

不同贮藏温度下鸡肉中大肠杆菌 O157:H7 生长预测模型的建立

石 媚, 陈 芳, 胡小松, 董 丽*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 国家果蔬加工工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 目的 建立大肠杆菌在鸡胸肉的生长预测模型, 为其加工、贮藏保鲜等过程的温度控制提供参考。**方法** 以大肠杆菌(*Escherichia coli* O157:H7)为研究对象, 监测其在 4、8、10、12、16、20、28、37°C 贮藏条件下熟鸡胸肉上的生长情况。采用 Gompert 模型建立熟鸡胸肉上大肠杆菌的一级生长模型, 并将一级生长模型拟合得到的数据代入 Ratkowsky 方程建立二级模型, 综合考虑准确因子 A_f 、偏差因子 B_f 和均方根误差 R^2 并检验模型的可行性。**结果** 10、12、16、20、28 和 37°C 条件下拟合的一级生长模型相关系数均在 0.94 以上, 说明能够用来预测该温度范围内大肠杆菌在熟鸡胸肉上的生长动态。在 4 和 8°C 条件下, 大肠杆菌在熟鸡胸肉上呈现先上升后下降再上升的趋势, 而在 10、12、16、20、28 和 37°C 下, 大肠杆菌先进入延滞期, 后进入快速增长的指数期, 且温度越高, 指数期越短。**结论** 在 10~37°C 下可以用 Gompert 模型拟合鸡胸肉中 *E. coli* O157:H7 的生长预测模型, 且效果较好。**关键词:** 大肠杆菌 O157:H7; 鸡胸肉; 生长预测模型; 贮藏温度

Growth prediction model of *Escherichia coli* O157:H7 on chicken at different storage temperatures

SHI Mei, CHEN Fang, HU Xiao-Song, DONG Li*

(National Engineering Research Center for Fruit and Vegetable Processing, College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Objective To establish the growth prediction model of *Escherichia coli* in chicken breast meat and provide reference for the temperature control of processing, storage and preservation. **Methods** The growth of *Escherichia coli* O157:H7 on cooked chicken breast meat at 4, 8, 10, 12, 16, 20, 28 and 37°C was monitored. The Gompert model was used to fit the growth curve for establishing the first-level growth model of *E. coli* on chicken breast. The data obtained from the first-level growth model was substituted into the Ratkowsky equation to establish a second-level model, and test the accuracy of the model through evaluating the accuracy factor (A_f), bias factor (B_f) and root mean square error. **Results** The correlation coefficients of the first-order growth models fitted at 10, 12, 16, 20, 28 and 37°C were all above 0.94, indicating that they could be used to predict the growth dynamics of *E. coli* on cooked chicken breast meat in this temperature range. At 4 and 8°C, *E. coli* showed a trend of first rising, then failing, then

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1602202)、2021 年中国农业大学大学生创新创业项目(X2021100190455)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC1602202), and the 2021 College Students' Innovation and Entrepreneurship Project of China Agricultural University (X2021100190455)

*通信作者: 董丽, 博士, 实验师, 主要研究方向为食品微生物。E-mail: li_dong127@163.com

*Corresponding author: DONG Li, Ph.D, Engineer, East Campus of China Agricultural University, 17 Tsinghua East Road, Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: li_dong127@163.com

rising on cooked chicken breast. At 10, 12, 16, 20, 28 and 37°C, *E. coli* first entered the lag phase, and then entered the exponential phase of rapid growth. Moreover, the higher the temperature was, the shorter the time to enter the exponential phase was. **Conclusion** The Gompert model can be used to predict the growth law of *E. coli* O157:H7 on cooked chicken breast meat at 10-37°C, and the effect is good.

KEY WORDS: *Escherichia coli* O157:H7; chicken breast; growth prediction model; storage temperature

0 引言

由于当今快节奏的生活以及人们对健康生活的追求, 包含鸡胸肉为主要蛋白质的轻食产品受到追捧^[1]。然而, 我国还未建立一个完备的冷链物流管理体系^[2]。冷藏“轻食”沙拉中的鸡胸肉容易在加工、运输、贮藏过程中由于时间和温度控制不当等原因造成微生物繁殖, 如大肠杆菌 (*Escherichia coli* O157:H7), 从而引起食物中毒, 造成人体腹泻、出血性结肠炎和溶血性尿毒症综合征^[3-4]。

