

清蛋糕中金黄色葡萄球菌生长预测模型的建立

胡铮璐, 陈喜生*, 罗晨曲, 仇红萍, 曾可, 李鸿勇

(娄底市食品药品检验检测所, 娄底 417000)

摘要: **目的** 建立清蛋糕中金黄色葡萄球菌生长预测模型。**方法** 选用清蛋糕和金黄色葡萄球菌作为研究对象, 比较了 6、15、25、35 °C条件下金黄色葡萄球菌在糕点中生长情况, 分别采用修正 Gompertz 模型 (SGompertz) 和修正 Logistic 模型 (SLogistic) 进行拟合, 建立清蛋糕中金黄色葡萄球菌一级生长动力学模型, 采用平方根模型和二次多项式模型描述温度与最大比生长速率 (μ_{\max}) 及延滞期 (λ) 的关系, 并进行验证。**结果** SLogistic 模型作为一级模型, 能更好描述 6~35 °C 条件下清蛋糕中金黄色葡萄球菌生长变化; 平方根模型是拟合温度与最大比生长速率的最适二级模型; 二次多项式模型是拟合温度与延滞期的最适二级模型。**结论** 本研究建立的生长预测模型能够有效预测金黄色葡萄球菌在清蛋糕中的生长情况, 为清蛋糕的定量风险评估提供参考。

关键词: 清蛋糕; 金黄色葡萄球菌; 预测模型

Establishment of growth prediction models for *Staphylococcus aureus* in plain cakes

HU Zheng-Rong, CHEN Xi-Sheng*, LUO Chen-Qu, QIU Hong-Ping, ZENG Ke, LI Hong-Yong

(Loudi Food and Drug Inspection and Testing Institute, Loudi 417000, China)

ABSTRACT: Objective To establish the growth prediction model of *Staphylococcus aureus* in plain cake. **Methods** The plain cake and *Staphylococcus aureus* were selected as the research objects, and the growth of *Staphylococcus aureus* in the pastry was compared at 6, 15, 25 and 35 °C. The growth data were fitted into the SGompertz model and the SLogistic model as primary models. The square root model combined with quadratic polynomial model was used as a secondary growth model to describe the relation between temperature and maximum specific growth rate (μ_{\max}) and the lag time (λ), and then the model was verified. **Results** As a first-level model, the SLogistic model could better describe the growth of *Staphylococcus aureus* in plain cakes at 6-35 °C. The square root model was the optimal secondary model for fitting temperature and maximum specific growth rate. The quadratic polynomial model was an optimal secondary model for fitting temperature and lag period. **Conclusion** The established model could be applied to predict the growth of *Staphylococcus aureus* in plain cakes, which provide reference for quantitative risk assessment of plain cakes.

KEY WORDS: plain cakes; *Staphylococcus aureus*; prediction model

基金项目: 湖南省食药监局食品药品安全科技项目(湘食药科 R201819)

Fund: Supported by Food and Drug Safety Science and Technology Project of Hunan Food and Drug Administration (R201819)

*通讯作者: 陈喜生, 主任药师, 主要从事食品药品安全分析。E-mail: 153856386@qq.com

*Corresponding author: CHEN Xi-Sheng, Chief Pharmacist, Loudi Food and Drug Inspection and Testing Institute, Loudi 417000, China. E-mail: 153856386@qq.com

1 引言

金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)是一种需氧或兼性厌氧的革兰氏阳性菌,在培养基中最适宜生长温度是 37 °C,最适宜生长的 pH 值是 7.4。金黄色葡萄球菌能够产生多种毒素,如溶血毒素、血浆凝固酶、肠毒素等,肠毒素是引起金黄色葡萄球菌食物中毒的主要因子^[1],金黄色葡萄球菌被世界卫生组织列为“四大食源性病原菌”之一。

微生物是导致食品腐败的重要因素,微生物的生长情况也直接影响了食品的货架期^[2]。微生物生长预测模型使用数学模型对产品中的特定腐败微生物生长进行描述,反映了微生物在不同的加工、运送以及储存的环境条件下,细菌数变化和外部环境之间的响应关系,并可对微生物的生长动力学做出预测^[3,4]。预测模型是预测微生物学的核心,分为初级(一级)模型、次级(二级)模型和三级模型。初级模型通常用来描述不同时段的微生物数量的变化规律,主要是描述微生物的生长曲线,主要参数包含初始菌落 N_0 , 迟滞期 λ , 最大比生长速率 μ_{\max} 以及稳定期时的最大菌数 N_{\max} , 常应用到的初级模型有修正的 Gompertz 模型(SGompertz)^[5], 修正的 Logistic 模型(SLogistic)^[6], Baranyi 模型^[7]等。二级模型是在一级模型的基础上建立起来的,主要描述最大比生长速率 μ_{\max} 、迟滞期 λ 随着温度、pH、水分活度和防腐剂浓度等环境因子变化的规律。常见的二级模型有平方根模型^[8], Arrhenius 关系式^[9]、响应面方程^[10]等。三级模型也称为专家系统,是基于初级模型和二级模型,通过计算机编程制作的软件,反映在既定的环境条件下,微生物数量和环境参数之间的对应关系。比较有名的微生物预测软件有美国农业部微生物食品安全研究中心开发的“Pathogen Modeling Program(PMP)”软件^[11],这个软件可以选择目的微生物,通过输入环境变量(温度、pH、 A_w 、NaCl 浓度等)的值,得到微生物的生长曲线图,延滞期和生长代时。

