

# 冷鲜黄羽肉鸡货架期预测模型的建立与评价

陈 鹏<sup>1,2</sup>,程镜蓉<sup>2</sup>,杨禹新<sup>3</sup>,方少钦<sup>2</sup>,刘学铭<sup>2,\*</sup>

(1.江西农业大学生物科学与工程学院,江西南昌 330045;

2.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所,农业部功能食品重点实验室,  
广东省农产品加工重点实验室,广东广州 510610;

3.广州市江丰实业股份有限公司,广东广州 510450)

**摘 要:**为建立冷鲜黄羽肉鸡的货架期预测模型,将冷鲜黄羽肉鸡用托盘包装后,置于-1、4、10、15、20 ℃贮藏,分别测定不同贮藏时间的细菌总数,同时对4 ℃贮藏的冷鲜黄羽肉鸡的挥发性盐基氮进行分析,确定最小腐败限量 $N_s$ 为5.67 lg(CFU/g)。使用修正的 Gompertz 模型、Baranyi 模型及修正的 Logistic 模型分别描述细菌总数随时间变化的情况,并使用平方根模型描述一级模型所得参数随温度变化的情况。通过比较各模型所得的参数、回归系数( $R^2$ )、偏差因子( $B_f$ )、准确因子( $A_f$ )以及二级模型的残差平方和(RSS),确定修正的 Gompertz 的拟合优度最好。在以修正的 Gompertz 模型为生长预测模型的基础上,构建冷鲜黄羽肉鸡的货架期预测模型,结果显示5种温度下的预测值与实测值之间的相对均误差均小于10%,表明建立的模型能够快速准确的预测-1~20 ℃贮藏条件下冷鲜黄羽肉鸡的货架期。  
**关键词:**冷鲜黄羽肉鸡,货架期,预测模型,拟合优度,修正的 Gompertz 模型

## Establishment and evaluation of predictive model for the shelf life of chilled yellow broiler

CHEN Peng<sup>1,2</sup>, CHENG Jing-rong<sup>2</sup>, YANG Yu-xin<sup>3</sup>, FANG Shao-qin<sup>2</sup>, LIU Xue-ming<sup>2,\*</sup>

(1.College of Bioscience and Bioengineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2.Sericultural and Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China;

3.Guangzhou Kwang Feng Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510450, China)

**Abstract:** In order to establish a predictive model for the shelf-life of chilled yellow broiler, samples were packed in trays and stored at -1, 4, 10, 15, and 20 ℃, respectively, and their aerobic plate count were determined. Meanwhile, chilled yellow broiler was analyzed for total volatile basic nitrogen during storage at 4 ℃. Results showed that the average number of total viable counts was 5.67 lg(CFU/g) at the end of the shelf life. The primary models, modified Gompertz, Baranyi and modified Logistic were applied to describe the change of total bacterial counts with time, and their secondary models, square root equations, were used to describe the change of parameters from primary models with time. The modified Gompertz model was evaluated as the best goodness of fit by comparing the model parameters, regression coefficient ( $R^2$ ), bias factor ( $B_f$ ), accuracy factor ( $A_f$ ) and residual sum of squares (RSS) of the secondary models. On the basis of modified Gompertz, the relative error between predicted value obtained from total bacterial count growth prediction model and its observed shelf life was less than 10%. Which indicated the predictive model was reliable for the shelf-life of chilled yellow broiler meat stored at temperature ranging from -1 to 20 ℃.

**Key words:** chilled yellow broiler; shelf life; prediction mode; goodness-of-fit; modified Gompertz

中图分类号:TS251.5

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2016)12-0144-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2016.12.020

黄羽肉鸡具有肉质细滑、鸡香浓郁、风味独特等特点,倍受海内外食客的青睐。在我国有着悠久的

饲养历史和丰富的品种资源,是一类极具中国特色的肉鸡<sup>[1]</sup>。然而我国冷链系统滞后,黄羽肉鸡营养丰

收稿日期:2015-11-30

作者简介:陈鹏(1990-),男,硕士研究生,研究方向:生物工程,E-mail:pchenxy@163.com。

\* 通讯作者:刘学铭(1967-),男,博士,研究员,研究方向:农产品加工,E-mail:xumingliu37@126.com。

基金项目:广州市产学研协同创新重大专项(201508020019);广东省促进科技服务业发展计划项目(2013B040400009,2014B040404059)。

富在冷鲜储藏过程中极易滋生微生物导致腐败<sup>[2]</sup>,货架期变短,甚至对消费者健康造成危害<sup>[3-4]</sup>。因此,对整个运输储存过程中的微生物进行监控,建立准确可靠的货架期预测模型,是降低黄羽肉鸡腐败的风险,促进黄羽肉鸡行业发展的重要举措,具有显著的实用价值和现实意义。