E. coli O157:H7 是鸡肉污染相关的主要食源性病原体。在沙拉食品中, 新鲜蔬菜和水果是鸡肉中 *E. coli* O157:H7 的重要来源^[5-6], 已有多个报道表明生菜、卷心菜、西红柿新鲜果蔬中 *E. coli* O157:H7 的暴发^[7-10]。在美国, 从 1998 年到 2007 年, 食用 *E. coli* O157:H7 污染的水果和蔬菜而引起食源性疾病的报道从 11% 增加到 41%^[11]。2015 年, 鸡肉沙拉中 *E. coli* O157:H7 污染问题涉及美国 7 个州, 并报告了 19 起疾病病例^[12-13]。因此, *E. coli* O157:H7 的生长规律研究对于预防其引起的食品安全问题具有重要的指导意义。

目前, 不同贮藏条件对鸡肉品质的影响研究较多, 但微生物的生长规律还不够完善^[14], 已建立了真空冷却鸡胸肉中优势腐败菌和熟制酱鸡胸肉中产气荚膜梭菌的生长预测模型^[15-17], 还缺乏鲜食鸡肉沙拉中 *E. coli* O157:H7 的生长规律研究。且已有研究中, 利用修正的 Gompertz 方程建立了大肠杆菌在猪肉、卤牛肉、卤鸡腿、生鲜牛肉中的生长预测模型^[18-21]。因此, 本研究通过分析不同温度条件下熟鸡胸肉上大肠杆菌的生长规律, 采用修正的 Gompert 模型建立熟鸡胸肉上 *E. coli* O157:H7 的一级生长模型^[22], 并构建温度对其最大比生长速率(μ_{\max})及延滞期(λ)影响的二级模型, 从而建立 *E. coli* O157:H7 在不同贮藏温度下鸡胸肉中的生长预测模型, 为筛选鸡肉沙拉的最优贮藏条件提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

大肠杆菌 *Escherichia coli* O157:H7(中国农业大学食品科学与营养工程学院国家果蔬加工工程中心); 鸡小胸肉(华都食品有限公司); LB 肉汤、0.9% 无菌生理盐水(北京

索莱宝有限公司); 琼脂(北京百瑞极生物科技有限公司)。

1.1.2 仪器

HWS-70B 恒温恒湿培养箱(天津泰斯特仪器有限公司); BIOMEDICAL 冰箱(山东海尔集团); HZQ-X300 恒温振荡器(上海一恒科学仪器有限公司); RXIIseries 离心机(日本 HITACHI 科技有限公司); MX-F 漩涡混匀仪(大龙兴创实验仪器股份公司); SW-CJ-2F 超净工作台(苏州净化设备有限公司); MLS-3781L 高压蒸汽灭菌锅(日本 Panasonic 科技有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 菌液活化

将储存在-80°C 甘油管中的大肠杆菌在 LB 平板划线培养出单菌落, 挑取 1 个单菌落于 LB 液体培养基中, 在 37°C/(220 r/min) 的摇床中培养 6 h。取培养后的菌液于 LB 平板划线培养 18 h, 挑取单菌落于 LB 液体培养基中, 在 37°C/(220 r/min) 的摇床中培养 6 h, 使菌液浓度为 $10^7 \sim 10^8$ CFU/mL。后用 LB 液体培养基将活化后的菌液稀释成浓度为 $10^4 \sim 10^5$ CFU/mL 的悬菌液, 备用。

1.2.2 灭菌鸡胸肉的制备

将鸡胸肉置于锅内煮熟, 后使用无菌手术刀将鸡胸肉切成条状(每条质量约 1 g)。装入无菌密封袋内, 于无菌操作台内用紫外光照射 30 min, 制成无菌熟鸡胸肉。

1.2.3 大肠杆菌的接种、培养和计数

将小块鸡胸肉放入备用的菌悬液中浸泡 30 min, 每 3 块分装于一个无菌袋中(每管内鸡胸肉质量约 3 g), 密封后, 分别置于 4、8、10、12、16、20、28、37°C 恒温培养箱中培养。每个温度进行 3 次重复实验以保证准确性。按照 GB 4789.3—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》进行大肠杆菌的菌落数检测, 经适当时间间隔取出鸡肉, 均质 5 min, 充分混匀, 随后取出 100 μ L 均质液于加了 900 μ L 0.9% 无菌生理盐水的离心管中, 振荡 5 min; 稀释适当倍数后, 取 100 μ L 菌悬液在 LB 琼脂固体培养基上涂布, 再将培养基置于 37°C 恒温培养箱中培养 18 h, 对大肠杆菌进行平板计数。

1.2.4 一级模型的建立

利用 MATLAB R2020a 软件, 将不同温度下鸡胸肉中大肠杆菌的生长数据用修正的 Gompertz 模型进行拟合, 比较相关系数, 模型的方程表达式如式(1):