糕点类食品含有丰富淀粉和水分,在加工和运输储存过程中,容易遭受金黄色葡萄球菌等致病菌污染,是引起食物中毒的常见食品。糕点中金黄色葡萄球菌的污染研究较少,因此本研究选择清蛋糕这种典型的热加工糕点作为研究对象,通过拟合不同温度条件下金黄色葡萄球菌在清蛋糕中的生长情况,建立初级预测模型,同时构建温度对其生长参数最大比生长速率 μ_{\max} 及延滞期 λ 影响的二级模型,为清蛋糕为典型的热加工糕点的金黄色葡萄球菌的定量风险评估提供理论基础。

2 材料与方法

2.1 材料与仪器

2.1.1 样品来源

清蛋糕,购买于娄底市委星区麦吉西饼店,均为当日

制作。

2.1.2 仪器与培养基

SW-CJ-2FD 型洁净工作台(苏净集团苏州安泰空气技术有限公司); BHC-1300IIA2 生物安全柜(苏净集团苏州安泰空气技术有限公司); MLS-3750 立式压力蒸汽灭菌锅(三洋电机国际贸易有限公司); SPX-250B 生化培养箱(天津市泰斯特仪器有限公司); IUL Masticator CLASSIC/BASIC 无菌均质器(西班牙 IUL 公司); TP-1200A 电子天平(湘仪天平仪器设备有限公司)。

Baird-Parker 琼脂平板、亚硫酸钾卵黄增菌液、营养肉汤、营养琼脂、20 cm×32 cm 带滤网无菌均质袋(北京陆桥技术股份有限公司); 0.85%生理盐水(自制)。经质控检测均确认为合格,均在有效期内使用。

2.1.3 标准菌株

金黄色葡萄球菌 ATCC6538(美国 Microbiologics 公司)。

2.2 实验方法

2.2.1 菌悬液制备

将金黄色葡萄球菌接种到营养肉汤中,置 37 °C 恒温恒湿培养箱培养 24 h,测定菌悬液浓度(约 $10^7 \sim 10^8$ CFU/mL),用无菌生理盐水梯度稀释菌悬液至 $10^4 \sim 10^5$ CFU/mL。

2.2.2 样品制备接种、培养与计数

按无菌操作,将糕点分为 10 g/份,在无菌操作台中紫外杀菌 30 min 后装入无菌均质袋,生物安全柜中吸取 1 mL 稀释过的菌悬液($10^4 \sim 10^5$ CFU/mL)接种到上述无菌处理过的糕点上,使初始接种量为 $10^3 \sim 10^4$ CFU/g,分别置于 6、15、25、35 °C 的恒温恒湿培养箱中培养,4 种温度采样计数各 10 次,每次设 2 组重复试样,每到一个取样时间,取出试样分别加入 90 mL 无菌生理盐水,均质 2 min 后取均质液 1 mL,稀释并按照 GB 4789.10-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 金黄色葡萄球菌检验》^[12]第二法涂布计数,计数结果取重复试样平均值。

2.2.3 一级模型的建立

一级模型用于描述一定培养条件下微生物生长数量变化与时间的关系。采用 SGompertz 方程(公式 1-3)、SLogistic 方程(公式 4-6)拟合得到最大比生长速率 μ_{\max} 、延滞期 λ 等核心参数。

SGompertz 方程

$$\lg N_t = \lg N_0 + a \times \exp\{-\exp[-k \times (t - x_c)]\} \quad (1)$$

$$\mu_{\max} = \frac{a \times k}{e} \quad (2)$$

$$\lambda = x_c - \frac{1}{k} \quad (3)$$

SLogistic 方程

$$\lg N_t = \lg N_0 + \frac{a}{1 + \exp[-k \times (t - x_c)]} \quad (4)$$

$$\mu_{\max} = \frac{a \times k}{4} \quad (5)$$

$$\lambda = x_c - \frac{2}{k} \quad (6)$$

式中 $\lg(N_0)$ 为初始时间菌落数的对数值; $\lg(N_t)$ 为 t 时刻菌落数的对数值; a 为最大菌数 N_{\max} 与初始菌落 N_0 的对数值的差值($\lg(\text{CFU/g})$); x_c 为达到相对最大生长速率所需的时间, h ; k 为在时间 x_c 的相对生长速率($\lg(\text{CFU/g/h})$); μ_{\max} 为最大比生长速率($\lg(\text{CFU/g/h})$); λ 为延滞期, h ; e 取值为 2.718。