预测微生物学是在特定条件下对食品微生物生长、繁殖、残存和死亡等反应进行细化,并结合计算机技术、数理统计和微生物知识,客观地评价食品在加工、流通和贮藏等条件下的食品质量和货架期<sup>[5-6]</sup>。预测微生物学主要是从量化食品中微生物生态理论演变而来,并在食品工业中不断的应用发展,现已经广泛应用于食品微生物的描述与预测<sup>[7-8]</sup>。传统的微生物学技术需进行样品预处理,耗时长、成本高;而预测模型能够在不进行微生物检测的情况下对食品的货架期进行快速预测,并能分析食品和微生物间的关系<sup>[9]</sup>,具有显著优势。微生物预测模型主要分为一级模型、二级模型和三级模型。一级模型指在特定培养条件下,微生物的活动与时间的关系,主要有 Gompertz 模型、Baranyi 模型、修正的 Logistic 模型和 Huang 模型等<sup>[10]</sup>,其中 Baranyi 模型是全球最大的开源微生物预测数据库 Combase 的拟合回归模型;二级模型指一级模型中的参数与环境变量对微生物活动特性的关系,主要有平方根模型和 Peleg-Corradini 模型等<sup>[11]</sup>;三级模型指将一级模型和二级模型通过计算机软件形式合并的模型形式<sup>[5-6]</sup>。

近年来关于微生物的预测模型主要是对单一的特定腐败菌 (Specifics spoilage organisms, SSO) 建立的预测模型<sup>[12-14]</sup>,但是仅仅用单一的微生物或者是肉品中某一类微生物不能完全说明肉品的普遍性<sup>[15]</sup>。通过比较不同模型函数的拟合优度,选择适合产品的预测模型函数十分重要,但目前大部分研究并未作此比较<sup>[12-14]</sup>,所选模型不一定是优度最好的,且关于冷鲜黄羽肉鸡微生物预测模型的建立尚属空白,所以比较不同模型函数的拟合优度是很有必要的。此外有研究显示肉在-1℃条件下组织中水分呈微结晶状态,既不严重影响肉的质构特性,又能更好地抑制微生物生长繁殖<sup>[16]</sup>。因此本研究探讨了黄羽肉鸡于-1、4、10、15 和 20℃条件下细菌总数的变化情况,从 Gompertz 模型、Baranyi 模型和修正的 Logistic 模型中选取拟合度最优的模型,并以此模型为基础建立了冷鲜黄羽肉鸡的货架期预测模型。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

江丰黄羽肉鸡 购于广州市江丰实业股份有限公司,当天凌晨宰杀后用装有干冰的保温箱在 30 min 内运至实验室;平板计数琼脂 广东环凯微生物有限公司。

SW-CJ-2D 型超净工作台 苏州净化设备有限公司;UV-1800 型紫外可见分光光度计 日本岛津公司;ALC-210.4 型分析天平 德国赛多利斯爱科勒公司;LRH-250 型生化培养箱 上海一恒科学仪器有限公司;LS-50LD 型立式压力蒸汽灭菌器 江阴滨江医

疗设备有限公司;BCD-648WDBE 型冰箱 海尔集团。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 将冷鲜黄羽肉鸡,于无菌条件下取鸡胸肉部分,切割成 30 g 左右的小块 ( $n=5$ ),然后置于经紫外灯灭菌的吸塑托盘中,并用 PE 保鲜膜 [氧气透过率:  $18800 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{atm})$ ;透湿量:  $23 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})$ ] 封口,分别置于 -1、4、10、15 和 20℃ 温度条件下贮藏,定期取样进行检测。

1.2.2 细菌总数的测定 无菌条件下准确称取 -1、4、10、15 和 20℃ 下储存的冷鲜黄羽肉鸡鸡肉 25 g,用无菌剪刀剪碎,加入 225 mL 灭菌生理盐水中,扎紧口置于摇床上 (200 r/min) 振荡 30 min。然后按 10 倍递增稀释到所需稀释度,按 GB4789.2-2010 测定细菌总数。

1.2.3 挥发性盐基氮 (TVB-N) 值的测定 参考张坤等<sup>[17]</sup>的分光光度法测定肉与肉制品中挥发性盐基氮的方法,通过公式 (1) 进行计算。国标规定一级鲜肉中 TVB-N < 15 mg/100 g;二级鲜肉中 TVB-N ≤ 20 mg/100 g;变质肉中 TVB-N > 20 mg/100 g。

$$X = \frac{(C - C_0) \times 10^{-3}}{m \times 1/10 \times V/25} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中:  $X$  为样品中挥发性盐基氮的含量 (mg/100 g);  $C$  为样品测定液中挥发性盐基氮的含量 ( $\mu\text{g/mL}$ );  $C_0$  为空白测定液中挥发性盐基氮的含量 ( $\mu\text{g/mL}$ );  $m$  为样品质量 (g);  $V$  为测定用样品液体积 (mL)。

### 1.2.4 微生物生长动力学模型 (一级模型)

1.2.4.1 修正的 Gompertz 模型 Gompertz 模型属于经验模型。其修正的表达式如式 (2) 所示<sup>[18]</sup>。

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

式中:  $t$  时间 (h);  $N(t)$  为  $t$  时的微生物数量 [ $\lg(\text{CFU/g})$ ];  $N_0$  为  $t=0$  时的初始微生物数量 [ $\lg(\text{CFU/g})$ ];  $N_{\max}$  为微生物增长到稳定期时最大的微生物数量 [ $\lg(\text{CFU/g})$ ];  $\mu_{\max}$  为微生物生长的最大比生长速率 ( $\text{h}^{-1}$ );  $\lambda$  为微生物生长的延滞时间 (h),下同。

