

鱼肉中沙门氏菌生长预测模型的建立

陈仕佳¹, 马 箐¹, 付晓焰¹, 胡文波¹, 顾 菊¹, 高 雪¹, 杨 潇², 代 娟^{1*}

(1. 成都医学院检验医学院, 成都 610500; 2. 西华大学食品与生物工程学院, 成都 610039)

摘 要: 目的 研究沙门氏菌在鱼肉中的生长情况并拟合一级和二级生长预测模型。**方法** 以鱼肉样品为研究对象, 接种 4 种不同血清型的沙门氏菌混合菌, 并置于不同温度下培养。选择修正的 SGompertz 和修正的 SLogistic 的模型为一级模型, 用 Origin 8.5 软件拟合生长数据, 通过拟合的模型参数, 计算出最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 和迟滞期 λ 。再选用二次多项式和平方根模型为二级模型, 分别拟合 $\mu_{\max}$ 和 λ 与温度之间的二级模型, 并使用参数相关系数 R^2 、准确度(accuracy factor, A_f)、偏差度(bias factor, B_f)进行模型验证。**结果** SGompertz 模型相关系数 R^2 均在 0.98 以上。以平方根模型建立的二级模型中, $\mu_{\max}$ 的 R^2 、 B_f 和 A_f 分别为 0.9114、0.772 和 0.772, λ 的 R^2 、 B_f 和 A_f 分别为 0.8319、0.823 和 0.823; 以二次多项式模型建立的二级模型中, $\mu_{\max}$ 的 R^2 、 B_f 和 A_f 分别为 0.960、0.976 和 1.104, λ 的 R^2 、 B_f 和 A_f 分别为 0.962、1.111 和 1.111。**结论** 通过 SGompertz 模型建立的一级模型和二次多项式拟合的二级模型可对鱼肉样品中沙门氏菌的生长情况进行较好地模拟, 为掌握沙门氏菌在鱼肉样品中的生长繁殖规律以及为鱼肉样品的贮藏保鲜提供科学依据。

关键词: 鱼肉; 预测微生物学; 沙门氏菌; 生长曲线; 预测模型

Establishment of prediction model for the growth of *Salmonella* in fish meat

CHEN Shi-Jia¹, MA Zheng¹, FU Xiao-Yan¹, HU Wen-Bo¹, GU Ju¹, GAO Xue¹,
YANG Xiao², DAI Juan^{1*}

(1. School of Laboratory Medicine, Chengdu Medical College, Chengdu 610500, China;
2. School of Food and Bioengineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

ABSTRACT: Objective To study the growth of *Salmonella* in fish meat and fit the primary and secondary growth prediction models. **Methods** Fish meat samples were taken as the object of study, inoculating 4 kinds of different serotypes of *Salmonella* mixed bacteria and culturing at different temperatures. The model with modified SGompertz and modified SLogistic was chosen as the primary model and the growth data were fitted with Origin 8.5 software to calculate the maximum specific growth rate $\mu_{\max}$ and hysteresis λ by the fitted model parameters. The quadratic polynomial and square root models were then chosen as the secondary models, and the models between $\mu_{\max}$ and λ and temperature were fitted respectively and validated using the parameter correlation coefficient R^2 , accuracy factor (A_f) and bias factor (B_f). **Results** The correlation coefficient R^2 of SGompertz model were all above 0.98. The R^2 , B_f and A_f for $\mu_{\max}$ were 0.9114, 0.772 and 0.772, respectively, and the R^2 , B_f and A_f for λ were 0.8319, 0.823 and 0.823, respectively in the secondary model built with the square root model, the R^2 , B_f and A_f for $\mu_{\max}$ were 0.960, 0.976 and

基金项目: 四川省科技厅基金项目(2020YFN0153)、四川省大学生创新创业计划项目(S201913705122)

Fund: Supported by the Science and Technology Program of Sichuan Province (2020YFN0153), and the Sichuan Province College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program (S201913705122)

*通信作者: 代娟, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: daijuan_2004_2007@126.com

*Corresponding author: DAI Juan, Ph.D, Associate Professor, School of Laboratory Medicine, Chengdu Medical College, No.783, Xindu Dadao, Xindu District, Chengdu 610500, China. E-mail: daijuan_2004_2007@126.com

1.104, respectively, and the R^2 , B_f and A_f for λ were 0.962, 1.111 and 1.111, respectively in the secondary model built with a quadratic polynomial model. **Conclusion** The SGompertz model and the quadratic polynomial are used for fitting primary model and the secondary model respectively, this study establishes a model for the growth of *Salmonella* in fish meat samples to provide a scientific basis for understanding the growth and reproduction patterns of *Salmonella* in fish meat samples and for the storage and preservation of fish meat samples.