2.2.4 二级模型的建立

根据一级模型得到的糕点中金黄色葡萄球菌的最大比生长速率和迟滞期, 选择经典的平方根方程式(7)式(8)和二次多项式(9)建立二级模型。二级模型描述的是温度对微生物生长速率和延滞期影响的关系。

$$\sqrt{\mu_{\max}} = b \times (T - T_{\min}) \quad (7)$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = b_{\lambda} \times (T - T_{\min \lambda}) \quad (8)$$

$$\mu_{\max} \text{ 或者 } \lambda = a + bT + cT^2 \quad (9)$$

式中, μ_{\max} 为微生物生长的最大比生长速率($\lg(\text{CFU/g/h})$); b 为方程常数; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{\min} 为金黄色葡萄球菌最低生长温度, 即在此温度时最大比生长速率为 0; λ 为延滞期, h ;

2.2.5 预测模型评价

通过一级模型拟合得到的相关系数 r^2 并结合均方根误差(root mean square error, $RMSE$)来判断该一级模型是否适合用来建立二级模型, 通过比较偏差因子(bias factor, B_f)、准确因子(accuracy factor, A_f)对二级模型预测效果进行验证和评价。

$$B_f = 10 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_p}{x_o}}{n}} \quad (10)$$

$$A_f = 10 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left| \lg \frac{x_p}{x_o} \right|}{n}} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_o)^2}{n}} \quad (12)$$

式中, n 为观测值个数, 即实验次数, x_p 和 x_o 分别为金黄色葡萄球菌菌落数预测值和实测值。

3 结果与分析

3.1 清蛋糕中金黄色葡萄球菌一级生长预测模型

选用 SGompertz 和 SLogistic 模型为一级模型, 应用 Origin 9.0 软件对糕点中金黄色葡萄球菌生长情况进行一级模型拟合(见图 1~4), 得到其模型拟合参数(见表 1), 结果表明, SLogistic 模型和 SGompertz 都能较好地拟合热加工糕点中金黄色葡萄球菌在 6、15、25、35 $^{\circ}\text{C}$ 的生长曲线, SLogistic 模型得到的 r^2 分别为 0.9890、0.9942、0.9923、0.9918, $RMSE$ 在 0.1051~0.1638 之间, SLogistic 模型拟合度较高, 优于 SGompertz 模型, 因此本研究选用 SLogistic 模型为金黄色葡萄球菌最适的一级生长模型, 并由此计算最大比生长速率 μ_{\max} 和延滞期 λ 。

根据 SLogistic 模型拟合的清蛋糕中金黄色葡萄球菌在不同温度下的最适一级生长模型见表 2, 由此计算出来的最大比生长速率 μ_{\max} 和延滞期 λ 见表 3。由表 3 可知, 随着温度的增加, 糕点中的金黄色葡萄球菌的生长速率是逐渐增大, 在 6 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 金黄色葡萄球菌在 38.1870 h 才达到最大速率值 0.0929($\lg(\text{CFU/g/h})$), 而 35 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 金黄色葡萄球菌在 9.8631 h 就达到最大速率值 0.4337($\lg(\text{CFU/g/h})$)。随着温度增加, 糕点中的金黄色葡萄球菌的延滞期 λ 逐渐减小, 6 $^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下延滞期 λ 为 25.1831 h, 在初始接种量约为 10^3 CFU/g 条件下, 超过 24 h 才开始进入指数期; 35 $^{\circ}\text{C}$ 条件下延滞期 λ 减少至 4.0761 h, 可以预测, 气候湿热的夏季, 遭受金黄色葡萄球菌污染的糕点很快就增殖腐败。