1.2.4.2 Baranyi 模型 Baranyi 模型属于机械模型。其表达式如式 (3) 所示<sup>[19]</sup>。

$$N(t) = N_0 + \mu_{\max} \times t + \ln(\exp(-\mu_{\max} \times t) + \exp(-d) - \exp(-\mu_{\max} \times d)) - \ln[1 + \frac{\exp(\mu_{\max} \times t - d) - \exp(-d)}{\exp(N_{\max} - N_0)}] \quad \text{式(3)}$$

式中:  $d$  为最大比生长速率  $\mu_{\max}$  与延滞期  $\lambda$  的乘积。

1.2.4.3 修正的 Logistic 模型 修正的 Logistic 模型表达式如式 (4)~式 (6) 所示<sup>[20]</sup>。

$$N(t) = N_0 + \frac{N_{\max} - N_0}{1 + \exp[-C \times (t - D)]} \quad \text{式(4)}$$

$$\mu_{\max} = C \times (N_{\max} - N_0) / 4 \quad \text{式(5)}$$

$$\lambda = D - 2/C \quad \text{式(6)}$$

注:式中  $C$  为在  $t=M$  时的相对最大生长速率,  $\text{h}^{-1}$ ;  $D$  为达到相对最大生长速率所需要的时间,  $\text{h}$ 。

### 1.2.5 温度对微生物生长影响的动力学模型 (二级

模型) 平方根方程是基于微生物生长速率,表征平方根与温度之间的线性关系,是由 Ratkowsky 等提出的经验模型。它的研究和使用的都很广泛,并在描述不同温度下微生物的生长取得成功<sup>[21]</sup>。其关系式如式(7)和式(8)所示。

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

$$\sqrt{\mu_{\max}} = b \times (T - T_{\min}) \quad \text{式(8)}$$

式中:  $T$  为储存温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\min}$  为生长的最低温度,即在此温度时最大比生长速率为零 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $b_{\lambda}$ 、 $b$  是方程的常数。

1.2.6 微生物生长动力学模型拟合优度的评价 通过偏差因子 ( $B_f$ )、准确因子 ( $A_f$ ) 来验证一级模型<sup>[22-23]</sup>,  $B_f$  是描述观测值所处位置为预测值所构成曲线的上方、下方还是正好在曲线上的参数,同时该值还能度量观测值与预测值之间存在差距的大小,即该模型结构性误差的多少。  $A_f$  描述了各观测值所得到的点与预测值构成的曲线之间的平均距离。二者的值均为 1 时的效果最为理想。此外  $B_f$  是预测模型是否安全的重要判断依据,一般认为  $B_f$  值在 0.90~1.05 的范围之内,该模型能够很好地预测微生物生长状况;  $B_f$  值在 0.70~0.90 或者 1.06~1.15 范围之内,则该模型是可以被接受的;如果  $B_f$  值大于 1.15 或者小于 0.70,则说明该模型是失败的<sup>[24]</sup>。二级模型通过残差平方和 (RSS) 来验证<sup>[19]</sup>。其表达式如式(9)~式(11)所示。

$$B_f = 10^{\frac{\sum \lg(\text{pred}/\text{obs})}{n}} \quad \text{式(9)}$$

$$A_f = 10^{\frac{\sum |\lg(\text{pred}/\text{obs})|}{n}} \quad \text{式(10)}$$

$$\text{RSS} = \sum (\text{obs} - \text{pred})^2 \quad \text{式(11)}$$

式中:  $\text{obs}$  为实验实际测得的细菌总数;  $\text{pred}$  为应用微生物生长动力学模型预测得到的与  $\text{obs}$  同一时间的细菌总数;  $n$  为实验次数。

1.2.7 货架期预测模型的建立和验证 冷鲜黄羽肉鸡于托盘包装条件下的货架期 (Shelf life, SL), 根据建立的微生物生长动力学模型, 可以通过微生物的初始菌数 ( $N_0$ ) 到腐败限控量 ( $N_s$ ) 所需要的增殖时间来预测。货架期的计算关系式是在式(2)的基础上推导出来, 如式(12)所示。将式(12)计算所得货架期预测值与实测值相比较, 验证模型可靠性。

$$\text{SL} = \lambda - \frac{N_{\max} - N_0}{2.718} \times \mu_{\max} \times \left[ \ln \left( -\ln \frac{N_s - N_0}{N_{\max} - N_0} \right) - 1 \right] \quad \text{式(12)}$$

式中:  $N_s$  为腐败限控量 [ $\lg(\text{CFU/g})$ ]。

### 1.3 数据处理与统计分析

所有数据用 Excel 2007 (Microsoft 公司, 美国) 进行数据整理; 用 SPSS 17.0 (IBM 公司, 美国) 进行平均值、标准差的分析; 通过 Origin 9.0 (Origin Lab 公司, 美国) 进行作图、模型拟合和预测模型的建立。