KEY WORDS: fish meat; predictive microbiology; *Salmonella*; growth curves; predictive model

0 引 言

我国是水产品生产、贸易和消费大国, 2020 年我国水产品总产量达到 6549 万 t^[1]。鱼肉因其富含水分、高度不饱和脂肪酸和高活性内源酶等原料学特性, 而外源微生物与内源酶进行联合使得鱼肉极易发生腐败变质, 特别是沙门氏菌污染较普遍^[2-3]。沙门氏菌(*Salmonella*)是一种重要的人兽共患病原菌, 其引起的食源性疾病居于细菌性食物中毒的首位^[4-5]。日本、美国等发达国家 40%~80% 食物中毒事件是由沙门氏菌引起, 在中国该比例约为 90%^[6]。肉类食品, 特别是鱼肉感染沙门氏菌风险较高^[7]。水产鱼类的新鲜度不仅直接影响其市场价格^[8], 也可能会导致食源性疾病的发生, 贮藏温度、时间等因素都是影响鱼肉质量和细菌滋生的敏感因素^[9]。基于敏感指标的变化对鱼肉的货架期进行建模, 为预防沙门氏菌污染鱼肉导致的食物安全事件的发生、研究沙门氏菌在鱼肉中的生长情况、对鱼肉品质快速预测和评估、保障鱼肉食品安全具有十分重要的意义^[10-11]。传统的检测方法有免疫学方法、分子生物学方法、显色培养基法等^[12-14], 然而, 这些方法费时费力、检测结果严重滞后, 鱼肉中所污染沙门氏菌的生长繁殖规律尚不清楚, 政府管理部门难以进行有效防控。

预测微生物学模型根据食品在加工、流通及储藏过程中的环境参数, 利用数学模型定量分析食品中病原菌生长规律, 判断该食品微生物生长的动态变化, 从而快速对该食品的安全风险做出评估^[15]。由于预测模型误差低于实验室数据, 对食品安全风险预警简便、快捷、准确、高效等优点, 在我国发展迅速^[16-18]。微生物预测模型分为生长和失活模型, 每种模型又包含一级、二级和三级模型, 3 种层次模型表示内容和含义各不相同。通常情况下, 一级模型展示微生物在稳定条件下的生长与时间的相关性, 二级模型展现变化的环境因素对微生物生长的影响^[19], 而三级模型则结合一、二级模型的数据, 建立计算机应用程序, 能够更加全面地预测微生物的生长情况。蓝蔚青等^[20]采用修正的 Gompertz 方程建立不同贮藏温度下鲈鱼希瓦氏菌与假单胞菌数动态变化, 并分别以 Belehraddek 平方根方程和 Arrhenius 方程建立微生物生长预测模型。郑婷等^[21]进行了牛肉中沙门氏菌的生长动力学模型相关研究, 建立了 Linear 方程或修正的 Gompertz 方程的一级模型以及 Ratkowsky 平方根方程的二级模型。赵楠等^[22]研究了酱卤肉

中沙门氏菌和单核细胞增生李斯特菌的生长特性, 同时建立了一级、二级预测模型。张莉等^[23]建立了鲜猪肉冷藏过程中沙门氏菌生长预测模型。曾巧辉等^[24]采用 Logistic 模型、Gompertz 模型及 Ratkowsky 二级模型, 以熟鸡肉为载体对其中的沙门氏菌进行拟合研究, 并预测相应货架期, 但有关鱼肉中沙门氏菌生长预测模型的研究尚欠缺。本研究探究了沙门氏菌在鱼肉样品中的生长规律, 采用不同模型模拟其生长情况, 建立沙门氏菌在鱼肉样品中的生长模型, 为掌握沙门氏菌在鱼肉样品中的生长繁殖规律及为鱼肉样品的贮藏保鲜提供科学依据, 也为三级模型的建立提供一定的数据基础。

1 材料与方法

1.1 菌种与材料

沙门氏菌(H9812), 由四川省疾病预防控制中心微检所提供; 乙型副伤寒沙门菌、肯塔基沙门氏菌、阿贡纳沙门氏菌, 于样品中分离纯化。

鲜活草鱼采购于成都市新都区某大型超市。

HE 选择培养基、蛋白胨(北京陆桥技术股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

HG400VW 型拍击式均质器(德国 WIGENS 公司); BIOsafe12 生物安全柜(上海力申科学仪器有限公司); SW-CJ 超净工作台(苏州安泰空气技术有限公司); HVE50 型高压灭菌锅(日本 HIRAYAMA 公司); LE2002E/02 电子分析天平(精度 10 mg, 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司); HPX-9272MBE 电热恒温培养箱(上海博讯实业有限公司医疗设备厂); MDF-382E(N)超低温冰箱(日本 SANYO 公司)。

1.3 方 法

1.3.1 样品前处理

将超市购置的活鱼去除内脏、鱼骨及鱼皮, 取草鱼肉中段。紫外正反面照射 30 min, 于 75%酒精浸泡 5 min。取鱼肉样品 25.0 g, 放入 4℃冰箱保存待用。

1.3.2 菌悬液制备

取不同菌株蛋白胨溶液, 调整 OD₆₀₀ 为 0.6, 等比例混合。用无菌生理盐水将混合菌液梯度稀释, 最终制成浓度为 10¹~10³ CFU/mL 的菌悬液, 待用。