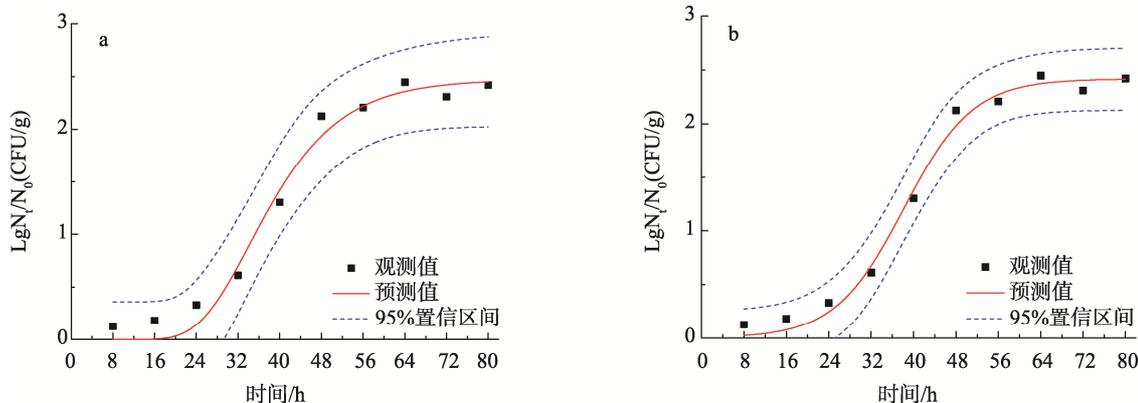


图 1 SGompertz 模型(a)和 SLogistic 模型(b)拟合的 6 $^{\circ}\text{C}$ 清蛋糕中金黄色葡萄球菌生长曲线

Fig.1 Growth curves of *Staphylococcus aureus* in plain cakes at 6 $^{\circ}\text{C}$ fitted by the SGompertz model (a) and SLogistic model (b)

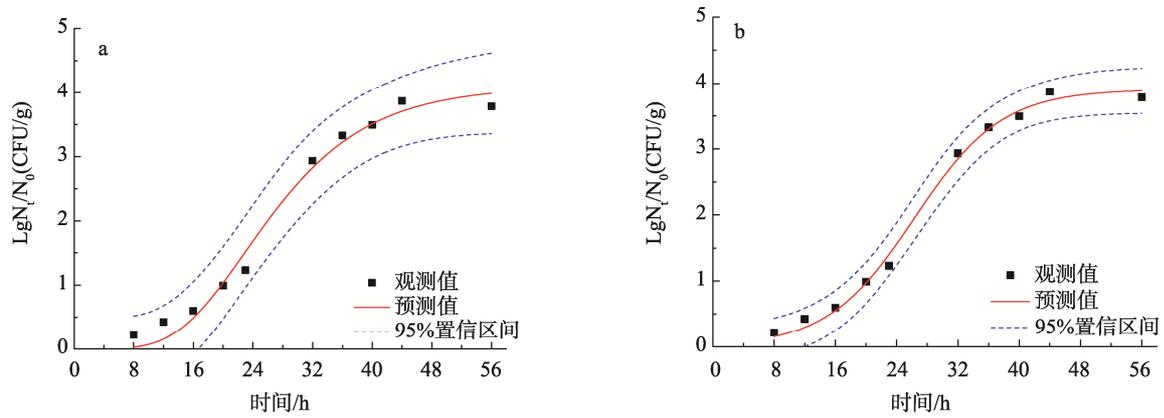


图2 SGompertz模型(a)和SLogistic模型(b)拟合的15 °C清蛋糕中糕点金黄色葡萄球菌生长曲线

Fig.2 Growth curves of *Staphylococcus aureus* in plain cakes at 15 °C fitted by the SGompertz model (a) and SLogistic model (b)

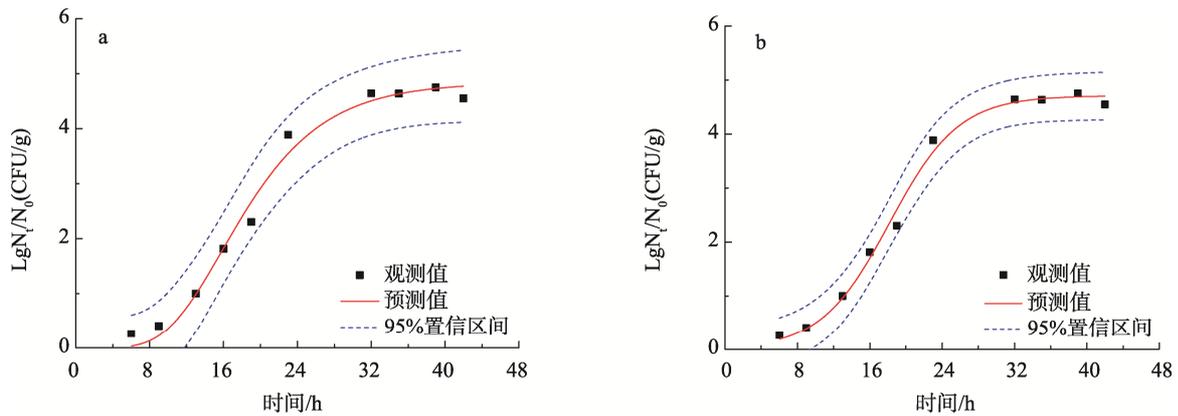


图3 SGompertz模型(a)和SLogistic模型(b)拟合的25 °C清蛋糕中金黄色葡萄球菌生长曲线

Fig.3 Growth curves of *Staphylococcus aureus* in plain cakes at 25 °C fitted by the SGompertz model (a) and SLogistic model (b)