## 2 结果与分析

### 2.1 腐败限控量的确定

在  $4^{\circ}\text{C}$  贮藏过程中, 冷鲜黄羽肉鸡鸡肉中挥发性盐基氮与细菌总数的变化如图 1 所示。第 5 d 处于二级鲜肉, TVB-N 达到  $19.03 \text{ mg}/100 \text{ g}$ , 此时细菌总数

为  $5.67 \lg(\text{CFU/g})$ ; 第 6 d 已变质, TVB-N 达到  $25.11 \text{ mg}/100 \text{ g}$ , 此时细菌总数为  $6.21 \lg(\text{CFU/g})$ 。因此当黄羽肉鸡中的细菌总数为  $5.67 \lg(\text{CFU/g})$  时, 鸡肉还处于新鲜状态, 当超过这个值, 黄羽肉鸡就有可能腐败, 所以冷鲜黄羽肉鸡的最小腐败限量  $N_s$  为  $5.67 \lg(\text{CFU/g})$ 。

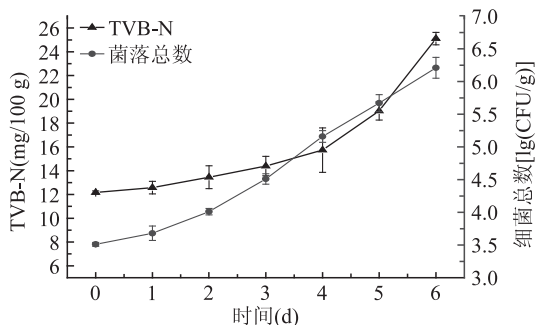


图1 冷鲜黄羽肉鸡在  $4^{\circ}\text{C}$  储存时的 TVB-N 值与细菌总数的变化

Fig.1 The change of TVB-N and Aerobic

bacterial count in chilled yellow broiler during  $4^{\circ}\text{C}$

### 2.2 一级模型的拟合

根据黄羽肉鸡在  $-1$ 、 $4$ 、 $10$ 、 $15$  和  $20^{\circ}\text{C}$  贮藏过程中的细菌总数数据进行一级模型拟合, 各一级模型与观测数据拟合情况如图 2 所示。

从图 2 与表 1 可以看出, 三种模型都能很好地拟合各个温度下的微生物生长情况, 其  $R^2$  均在 0.97 以上。

表 1 不同一级模型的微生物生长动力学参数比较

Table 1 Kinetic parameters of microbial comparison of the different primary models

| 项目                               |     | 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) |        |         |         |         |
|----------------------------------|-----|---------------------------|--------|---------|---------|---------|
|                                  |     | -1                        | 4      | 10      | 15      | 20      |
| $N_0$<br>[lg(CFU/g)]             | Gom | 3.631                     | 3.768  | 3.436   | 3.455   | 3.381   |
|                                  | Bar | 3.514                     | 3.684  | 3.276   | 3.028   | 3.167   |
|                                  | Log | 3.448                     | 3.620  | 2.892   | 2.754   | 2.867   |
| $N_{\max}$<br>[lg(CFU/g)]        | Gom | 7.922                     | 9.454  | 10.361  | 10.103  | 11.169  |
|                                  | Bar | 11.431                    | 12.134 | 11.980  | 11.858  | 12.390  |
|                                  | Log | 7.719                     | 9.117  | 9.758   | 9.849   | 10.593  |
| $\mu_{\max}$ ( $\text{h}^{-1}$ ) | Gom | 0.019                     | 0.041  | 0.068   | 0.115   | 0.121   |
|                                  | Bar | 0.023                     | 0.045  | 0.074   | 0.114   | 0.125   |
|                                  | Log | 0.018                     | 0.042  | 0.067   | 0.113   | 0.125   |
| $\lambda$ (h)                    | Gom | 119.805                   | 82.944 | 13.162  | 5.981   | 4.178   |
|                                  | Bar | -25.275                   | 19.671 | -20.839 | -17.079 | -13.507 |
|                                  | Log | 110.898                   | 82.706 | 6.001   | 1.757   | 1.655   |
| $R^2$                            | Gom | 0.976                     | 0.987  | 0.998   | 0.993   | 0.989   |
|                                  | Bar | 0.977                     | 0.993  | 0.999   | 0.993   | 0.992   |
|                                  | Log | 0.976                     | 0.995  | 0.999   | 0.994   | 0.991   |

注: Gom-修正的 Gompertz 模型; Bar-Baranyi 模型; Log-修正的 Logistic 模型, 表 2 同。

结合图 2 和最大比生长速率 ( $\mu_{\max}$ ) 可以得出, 在  $-1^{\circ}\text{C}$  条件下微生物生长较为缓慢, 随着温度的上升微生物的生长速度逐渐加快, 因而控制温度对于冷鲜黄羽肉鸡的储存是十分必要的。对比延滞期时间 ( $\lambda$ ) 可知 Gompertz 模型和 Logistic 模型均为正数, 而 Baranyi 模型基本为负数, 这与 Van J F 等人的研究结