1.3.3 培养与计数

将不同浓度的菌悬液 1 mL 接种于鱼肉表面, 转移至

无菌均质袋中,置于 4、12、25、30、35 °C 培养箱分别培养,间隔一定时间取出。取 100 mL 蛋白胨溶液于含样品的均质袋中,拍击式均质 2 min,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》于 HE 选择培养基平板进行菌落计数。

1.3.4 沙门氏菌一级生长预测模型的建立

采用修正的 SGompertz(公式 1)和修正的 SLogistic(公式 2)的模型为一级模型,用 Origin 8.5 软件对 4、12、25、30、35 °C 下鱼肉中沙门氏菌的生长数据进行拟合,确定鱼肉中沙门氏菌的最适一级模型,计算沙门氏菌在鱼肉中的最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 和迟滞期 λ 。修正的 SGompertz 模型采用公式(3)和公式(4)计算,修正的 SLogistic 的模型采用公式(5)和公式(6)计算。

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

$$\lg \frac{N_t}{N_0} = \frac{a}{1 + \exp[-k \times (t - X_c)]} \quad (2)$$

$$\mu_{\max} = a \times \frac{k}{e} \quad (3)$$

$$\lambda = X_c - \frac{1}{k} \quad (4)$$

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

$$\lambda = X_c - \frac{3}{k} \quad (6)$$

式中, N_t 和 N_0 分别为 t 时和初始时间的菌数, CFU/g; a 为稳定期微生物数量与接种时菌数的差值; 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(斜率); $\mu_{\max}$ 为最大比生长速率, $\lg(\text{CFU/g})/\text{h}$; λ 为迟滞期, h。

1.3.5 沙门氏菌二级生长预测模型的建立

根据一级模型参数计算得到鱼肉中沙门氏菌的最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 和迟滞期 λ , 采用二次多项式模型(quadratic polynomial model)分别拟合它们与温度之间的关系, 采用公式(7)、(8):

$$\mu_{\max} = a + b \times T + c \times T^2 \quad (7)$$

$$\lambda = a + b \times T + c \times T^2 \quad (8)$$

式中: T 为生长温度, °C; a 、 b 、 c 为模型的参数。

再利用平方根模型(square root model)分别拟合它们与温度之间的关系, 采用公式(9)、(10):

$$\sqrt{\mu_{\max}} = b(T - T_{\min}) \quad (9)$$

$$\sqrt{\frac{1}{k}} = b(T - T_{\min}) \quad (10)$$

式中: T 为生长温度, °C; $T_{\min}$ 是理论上沙门氏菌生长的最低温度, 4 °C; b 为模型的参数。

1.3.6 沙门氏菌生长模型的验证

一级模型采用相关系数 R^2 、残差平方和 RSS 判断拟合程度的好坏。

二级模型采用相关系数 R^2 、参数偏差度(bias factor, B_f)、准确度(accuracy factor, A_f)进行模型拟合程度好坏的评价。应用建立的生长动力学模型求得的预测值和实验中实际的沙门氏菌生长数值进行计算, 采用公式(11)、(12):

$$B_f = 10^{\sum \lg \frac{\text{predicted}/\text{observed}}{n}} \quad (11)$$

$$A_f = 10^{\sum \lg \frac{|\text{predicted}/\text{observed}|}{n}} \quad (12)$$

式中, observed: 实验实际测得的值; predicted: 根据所得模型预测得到的值; n : 实验次数。

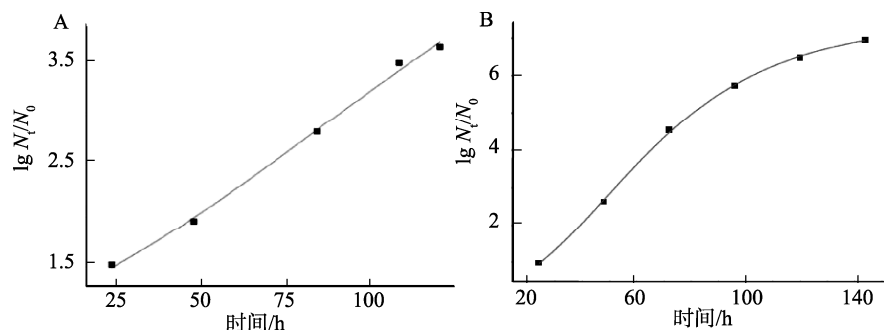
1.3.7 数据处理与分析

每个时间点的菌落计数数据采用平均值表示($n=3$), 生长预测模型采用 Origin 8.5 数据统计软件进行数据处理和拟合曲线作图。回归模型的系数采用 t 检验; 对模型贡献程度采用 Shapley 值法进行计算; 模型构建过程中产生的数据保留小数点后 5 位。

