva N B D, Longhi D A, Martins W F, et al. Modeling the growth of *Lactobacillus viridescens* under non-isothermal conditions in vacuum-packed sliced ham[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 240: 97-101.

[30] Chaohui F, Drummond L, Dawen S. Modeling the growth parameters of lactic acid bacteria and total viable count in vacuum-packaged Irish cooked sausages cooked sausages cooled by different methods [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(12): 2659-2667.

[31] Gan H E, Karim R, Muhammad S K S, et al. Optimization of the basic formulation of a traditional baked cassava cake using response surface methodology [J]. LWT - Food Science and Technology, 2007, 40(4): 611-618.

[32] Mishra A, Guo M, Buchanan R L, et al. Development of growth and survival models for *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* during non-isothermal time-temperature profiles in leafy greens[J]. Food Control, 2017, 71: 32-41.

[33] Tang X, Sun X, Wu V C H, et al. Predicting shelf-life of chilled pork sold in China [J]. Food Control, 2013, 32 (1): 334-340.

[34] Cayre M E, Vignolob G, Garroa O. Modeling lactic acid bacteria growth in vacuum-packaged cooked meat emulsions stored at three temperatures[J]. Food Microbiology, 2003, 20(5): 561-566.

[35] 国家质量技术监督局. GB 2726-2016 食品安全国家标准 熟肉制品[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[36] 丁婷, 李婷婷, 励建荣, 等. 冷藏三文鱼片微生物生长动力学模型适用性分析及货架期模型的建立[J]. 中国食品学报, 2015(5): 63-73.

[37] 张宇婷. 冷却猪肉在流通领域中的微生物预测预报[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.

[38] 孟云, 马俊伟, 廖超, 等. 凉皮中金黄色葡萄球菌生长预测模型的建立[J]. 现代食品科技, 2018(4): 198-205.

[39] 林静, 王子颖, 肖满凤, 等. 对虾中副溶血性弧菌生长模型的建立[J]. 食品科技, 2015(7): 296-300.

[40] 李苗云, 田璐, 赵改名, 等. 肉品微生物生长预测模型研究进展[J]. 肉类研究, 2012, 26(12): 20-24.

权威 · 高效 · 核心 · 领先 · 精湛 · 实用