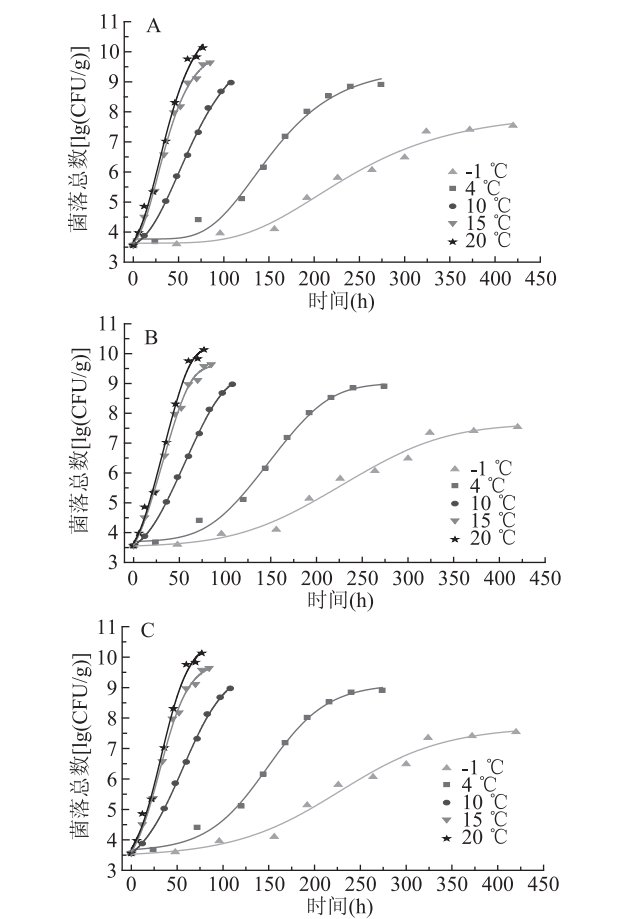


图2 细菌总数在不同温度条件下生长曲线及各一级模型拟合曲线

Fig.2 Growth curves and predictive model of Aerobic bacterial count at different temperatures

注:A-Gompertz 模型;B-Baranyi 模型;C-Logistic 模型。  
果相似<sup>[25]</sup>,由于负数的λ不能用于二级模型的建立,所以舍去 Baranyi 模型,以另外两个模型进行后续  
的模型建立与检验。

2.3 二级模型的拟合

根据一级模型所得到的动力学参数,构建二级模型(平方根模型)来拟合温度对微生物生长的影响。如图3所示。

根据修正的 Gompertz 模型和修正的 Logistic 模型各自的参数构建的二级模型关系式如表2所示。从表2中可以看出,温度与修正的 Gompertz 模型中 $\sqrt{\mu_{max}}$ 和 $\sqrt{1/\lambda}$ 的线性关系良好,它们的 $R^2$ 分别为0.95536和0.95453;温度与修正的 Logistic 模型中 $\sqrt{\mu_{max}}$ 的线性关系良好, $R^2$ 达到0.96914,与 $\sqrt{1/\lambda}$ 之间线性关系较差, $R^2$ 仅为0.89733。所以初步选取修正的

表2 二级模型的关系式

| Table 2 The relationship of secondary level models |                                                    |         |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------|
| 模型                                                 | 二级模型关系式                                            | $R^2$   |
| Gom                                                | $\sqrt{\mu_{max}} = 0.01053 \times (T + 14.85312)$ | 0.95536 |
|                                                    | $\sqrt{1/\lambda} = 0.02071 \times (T + 3.67928)$  | 0.95453 |
| Log                                                | $\sqrt{\mu_{max}} = 0.01070 \times (T + 14.55830)$ | 0.96914 |
|                                                    | $\sqrt{1/\lambda} = 0.03804 \times (T + 1.67539)$  | 0.89733 |