2 结果与分析

2.1 沙门氏菌的一级生长预测模型

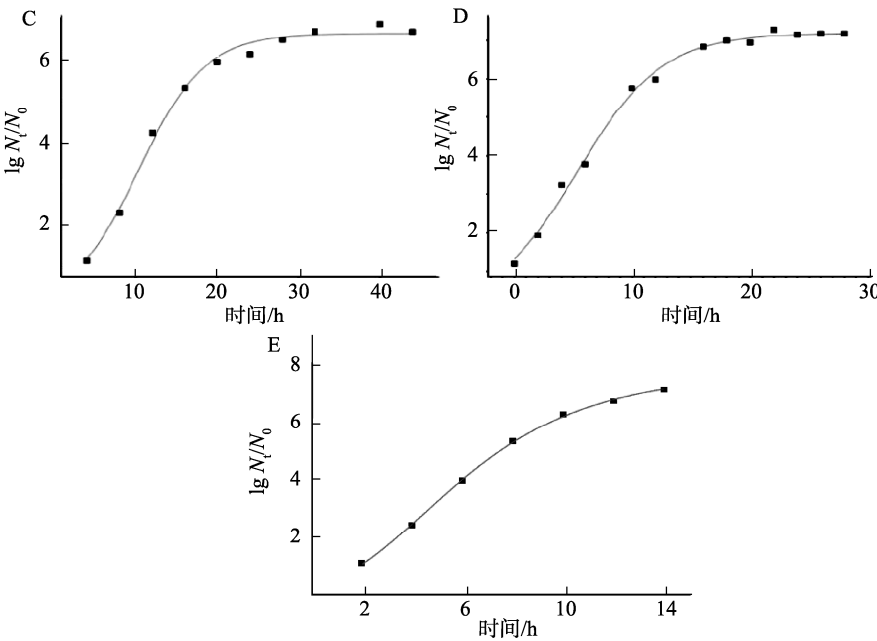
对 4、12、25、30、35 °C 下鱼肉中沙门氏菌的生长数据进行 SGompertz 模型和 SLogistic 模型拟合, 生长曲线见图 1、2, 沙门氏菌生长动力模型参数见表 1。



注: A, 4 °C; B, 12 °C; C, 25 °C; D, 30 °C; E, 35 °C, 图 2 同。

图 1 SGompertz 模型拟合的鱼肉中沙门氏菌在 4、12、25、30、35 °C 的生长曲线

Fig.1 Growth curves of *Salmonella* in fish meat at 4, 12, 25, 30 and 35 °C fitted by the SGompertz model



注: A, 4 °C; B, 12 °C; C, 25 °C; D, 30 °C; E, 35 °C, 图 2 同。

图 1(续) SGompertz 模型拟合的鱼肉中沙门氏菌在 4、12、25、30、35 °C 的生长曲线

Fig.1 Growth curves of *Salmonella* in fish meat at 4, 12, 25, 30 and 35 °C fitted by the SGompertz model

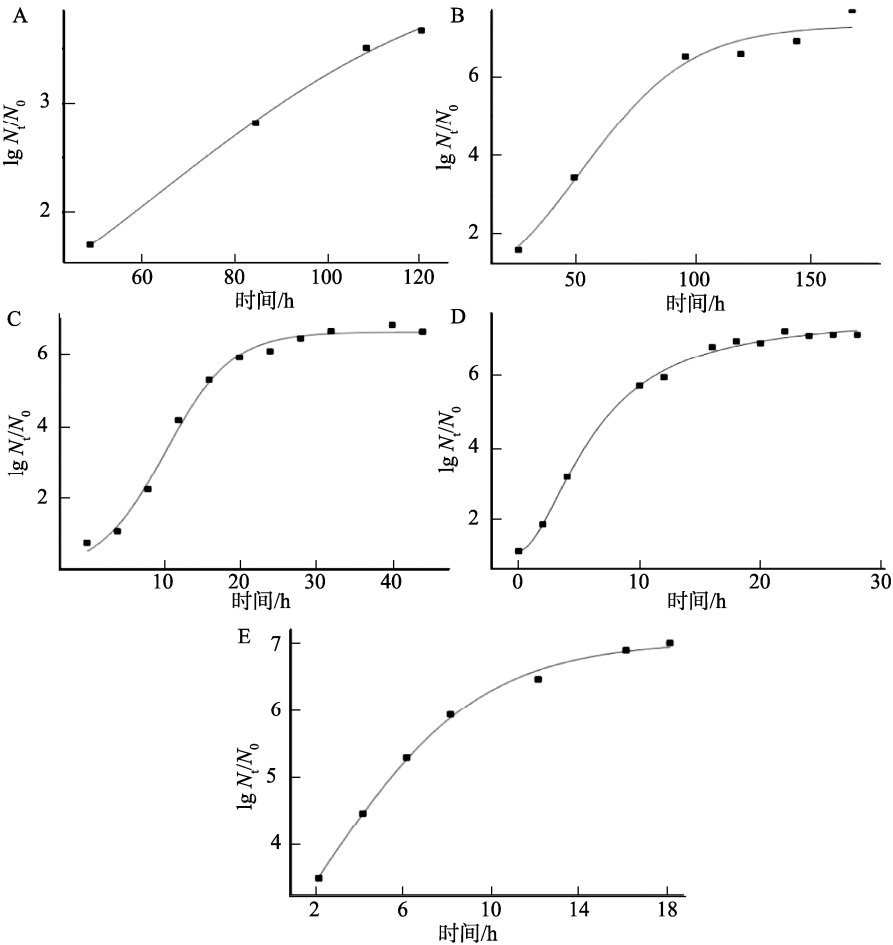


图 2 SLogistic 模型拟合的鱼肉中沙门氏菌在 4、12、25、30、35 °C 的生长曲线

Fig.2 Growth curves of *Salmonella* in fish meat at 4, 12, 25, 30 and 35 °C fitted by the SLogistic model