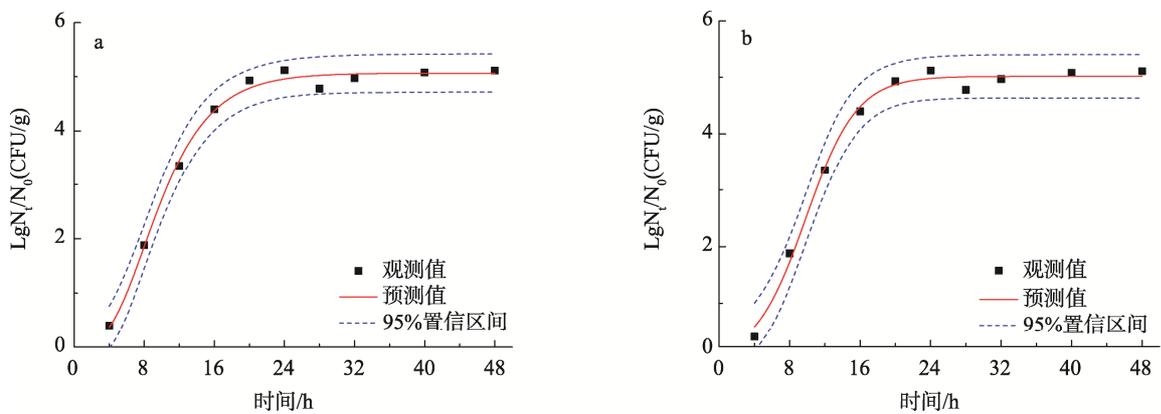


图4 SGompertz模型(a)和SLogistic模型(b)拟合的35 °C清蛋糕中金黄色葡萄球菌生长曲线

Fig.4 Growth curves of *Staphylococcus aureus* in plain cakes at 35 °C fitted by the SGompertz model (a) and SLogistic model (b)

表 1 清蛋糕中金黄色葡萄球菌的一级生长动力学参数
Table 1 Parameters of primary growth kinetics model of *Staphylococcus aureus* in plain cakes

温度/°C	模型	系数			RMSE	r ²
		a	x _c	k		
6	SGompertz	2.4727	34.2727	0.1025	0.1519	0.9770
	SLogistic	2.4168	38.1870	0.1538	0.1051	0.9890
15	SGompertz	4.0954	22.9161	0.1092	0.2058	0.9816
	SLogistic	3.9041	26.3103	0.1750	0.1156	0.9942
25	SGompertz	4.8384	15.8410	0.1634	0.2384	0.9837
	SLogistic	4.7123	18.1865	0.2615	0.1638	0.9923
35	SGompertz	5.0665	8.0097	0.2398	0.1346	0.9932
	SLogistic	5.0195	9.8631	0.3456	0.1485	0.9918

表 2 清蛋糕中金黄色葡萄球菌生长的最适一级生长模型
Table 2 The optimal primary growth model of *S. aureus* in plain cakes

温度/°C	模型方程
6	$\lg(N_t / N_0) = + \frac{2.4168}{1 + \exp[-0.1538 \times (t - 38.1870)]}$
15	$\lg(N_t / N_0) = + \frac{3.9041}{1 + \exp[-0.1750 \times (t - 26.3103)]}$
25	$\lg(N_t / N_0) = + \frac{4.7123}{1 + \exp[-0.2615 \times (t - 18.1865)]}$
35	$\lg(N_t / N_0) = + \frac{5.0195}{1 + \exp[-0.3456 \times (t - 9.8631)]}$

表 3 最适模型所得不同温度条件下的生长参数
Table 3 Kinetic growth parameters estimated by the optimal model at different temperatures

温度/°C	μ _{max} /(lg(CFU/g)/h)	λ/h
6	0.0929	25.1831
15	0.1708	14.8817
25	0.3081	10.5383
35	0.4337	4.0761

3.2 糕点中金黄色葡萄球菌二级生长预测模型

分别采用平方根和二次多项式模型作为二级模型, 分别对最大比生长速率 μ_{max}、迟滞期 λ 与温度的关系进行拟合, 结果如图 5、图 6 所示。修正决定系数 r² 可以用来评价预测模拟的拟合程度, 愈接近 1, 拟合度愈高^[13]。由图 5 所示, 选择平方根和二次多项式对温度与最大比生长速率 μ_{max} 关系拟合, 相应的 r² 分别为 0.9948, 0.9932, 由图 6 所示, 选择平方根和二次多项式对温度与迟滞期 λ 关系拟合, 相应的 r² 分别为 0.8553, 0.9469。