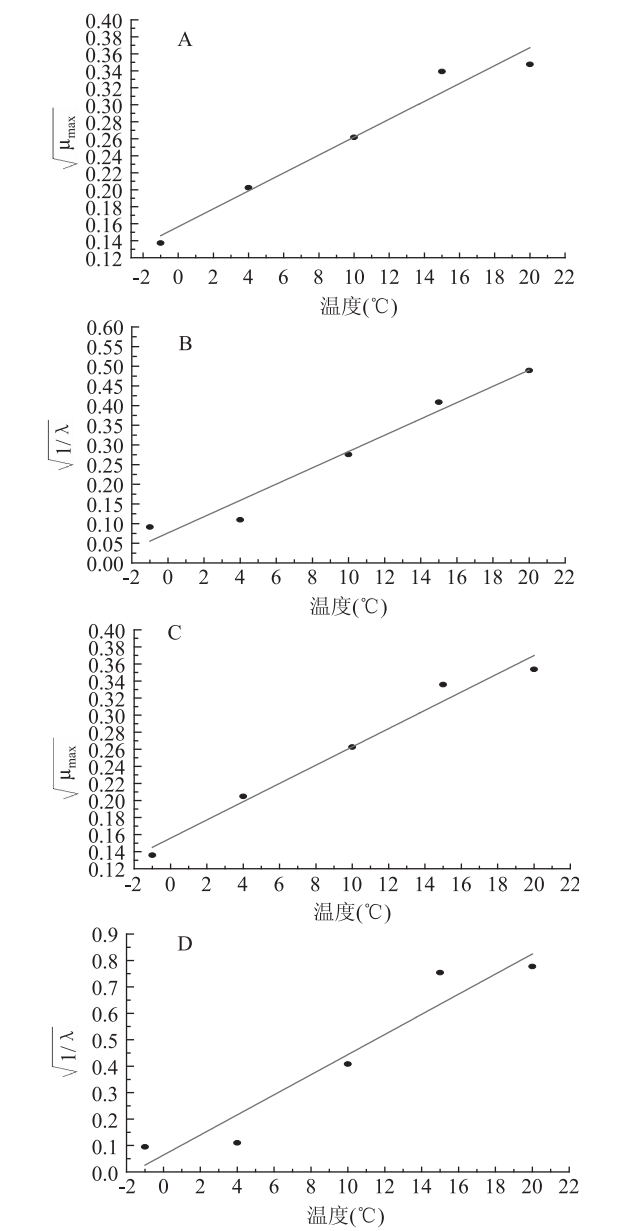


图3 温度与最大比生长速率(μ<sub>max</sub>)、延滞时间(λ)的关系

Fig.3 Relationships between temperature and specific growth rate or lag phase

注:A,B-Gompertz 模型;C,D-Logistic 模型。

Gompertz 模型为最优的模型来预测细菌总数的生长。

2.4 模型优度的评价

将实验所获得的数据与所建立的预测模型进行比较,确定一级模型的可靠性。由表3可以看出,修正的 Gompertz 模型的偏差因子与准确因子均十分接近1,二者的波动幅度分别在0.1%和4%以下;且5个温度下的B<sub>f</sub>均处在0.90~1.05的范围之内。所以修正的 Gompertz 模型可以很好地预测微生物的生

表3 微生物数量预测值的偏差因子和准确因子

| Table 3 Bias and accuracy factor of predicted values of bacterial count |         |         |         |         |         |
|-------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 温度(°C)                                                                  | -1      | 4       | 10      | 15      | 20      |
| B <sub>f</sub>                                                          | 1.00061 | 1.00071 | 1.00007 | 1.00024 | 1.00056 |
| A <sub>f</sub>                                                          | 1.03156 | 1.03054 | 1.00765 | 1.02018 | 1.02565 |

表4 温度与比生长速率平方根模型、延滞时间平方根模型的残差值  
Table 4 Residuals of temperature and square root of specific growth rate or square root of lag phase

| 温度(℃) | $\sqrt{\mu_{\max}}$ 模型 |         |          | $\sqrt{1/\lambda}$ 模型 |         |          |
|-------|------------------------|---------|----------|-----------------------|---------|----------|
|       | 实际观察值                  | 预测值     | 残差值      | 实际观察值                 | 预测值     | 残差值      |
| -1    | 0.13726                | 0.14592 | -0.00866 | 0.09136               | 0.05548 | 0.03588  |
| 4     | 0.20234                | 0.19858 | 0.00376  | 0.10980               | 0.15902 | -0.04922 |
| 10    | 0.26163                | 0.26178 | -0.00015 | 0.27564               | 0.28327 | -0.00763 |
| 15    | 0.33910                | 0.31445 | 0.02465  | 0.40889               | 0.38681 | 0.02208  |
| 20    | 0.34752                | 0.36712 | -0.01960 | 0.48924               | 0.49035 | -0.00111 |

长,进一步确定修正的 Gompertz 模型为最优的模型来预测细菌总数的变化。

根据修正的 Gompertz 模型所建立的二级模型进行残差平方和(RSS)计算,可以确定二级模型拟合的优劣。从表4 可以看出5 种温度下的  $\sqrt{\mu_{\max}}$ 残差平方和为 0.00108,5 种温度下的  $\sqrt{1/\lambda}$ 残差平方和为 0.00426。说明利用修正的 Gompertz 模型所描述的温度与比生长速率、延滞时间的关系是可信的,应用平方根模型能够很好的描述不同温度对细菌总数生长的影响。最终确定黄羽肉鸡的货架期预测模型将以修正的 Gompertz 模型为基础进行构建。

2.5 货架期预测模型的建立和验证

以修正的 Gompertz 模型为基础,计算从初始微生物数量( $N_0$ )增至腐败量( $N_s$ )的时间来预测冷鲜黄羽肉鸡的货架期。已知产品最小腐败量为 5.67 lg(CFU/g),最大微生物数量可以用不同温度条件下该数值的平均值 9.80193 lg(CFU/g),由此得出货架期预测模型为方程(13)。

$$SL = \lambda - \frac{9.80193 - N_0}{2.718} \times \mu_{\max} \times [\ln(-\ln \frac{5.67 - N_0}{9.80193 - N_0}) - 1]$$

式(13)

表5 冷鲜黄羽肉鸡不同储存温度条件下  
货架期的实测值和预测值

Table 5 Predicted and observed shelf-life  
for chilled yellow broiler stored at different temperatures

| 温度(℃) | 实际观察值<br>(h) | 预测值<br>(h) | 相对误差<br>(%) |
|-------|--------------|------------|-------------|
| -1    | 217          | 228        | 5.07        |
| 4     | 134          | 129        | 3.73        |
| 10    | 41           | 45         | 9.76        |
| 15    | 24           | 25         | 7.41        |
| 20    | 22           | 23         | 8.00        |