根据两种模型拟合的沙门氏菌在不同温度下的生长曲线可以看出,沙门氏菌生长曲线均呈“S”型,说明温度对沙门氏菌的生长影响较大,在实验温度范围内,温度越高,达到相同的最大比生长速率所需时间越短。在 4 ℃条件下,有效抑制了沙门氏菌的生长,可能是因为低温能够抑制微生物体内酶的活性,从而延长其生长速率^[25],这与 FANG 等^[26]和曾巧辉等^[24]的研究结果一

致。而在 35 ℃条件下,沙门氏菌生长速率最高。故在鱼肉流通销售过程中,为降低沙门氏菌食品安全的风险,应将鱼肉低温保存。

由表 1 可知,两种模型对鱼肉中沙门氏菌生长情况拟合较好,根据 RSS 较小和 R^2 接近 1 的评价标准,择优选用 SGompertz 作为一级模型,能更好地反映新鲜鱼肉沙门氏菌的生长规律,见表 2。

表 1 鱼肉中沙门氏菌的一级生长模型拟合参数
Table 1 Parameters fitted to the primary growth model for *Salmonella* in fish meat

温度/℃	模型分类	系数			RSS	R^2
		a	X_c	k		
4	SGompertz	5.78804	86.27753	0.01722	0.00536	0.99404
4	SLogistic	4.34853	62.98389	0.03022	0.00327	0.99592
12	SGompertz	7.39413	48.36822	0.02878	0.11346	0.98085
12	SLogistic	7.17728	50.97346	0.04264	0.13227	0.97537
25	SGompertz	6.66646	10.31319	0.24365	0.03202	0.99214
25	SLogistic	6.69353	10.28617	0.23095	0.03685	0.99320
30	SGompertz	7.18508	5.37524	0.27656	0.02508	0.99475
30	SLogistic	7.16978	5.24229	0.28059	0.02487	0.99494
35	SGompertz	7.61457	4.50447	0.28341	0.00712	0.99086
35	SLogistic	7.08187	2.04166	0.27379	0.00680	0.99616

表 2 鱼肉中沙门氏菌的最适一级生长模型
Table 2 Optimal primary growth model for *Salmonella* in fish meat

温度/℃	SGompertz 模型
4	$\lg(N_t/N_0)=5.78804\times\exp\{-\exp[-0.01722\times(t-86.27753)]\}$
12	$\lg(N_t/N_0)=7.39413\times\exp\{-\exp[-0.02878\times(t-48.36822)]\}$
25	$\lg(N_t/N_0)=6.66646\times\exp\{-\exp[-0.24365\times(t-10.31319)]\}$
30	$\lg(N_t/N_0)=7.18508\times\exp\{-\exp[-0.27656\times(t-5.37524)]\}$
35	$\lg(N_t/N_0)=7.61457\times\exp\{-\exp[-0.28341\times(t-4.50447)]\}$

按公式(3)和(4),计算出最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 和迟滞期 λ 。由表 3 可知,在 4 ℃条件下,鱼肉中沙门氏菌的 $\mu_{\max}$ 仅为 0.036667666,35 ℃时为 0.793895186,远高于 4 ℃的值,故随着温度的增加,鱼肉中沙门氏菌的生长速度逐渐增大,且从 12 ℃到 25 ℃增速较快。同时迟滞期 λ 随着温度的升高而降低。殷玉洁等^[27]研究表明:在鲜猪肉中沙门氏菌生长动力模型证实生长速率与迟滞期对温度都具有较强的关联性。由于迟滞期 λ 参数的模型构建受到多种环境因素的影响,如菌种的预先活化、菌种的初始接种浓度(对数期迟滞期小,稳定期和饥饿细胞迟滞期长)等^[28-29]。目前大部分预测模型准确预测迟滞期变化较困难。

表 3 鱼肉中沙门氏菌的 SGompertz 模型得到的不同温度下的生长参数

Table 3 Growth parameters at different temperatures obtained from the SGompertz model for *Salmonella* in fish meat

温度/℃	$\mu_{\max}/\lg(\text{CFU/g})/\text{h}$	λ/h
4	0.036667666	28.20552
12	0.078285348	13.621868
25	0.597558303	6.208942
30	0.731037350	1.759388
35	0.793895186	0.976013