3.3 模型评价

偏差因子 B_f 一般作为判断预测模型偏差度的参数, 表明了所建预测模型的结果性偏差^[14]。B_f 在 0.90~1.05 之间, B_f 越接近 1, 模型越可靠; 如果 B_f 值在 0.70~0.90 或者 1.06~1.15 范围内, 该模型也可以接受。准确因子 A_f 一般用来验证预测模型的准确度, 衡量预测值和观测值之间的接近程度。A_f=1 表明所有预测值和观测值均相等^[15], A_f 值越大, 表明该模型预测的平均精确度越低^[14], Braun 等^[16]认为 A_f 值在 1.1~1.9 之间, 模型均可以接受。

表 4 中温度与最大比生长速率 μ_{max} 的关系所建立的平方根模型和二次多项式模型相应的 A_f 值分别为 1.0127 和 1.0326, B_f 值分别为 0.9948 和 0.9932, 综合各参数, 平方根模型更好的拟合温度与最大比生长速率 μ_{max}。温度与迟滞期 λ 的关系所建立的平方根模型和二次多项式模型相应的 A_f 值分别为 1.0983 和 1.0904, B_f 值分别为 0.9965 和 1.0091, 综合各参数, 二次多项式模型更好的拟合温度与迟滞期 λ。

4 结论与讨论

本研究选择了 6、15、25、35 °C 4 个温度, 将金黄色葡萄球菌接种在新鲜制作糕点中, 采用 SGompertz、SLogistic 这 2 种常见的初级预测模型, 经过动力学指标分析, 结果显示 SLogistic 拟合的 r² 均在 0.989 以上, 均方根误差 RMSE 均小于 0.2, 因此选择 SLogistic 模型为建立金黄色葡萄球菌的一级模型。在此基础上, 分别采用平方根和二次多项式模型研究了温度与最大比生长速率 μ_{max} 和迟滞期 λ 之间的关系。由 SLogistic 模型为拟合得到的最大比生长速率 μ_{max} 和迟滞期 λ 建立二级生长模型, 结果显示, 平方根模型能更好地拟合温度与最大比生长速率 μ_{max}, 相应的平方根模型是 $\sqrt{\mu_{\max}} = 0.0124T + 0.2319$; 二次多项式模型能更好地拟合温度与迟滞期 λ, 相应的二次多项式模型是 $\lambda = 0.0119T^2 - 1.1814T + 31.3363$ 。

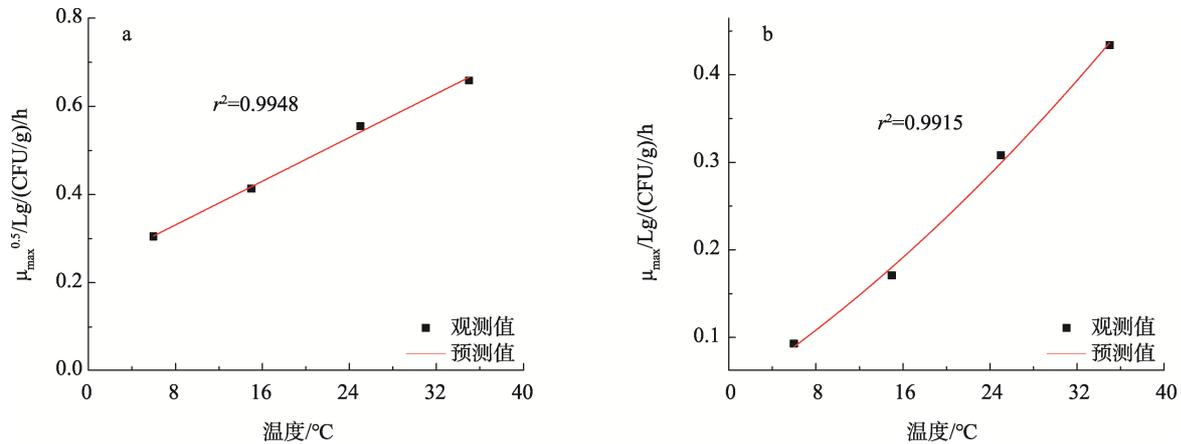
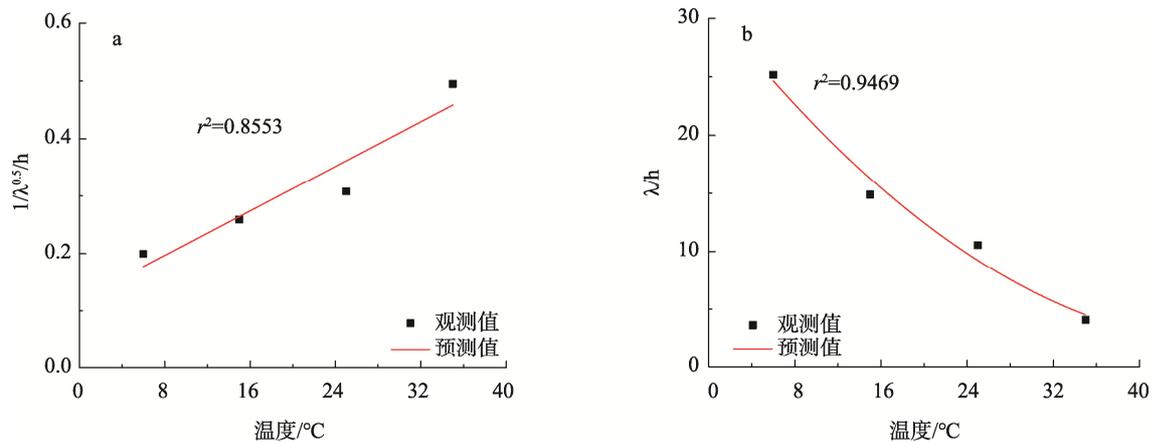
图5 平方根模型和二次多项式模型拟合的清蛋糕中 μ_{\max} 与生长温度的关系曲线Fig.5 Relation curve of μ_{\max} and growth temperature in clear cake fitted by square root model and quadratic polynomial model图6 平方根模型和二次多项式模型拟合的清蛋糕中迟滞期 λ 与生长温度的关系曲线Fig.6 Relation curve of hysteresis period λ and growth temperature in clear cake fitted by square root model and quadratic polynomial model