注:相对误差(%) = |(SL<sub>预测值</sub> - SL<sub>实际观察值</sub>)/SL<sub>实际观察值</sub>| × 100。

对各储存温度下冷鲜黄羽肉鸡的细菌总数货架期预测模型进行验证,由表5 可知本实验建立的冷鲜黄羽肉鸡货架期预测模型所得到的预测值的准确率较高,相对误差均小于 10%。以修正的 Gompertz 模型为基础建立的细菌总数货架期预测模型可快速准确预测-1~20 ℃ 储存温度下冷鲜黄羽肉鸡的货架期。此外-1 ℃ 下冷鲜黄羽肉鸡的货架期要远长于

4 ℃ 的货架期。

3 结论

冷鲜黄羽肉鸡的最小腐败限量  $N_s$  为 5.67 lg(CFU/g)。以修正的 Gompertz 模型、Baranyi 模型和修正的 Logistic 模型为一级模型,从中选取拟合优度最好的一级模型构建冷鲜黄羽肉鸡的货架期预测模型。通过比较一级模型和二级模型的  $R^2$ ,以及观察一级模型所得到的参数,初步确定以修正的 Gompertz 模型为最优一级模型。对修正的 Gompertz 模型进行偏差因子( $B_t$ )、准确因子( $A_t$ )和二级模型的残差平方和(RSS)进行分析,得出修正的 Gompertz 模型能很好地描述冷鲜黄羽肉鸡在储存过程中微生物的生长情况,且可靠性较高。在修正的 Gompertz 模型基础上建立的货架期预测模型,能够很好地预测-1~20 ℃ 条件下冷鲜黄羽肉鸡的货架期,低温(-1 ℃)有利于延长冷鲜黄羽肉鸡的货架期。

参考文献

[1] 张晶鑫,宫桂芬.当前我国黄羽肉鸡生产形势及未来发展方向[J].中国禽业导刊,2009,26(8):56-58.  
[2] 樊静,李苗云,张建威,等.肉鸡屠宰加工中的微生物控制技术进展[J].微生物学杂志,2011,31(2):80-84.  
[3] 余伟,陈海仪,何楚珺,等.冷鲜鸡供应链的风险因素调研分析[J].物流工程与管理,2015,37(3):131-133.  
[4] 陈洪根.基于产品安全可靠性的生鲜鸡肉物流系统优化决策模型[J].物流技术,2015,34(5):121-123.  
[5] 迟海,李学英,杨实时.微生物预测模型技术研究进展及其在食品工业中的应用[J].现代食品科技,2013,29(3):678-682.  
[6] Koutsoumanis K.Predictive modeling of the shelf life of fish under nonisothermal conditions[J].Applied and Environmental Microbiology,2001,67(4):1821-1829.  
[7] Zhou K,Zhong K,Long C,et al.Development and Validation of a Predictive Model for the Growth of Salmonella enterica in Chicken Meat[J].Journal of Food Safety,2014,34(4):326-332.  
[8] Lee YJ,Jung BS,Yoon HJ,et al.Predictive model for the growth kinetics of Listeria monocytogenes in raw pork meat as a function of temperature[J].Food Control,2014,44(8):16-21.  
[9] Velugoti PR,Bohra LK,Juneja VK,et al.Dynamic model for predicting growth of Salmonella spp.in ground sterile pork[J].Food Microbiology,2011,28(4):796-803.  
[10] Ye K,Wang H,Zhang X,et al.Development and validation of a molecular predictive model to describe the growth of Listeria monocytogenes in vacuum-packaged chilled pork[J].Food

(下转第 177 页)

- [2] 于长青, 张丽娜, 李夫庆. 肉牛血红素提取工艺的研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 74-77.
- [3] 于长青, 任泊晓, 修峰. 鹅血酶解液活性炭脱色效果的研究[J]. 中国食品添加剂, 2007(1): 66-69.
- [4] 赵立冬, 高扬, 于振新, 等. 鹅血血红蛋白肽成分的分析[J]. 肉类工业, 2010(7): 26-28.
- [5] 范守城, 张云茹, 张昌莲, 等. 鹅血的抗癌机理及其药物开发[J]. 水禽世界, 2007(4): 54-55.
- [6] 郑召君, 张日俊. 畜禽血液的开发与研究进展[J]. 饲料工业, 2014, 17: 019.
- [7] 汪学荣, 王飞. 生物态补铁剂——血红素铁研究进展[J]. 粮食与油脂, 2007(4): 40-43.
- [8] 蔡君. 猪血生物法制备血红素及珠蛋白肽的工艺研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2013.
- [9] 刘振斌. 牦牛血血红素提取工艺研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [10] Martins V G, Costa J A V, Hernandez C P. Hidrolisado protéico de pescado obtido por vias química e enzimática a partir de corvina (*Micropogonias furnieri*) [J]. Química Nova, 2009, 32(1): 61-66.
- [11] Kristinsson H G, Rasco B A. Fish protein hydrolysates; production, biochemical, and functional properties [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2000, 40(1): 43-81.
- [12] 赵新淮, 冯志彪. 大豆蛋白水解物水解度测定的研究