2.2 鱼肉中沙门氏菌的二级生长预测模型

2.2.1 二次多项式模型的建立

采用二次多项式模型公式(7)、(8), 利用 Origin 8.5 软件分别对最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 、迟滞期 λ 和温度的关系进行模型拟合, 结果如图 3、4 所示。利用相关系数 R^2 、 B_f 、 A_f 对模型进行验证, 验证相关结果见表 4。

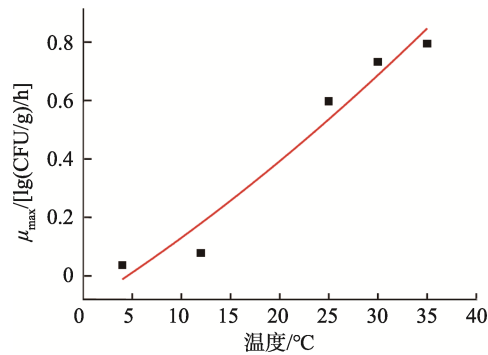


图 3 二次多项式模型拟合的鱼肉中最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 和温度的关系曲线
Fig.3 Curve of relationship between the maximum specific growth rate $\mu_{\max}$ and temperature in fish meat fitted by the quadratic polynomial model

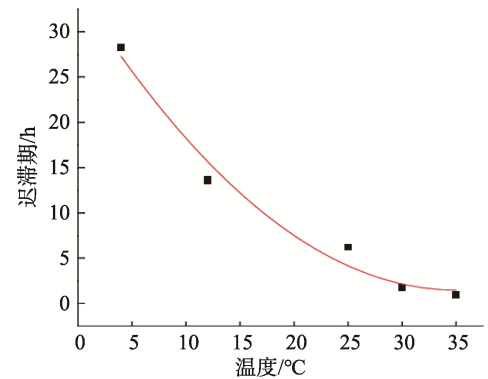


图 4 二次多项式模型拟合的鱼肉中迟滞期 λ 和温度的关系曲线
Fig.4 Curve of relationship between lag period λ and temperature in fish meat fitted by the quadratic polynomial model

2.2.2 平方根模型的建立

采用平方根模型公式(9)和(10), 利用 Origin 8.5 软件分别对最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 与温度、迟滞期 λ 和温度的关系进行模型拟合, 结果见图 5、6。利用相关系数 R^2 、 B_f 、 A_f 对模型进行评价, 结果见表 4。

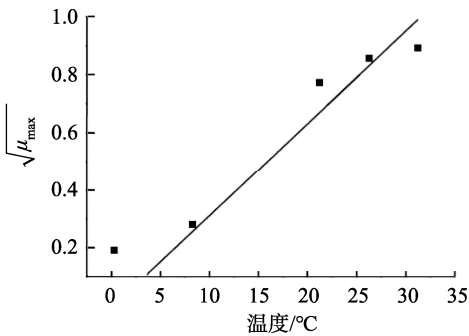


图 5 平方根模型拟合的鱼肉中最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 和温度的关系曲线
Fig.5 Curve of relationship between the maximum specific growth rate $\mu_{\max}$ and temperature in fish meat fitted by the square root model

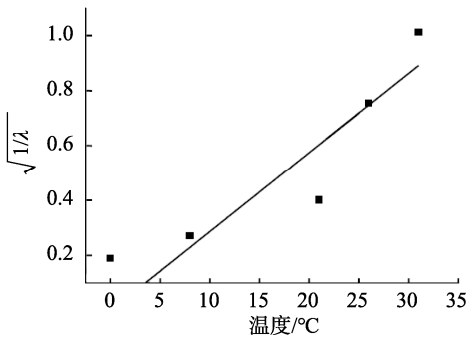


图 6 平方根模型拟合的鱼肉中迟滞期 λ 和温度的关系曲线
Fig.6 Curve of relationship between lag period λ and temperature in fish meat fitted by the square root model

表 4 二级模型的评价					
Table 4 Evaluation of secondary models					
生长参数	模型	方程	B_f	A_f	R^2
$\mu_{\max}$	二次多项式	$\mu_{\max}=-0.09984+0.02138T+0.000161649T^2$	0.976	1.104	0.960
λ	二次多项式	$\lambda=34.37133-1.88093T+0.026917^2$	1.111	1.111	0.962
$\mu_{\max}$	平方根	$\sqrt{\mu_{\max}}=0.0319(T-4)$	0.772	0.772	0.9114
λ	平方根	$\sqrt{1/\lambda}=0.028(T-4)$	0.823	0.823	0.8319

相关系数 R^2 越接近于 1, 模型越可靠。 A_f 值可取范围为 1.1~1.9, B_f 可取范围为 0.75~1.25, 值越接近 1, 结果越可靠。若 $B_f<0.70$ 或 $B_f>1.15$, 模型为不可接受^[30]。评价结果显示二次多项式拟合程度较好, 故采用二次多项式作为鱼肉中沙门氏菌生长的二级模型。