表4 清蛋糕中金黄色葡萄球菌生长二级模型参数的建立及验证

Table 4 Developments and validation of secondary models to predict the level of *Staphylococcus aureus* in plain cakes

参数	模型	方程	R^2	B_f	A_f
μ_{\max}	平方根模型	$\sqrt{\mu_{\max}} = 0.0124T + 0.2319$	0.9948	1.0006	1.0127
μ_{\max}	二次多项式模型	$\mu_{\max} = 9.3938 \times 10^{-5}T^2 + 0.0081T + 0.03738$	0.9932	0.9983	1.0326
λ	平方根模型	$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = 0.0097T + 0.1190$	0.8553	0.9965	1.0983
λ	二次多项式模型	$\lambda = 0.0119T^2 - 1.1814T + 31.3363$	0.9469	1.0091	1.0904

为了有效防控金黄色葡萄球菌对食品的污染,相关学者对不同食品^[17-19]中金黄色葡萄球菌的生长预测模型进行了相关研究,各种模型的预测准确性均随着食品环境的不同而呈现出较大的差异。王亭亭等^[20]以传统面制品馒头作为研究对象,采用SGompertz和SLogistic作为一级生长模型,拟合馒头中金黄色葡萄球菌10、15、25、30和37℃的生长情况,结果表明,SGompertz模型能较好地拟

合馒头中金黄色葡萄球菌的生长,二次多项式模型的拟合最大比生长速率 μ_{\max} 和迟滞期 λ 效果较好;胡洁云等^[21]测定不同初始接种浓度金黄色葡萄球菌在15~36℃熟鸡肉的生长数据,分别建立SGompertz、Logistic和Baranyi模型,通过比较残差和拟合度选择出SGompertz为最优模型,再在此基础上通过响应面方程建立二级模型,并对模型可靠性进行了外部和内部的实验验证。Ding等^[22]研究了7~30℃

金黄色葡萄球菌在紫菜包饭中的生长预测, 分别建立 SGompertz、Logistic 模型, 通过比较拟合度, 均方误差等参数, 选择 SGompertz 为初级模型, 在此基础上建立的二级模型的均方根误差小于 0.20, 偏差因子, 准确因子均于可接受范围内。