- [J]. 东北农业大学学报, 1995, 26(2): 178-181.
- [13] 张亚娟. 从猪血中酶法制取血红素的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [14] 冯绍平, 李自静, 黄兆龙, 等. 云南不同地区橄榄中微量元素含量的测定与比较[J]. 北方园艺, 2014(12): 31-33.
- [15] 黎英, 尤双圳, 赖丹妮, 等. 响应面法优化超声波辅助提取状元豆多糖工艺[J]. 食品与发酵工业, 2015(4): 223-229.
- [16] 李斌. 微胶囊血红素片生产技术研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2010.
- [17] 陈洁, 杨红芸. 氨基酸促进硫酸亚铁吸收的药效学研究[J]. 华西药学杂志, 2001, 16(6): 419-420.
- [18] González - Fandos E, García - Linares M C, Villarino - Rodriguez A, et al. Evaluation of the microbiological safety and sensory quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) processed by the sous vide method [J]. Food Microbiology, 2004, 21(2): 193-201.
- [19] Witte M B, Thornton F J, Tantry U, et al. L - Arginine supplementation enhances diabetic wound healing; involvement of the nitric oxide synthase and arginase pathways [J]. Metabolism, 2002, 51(10): 1269-1273.
- [20] Saito K, Jin D H, Ogawa T, et al. Antioxidative properties of tripeptide libraries prepared by the combinatorial chemistry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(12): 3668-3674.

(上接第148页)

- Control, 2013, 32(1): 246-254.
- [11] Peleg M, Corradini MG. Microbial growth curves: what the models tell us and what they cannot [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2011, 51(10): 917-45.
- [12] 傅鹏, 马昕, 周康, 等. 热死环丝菌生长预测模型的建立[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 433-437.
- [13] 姜英杰, 邹晓葵, 彭增起. 大肠杆菌在猪背最长肌上生长预测模型的建立[J]. 食品科学, 2008, 29(12): 115-119.
- [14] 傅鹏, 李平兰, 周康, 等. 冷却肉中假单胞菌温度预测模型的建立与验证[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 229-234.
- [15] Gill C, Dussault F, Holley R, et al. Evaluation of the hygienic performances of the processes for cleaning, dressing and cooling pig carcasses at eight packing plants [J]. International Journal of Food Microbiology, 2000, 58(1): 65-72.
- [16] Farouk MM, Kemp RM, Cartwright S, et al. The initial freezing point temperature of beef rises with the rise in pH: A short communication [J]. Meat Science, 2013, 94(1): 121-124.
- [17] 张坤, 彭科怀, 杜洪凤. 分光光度法测定肉与肉制品中挥发性盐基氮[J]. 预防医学情报杂志, 2009, 25(1): 78-80.
- [18] 李苗茵. 冷却猪肉中微生物生态分析及货架期预测模型的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.

(上接第154页)

- [17] 李纪涛, 蒋一鸣, 束俊霞, 等. 不同酿酒酵母发酵的紫薯糯米酒香气成分分析[J]. 食品科学, 2014(16): 202-207.
- [18] Fan W, Qian M C. Characterization of aroma compounds of Chinese "Wuliangye" and "Jiannanchun" liquors by aroma extract dilution analysis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(7): 2695-2704.
- [19] Cabrita M J, Freitas A M C, Laureano O, et al. Glycosidic

- [19] 陈睿, 徐幸莲, 周光宏. 真空包装鸡肉早餐肠货架期预测模型的建立[J]. 食品科学, 2014, 35(6): 209-213.
- [20] 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, 35(15): 113-117.
- [21] Hong Y-K, Huang L, Yoon WB. Mathematical modeling and growth kinetics of *Clostridium sporogenes* in cooked beef [J]. Food Control, 2016, 60(7): 471-477.
- [22] 刘超群, 侯温甫, 王宏勋. 冷鲜猪肉馅中热杀索丝菌生长预测模型的建立与验证[J]. 现代食品科技, 2013(3): 483-486.
- [23] Mellefont L, McMeekin T, Ross T. Performance evaluation of a model describing the effects of temperature, water activity, pH and lactic acid concentration on the growth of *Escherichia coli* [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 82(1): 45-58.
- [24] 周康, 杨兆镭, 刘书亮, 等. 鲤鱼中腐败希瓦氏菌生长模型的建立和验证[J]. 食品科学, 2015, 36(15): 147-150.
- [25] Van Impe J, Poschet F, Geeraerd A, et al. Towards a novel class of predictive microbial growth models [J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 100(1): 97-105.
- aroma compounds of some Portuguese grape cultivars [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(6): 922-931.
- [20] Plotto A, Margaria C A, Goodner K L, et al. Odour and flavour thresholds for key aroma components in an orange juice matrix: terpenes and aldehydes [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2004, 19(6): 491-498.
- [21] 煥祿. 食品风味化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.