3 结论与讨论

选取具有代表我国居民日常鱼类膳食的市售新鲜草鱼为实验对象, 将前期研究中得到的鱼肉中检出率最高、分布最广的 4 种血清型沙门氏菌混合物对鱼肉进行人工污

染。分别测定了 4、12、25、30、35 °C 5 个恒定温度下细菌的生长规律,建立了不同温度下沙门氏菌在鱼肉中生长的一级 SGompertz 模型,同时,利用二次多项式建立了二级生长模型,模型的拟合性较好。一级模型均符合“S”生长曲线,随着温度的增加,最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 呈上升趋势,而迟滞期 λ 呈下降趋势。市售新鲜鱼肉中沙门氏菌生长预测模型的建立有助于鱼肉沙门氏菌风险的定量评估以及产品质量安全的控制与管理,保障消费者健康,同时对于三级模型的建立具有重要的参考意义。

参考文献

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴. 2021[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China fishery statistical yearbook. 2021 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [2] 沈勇, 梅俊, 谢晶. 预测微生物学在水产品货架期中应用研究进展 [J]. 食品与机械, 2019, 35(1): 221–225.
SHEN Y, MEI J, XIE J. Advances on application of predictive in shelf life of aquatic products [J]. Food Mach, 2019, 35(1): 221–225.
- [3] ALEKSANDR N, MARGARITA T, INGA E, *et al.* Major foodborne pathogens in fish and fish products: A review [J]. Annal Microbiol, 2016. DOI: 10.1007/s13213-015-1102-5
- [4] 覃湘婕, 孙宁与, 李春尧, 等. 食品中沙门氏菌检测方法研究进展[J]. 中国酿造, 2020, 39(9): 18–24.
TAN XJ, SUN NY, LI CY, *et al.* Research progress of *Salmonella* detection methods in food [J]. China Brew, 2020, 39(9): 18–24.
- [5] 朱江辉, 宋筱瑜, 王晔茹, 等. 我国食品微生物定量风险分级模型初探与应用[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(4): 516–522.
ZHU JH, SONG XY, WANG YR, *et al.* Preliminary investigation of quantitative food microbial risk ranking model and its applications [J]. Chin J Food Hyg, 2016, 28(4): 516–522.
- [6] 刘豪. 沙门氏菌引起的食品安全问题及其防治 [J]. 畜牧兽医学(电子版), 2017, 9: 29.
LIU H. Food safety problems caused by salmonella and their prevention [J]. Graz Vet Sci, 2017, 9: 29.
- [7] 曲彩红. 食源性致病菌带菌情况检测结果分析[J]. 临床研究, 2021, 29(9): 3.
QU CH. Analysis of detection results of foodborne pathogens [J]. Clin Res, 2021, 29(9): 3.
- [8] GARCÍA MR, VILAS C, HERRERA JR, *et al.* Quality and shelf-life prediction for retail fresh hake (*Merluccius merluccius*) [J]. Int J Food Microbiol, 2015, 208: 65–74.
- [9] 钟萍, 陈鲜丽, 罗威, 等. 不同贮藏温度对鱼肉嫩度和菌落总数的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 45–49.
ZHONG P, CHEN XL, LUO W, *et al.* Effects of different storage temperature on tenderness and total number of bacterial colonies of fish [J]. Food Res Dev, 2021, 42(7): 45–49.
- [10] 刘敏, 张群, 曹丙蕾, 等. 乳制品中肠炎沙门氏菌 *Salmonella enteritidis* (CMCC 50041) 生长预测模型的建立 [J]. 食品科技, 2021, 46(5): 290–295.
LIU M, ZHANG Q, CAO BL, *et al.* Establishment of predictive model for *Salmonella enteritidis* (CMCC50041) growth in different dairy products [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(5): 290–295.
- [11] MCMECKIN TA, OLLEY J, RATKOWSKY DA, *et al.* Predictive microbiology: Towards the interface and beyond [J]. Int J Food Microbiol, 2002, 73(2): 395–407.
- [12] ZHANG C, LIU Z, BAI M, *et al.* An ultrasensitive sandwich chemiluminescent enzyme immunoassay based on phage-mediated double-nanobody for detection of *Salmonella typhimurium* in food [J]. Sensor Actuat B, 2022, 352: 131058.
- [13] KONG XH, KONG LY, HU AT, *et al.* Establishment of PCR assay with internal amplification control for rapid detection of *Salmonella* sp. [J]. Appl Biochem Microbiol, 2021, 57(5): 666–674.
- [14] 李雪娜. 食品中沙门氏菌预测模型的研究进展[J]. 现代食品, 2021, 10: 35–38, 43.
LI XN. Progress in predictive models of *Salmonella* in food [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 10: 35–38, 43.
- [15] 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.* Modelling growth kinetics of *Salmonella* and background microorganisms in chicken [J]. Food Sci, 2019, 40(9): 7–15.
- [16] 邓森荣, 向蓉, 魏琦麟, 等. 冷鲜肉微生物种类及微生物预测模型的研究进展[J]. 广东农业科学, 2021, 48(3): 9.
DENG SR, XIANG R, WEI QL, *et al.* Research progress in microbial species and microbial prediction model of chilled meat [J]. Guangdong Agric Sci, 2021, 48(3): 9.
- [17] 王红丽, 王锡昌, 施文正, 等. 水产品贮运过程中货架期预测的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 261–268.
WANG HL, WANG XC, SHI WZ, *et al.* Recent progress on shelf-life prediction of aquatic products during storage and transportation [J]. Food Sci, 2021, 42(15): 261–268.
- [18] 刘晓畅, 罗永康. 水产品贮运过程品质预测技术研究进展[J]. 中国渔业质量与标准, 2016, 6(2): 1–6.
LIU XC, LUO YK. Research progress on quality prediction technology of aquatic products during storage and transportation [J]. Chin Fish Qual Stand, 2016, 6(2): 1–6.
- [19] DING T, SHIM YH, CHOI NJ, *et al.* Mathematical modeling on the growth of *Staphylococcus aureus* in sandwich [J]. Food Sci Biotechnol, 2010, 19(3): 763–768.
- [20] 蓝蔚青, 张皖君, 段贤源, 等. 不同贮藏温度下鲈鱼腐败菌生长动力学与货架期预测[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 351–358.
LAN WQ, ZHANG WJ, DUAN XY, *et al.* Growth kinetics of spoilage organisms and prediction of shelf life for *Lateolabrax japonicus* at different storage temperatures [J]. Transact Chin Soc Agric Machin, 2018, 49(4): 351–358.
- [21] 郑婷, 董鹏程, 王仁欢, 等. 冷却牛肉中沙门氏菌生长预测模型的建立和验证[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(7): 38–44.
ZHENG T, DONG PC, WANG RH, *et al.* Establishment and validation of predictive model of *Salmonella* in beef [J]. Food Ferment Ind, 2015, 41(7): 38–44.
- [22] 赵楠, 许晓曦, 刘洋, 等. 酱卤肉中沙门氏菌和单核细胞增生李斯特菌生长特性及预测模型建立[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 120–125.
ZHAO N, XU XX, LIU Y, *et al.* Typical growth characteristics of