本研究结果对预测和监控金黄色葡萄球菌在清蛋糕中的生长繁殖, 保证糕点食品安全性等方面具有参考价值。在此基础上, 冷加工糕点中金黄色葡萄球菌生长预测模型以及金黄色葡萄球菌增殖产肠毒素风险还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 柳旭伟, 葛文霞. 金黄色葡萄球菌肠毒素[J]. 微生物学杂志, 2008, 28(5): 86-90.
Liu XW, Ge WX. Enterotoxins of *Staphylococcus aureus* [J]. J Microbiol, 2008, 28(5): 86-90.
- [2] 宋晨, 刘宝林, 董庆利. 冷冻食品货架期研究现状及发展趋势[J]. 食品科学, 2010, 31(1): 258-261.
Song C, Liu BL, Dong QL. Current research and development trend for shelf life of frozen food [J]. Food Sci, 2010, 31(1): 258-261.
- [3] Dalggaard P. Modelling of microbial activity and prediction of shelf life for packed fresh fish [J]. Int J Food Microbiol, 1995, 26(3): 305.
- [4] 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, (21): 268-272.
Wang J, Dong QL, Ding T. An overview of evaluation methods for predictive microbial growth models [J]. Food Sci, 2011, (21): 268-272.
- [5] Zwietering MH, Jongenburger I, Rombouts FM, et al. Modeling of the bacterial growth curve [J]. Appl Environ Microbiol, 1990, 56(6): 1875-1881.
- [6] 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.
- [7] Baranyi J, Roberts TA. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food [J]. Int J Food Microbiol, 1994, 23(3-4): 277-294.
- [8] Mcmeekin TA, Chandler RE, Doe PE, et al. Model for combined effect of temperature and salt concentration/water activity on the growth rate of *Staphylococcus xylosum* [Z].
- [9] Davey KR. A predictive model for combined temperature and water activity on microbial growth during the growth phase [J]. J Appl Microbiol, 2010, 67(5): 483-488.
- [10] Whiting RC. Microbial modeling in foods [J]. CRC Crit Rev Food Technol, 1995, 35(6): 467-494.
- [11] Baranyi J, Ross T, Mcmeekin TA, et al. Effects of parameterization on the performance of empirical models used in 'predictive microbiology' [J]. Food Microbiol, 1996, 13(1): 83-91.
- [12] GB 4789.10-2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验金黄色葡萄球菌检验[S]
GB 4789.10-2016 National food safety standard-Food microbiological examination *Staphylococcus aureus* [S].
- [13] Davey KR, Daughtry BJ. Validation of a model for predicting the combined effect of three environmental factors on both exponential and lag phases of bacterial growth: temperature, salt concentration and pH [J]. Food Res Int, 1995, 28(3): 233-237.
- [14] Ross T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology [J]. J Appl Bacteriol, 2010, 81(5): 501-508.
- [15] Lebert I, Robles-Olvera V, Lebert A. Application of polynomial models to predict growth of mixed cultures of *Pseudomonas spp.* and *Listeria* in meat [J]. Int J Food Microbiol, 2000, 61(1): 27-39.
- [16] Braun P, Sutherland JP. Predictive modelling of growth and enzyme production and activity by a cocktail of *Pseudomonas spp.*, *Shewanella putrefaciens* and *Acinetobacter sp.* [J]. Int J Food Microbiol, 2003, 86(3): 271-282.
- [17] 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.
Meng Y, Ma JW, Liao C, et al. Establishment of growth predictive model of *Staphylococcus aureus* in Liangpi [J]. Mod Food Sci Technol, 2018, (4): 198-205.
- [18] 李博, 满朝新, 赵凤, 等. 原料乳中金黄色葡萄球菌生长预测模型的建立[J]. 食品科学, 2011, (15): 158-162.
Li B, Man ZX, Zhao F, et al. Predictive modeling of *Staphylococcus aureus* growth in raw milk [J]. Food Sci, 2011, (15): 158-162.
- [19] 汪慧春, 黄和, 刘亚, 等. 面包虾中金黄色葡萄球菌生长预测模型的建立[J]. 广东农业科学, 2014, (22): 104-108.
Wang HC, Huang H, Liu Y, et al. Construction of predictive model for the growth of *Staphylococcus aureus* in bread shrimp [J]. Guangdong Agric Sci, 2014, (22): 104-108.
- [20] 王亭亭, 曹慧, 徐斐, 等. 馒头中金黄色葡萄球菌生长预测模型的建立[J]. 微生物学杂志, 2015, (6): 49-55.
Wang TT, Cao H, Xu F, et al. Establishment of growth model of *Staphylococcus aureus* in steamed buns [J]. J Microbiol, 2015, (6): 49-55.
- [21] 胡洁云, 林露, 王彤, 等. 熟鸡肉中金黄色葡萄球菌生长预测模型的建立[J]. 微生物学通报, 2016, (9): 1999-2009.
Hu JY, Lin L, Wang T, et al. Model for predicting *Staphylococcus aureus* growth in cooked chicken [J]. J Microbiol China, 2016, (9): 1999-2009.
- [22] Ding T, Shim YH, Kim HN, et al. Development of predictive model for the growth of *Staphylococcus aureus* in Kimbab [J]. Food Sci Biotechnol, 2011, 20(2): 471-476.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



胡铮瑒, 工程师, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: hzrtc2000@163.com



陈喜生, 主任药师, 主要从事食品药品安全分析。

E-mail: 153856386@qq.com