- Salmonella* and *Listeria monocytogenes* in Braised Pork with soy sauce and establishment of prediction models [J]. Food Sci, 2016, 37(1): 120–125.
- [23] 张莉, 尹德凤, 曾艳兵, 等. 鲜猪肉冷藏过程中沙门氏菌生长预测模型的选择[J]. 农产品质量与安全, 2015, 5(3): 26–31.
- ZHANG L, YIN DF, ZENG YB, *et al.* Selection of a model for predicting the growth of *Salmonella* during the refrigeration of fresh pork [J]. Qual Saf Agro Prod, 2015, 5(3): 26–31.
- [24] 曾巧辉, 余杏同, 宋玉琼, 等. 熟鸡肉中沙门氏菌生长模型的建立及货架期预测[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2021, 39(6): 42–48, 56.
- ZENG QH, YU XT, SONG YQ, *et al.* Growth modeling for *Salmonella* of cooked chicken and shelf life prediction [J]. J Foshan Univ (Nat Sci Ed), 2021, 39(6): 42–48, 56.
- [25] 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, 15(5): 63–73.
- DING T, LI TT, LI JR, *et al.* Applicability analysis of microbial growth dynamics models and establishment of shelf-life model for salmon slices during the cold storage [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2015, 15(5): 63–73.
- [26] FANG T, HUANG L, LIU L, *et al.* Mathematical modeling of growth of *Salmonella* spp. and spoilage microorganisms in raw oysters [J]. Food Control, 2015, 53: 140–146.
- [27] 殷玉洁, 倪培恩, 刘丹蕾, 等. 鲜猪肉中沙门氏菌生长动力模型的建立与验证[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(3): 33–39.
- YIN YJ, NI PEN, LIU DL, *et al.* Establishment and verification of a growth dynamic model of *Salmonella* in fresh pork [J]. J Food Sci Technol, 2018, 36(3): 33–39.
- [28] COSTA JCCP, BOLÍVAR A, VALERO A, *et al.* Evaluation of the effect of *Lactobacillus sakei* strain L115 on *Listeria monocytogenes* at different conditions of temperature by using predictive interaction models [J]. Food Res Int, 2020, 131: 108928.
- [29] 岳晓禹, 胡志霞, 刘相东, 等. 食品微生物预测模型研究进展[J]. 郑州牧业工程高等专科学校学报, 2014, 34(3): 14–16, 26.
- YUE XY, HU ZX, LIU XD, *et al.* Advances in predictive food microbiology model [J]. J Zhengzhou Coll Anim Husb Eng, 2014, 34(3): 14–16, 26.
- [30] ROSS T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology [J]. J Appl Bacteriol, 1996, 81(5): 501–508.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



陈仕佳, 主要研究方向为食品安全检测。
E-mail: 1965146066@qq.com



代娟, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全检测。
E-mail: daijuan_2004_2007@126.com