Modified Gompertz 模型: $\log(N_t/N_0) = a \times \exp[-\exp(b-c \times t)]$ (1)

式中, N_0 是 0 h 时的菌数量, 即初始菌落数量, $\lg(\text{CFU/g})$; N_t 是时间为 t 时的菌落数量, $\lg(\text{CFU/g})$; t 是生长时间, h; \exp 取 2.718; a 、 b 、 c 是模型参数。

最大比生长速率(μ_{\max})和延滞期(λ)由一级模型所得参数计算, 计算公式如式(2)、(3)所示:

$$\mu_{\max} = (a \times c) / e \quad (2)$$

$$\lambda = (b - 1) / c \quad (3)$$

式中, μ_{\max} 是细菌最大比生长速率, h^{-1} ; λ 是细菌生长迟滞期持续时间, h; a 、 b 、 c 是模型参数。

1.2.5 二级模型的建立

二级模型描述的是温度与大肠杆菌生长速率和延滞期影响的关系。用一级模型得到的最大比生长速率 μ_{\max} 和延滞期 λ 分别代入平方根方程, 方程式如式(4)和(5)所示, 以及二次多项式方程, 以建立二级模型, 可以用来描述温度对微生物生长速率和延滞期影响的关系, 方程式如式(6):

$$\sqrt{\mu_{\max}} = b(T - T_{\min}) \quad (4)$$

$$\sqrt{1 / \lambda} = b(T - T_{\min}) \quad (5)$$

$$\mu_{\max} \text{ 或 } \lambda = a + bT + cT^2 \quad (6)$$

式中: μ_{\max} 是细菌最大比生长速率, h^{-1} ; λ 是细菌生长迟滞期持续时间, h; T 是细菌生长温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{\min} 是细菌理论最低生长温度, $^{\circ}\text{C}$; b 是回归参数。

1.2.6 预测模型的评价

由一级模型得到均方根误差(root mean square error, RMSE), 判断一级模型拟合程度的好坏; 由偏差因子(bias factor, B_f)、准确因子(accuracy factor, A_f)检验二级模型的准确性。方程式如式(7)~(9):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{pred}})^2}{n}} \quad (7)$$

$$B_f = 10 \frac{\sum \lg \frac{\mu_{\text{pred}}}{\mu_{\text{obs}}}}{n} \quad (8)$$

$$A_f = 10 \frac{\sum \lg \frac{\mu_{\text{pred}}}{\mu_{\text{obs}}}}{n} \quad (9)$$

式中, μ_{obs} 是细菌计数所得到的观测值, CFU/g ; μ_{pred} 是模型计算所得到的预测值, CFU/g ; n 是实验次数。

1.3 数据处理

每个时间点的菌落计数数据采用平均值表示($n=3$), 利用 Excel 软件处理数据及制表, MATLAB R2020a 软件建立一二级模型制图。

2 结果与分析

2.1 4 和 8 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏温度下熟鸡胸肉中大肠杆菌的生长情况

将初始接种量为 $10^3 \sim 10^5$ CFU/mL 的大肠杆菌接种于无菌鸡胸肉中, 分别在 4 和 8 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中培养, 结

果如图 1 所示。在 4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 大肠杆菌的初始菌落数是 4.5×10^4 CFU/g , 贮藏 30 和 40 h 时, 大肠杆菌分别下降到 2.5×10^4 和 2.6×10^4 CFU/g , 并继续下降至 70 h 的 8.0×10^3 CFU/g , 随后, 大肠杆菌的菌落数开始上升, 并在 100 h 时达到 1.9×10^4 CFU/g 。在 8 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 大肠杆菌的初始菌落数是 3.6×10^3 CFU/g , 快速增长, 在 10 h 时, 达到 10^4 CFU/g , 之后开始下降, 贮藏 30 和 40 h 时, 大肠杆菌数目没有变化, 都下降到 2.5×10^4 CFU/g , 并继续下降至 65 h 的 1.7×10^2 CFU/g , 随后, 大肠杆菌的菌落数开始上升, 在 70 h 时, 达到 1.1×10^3 CFU/g 。这说明随着贮藏时间的延长, 大肠杆菌的菌落数呈先上升后下降再上升的趋势, 并且在较低贮藏温度(4 $^{\circ}\text{C}$)下, 菌落数变化不明显。目前描述大肠杆菌生长情况的一级模型主要包括线型模型、逻辑斯蒂克方程(Logistic function)、Gompertz 模型和 Baranyi & Roberts 模型, 这些模型比较适合用于拟合呈指数增长的微生物的生长情况^[23-24]。因此在 4 和 8 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏条件下鸡胸肉中大肠杆菌不能用一级生长模型进行拟合。

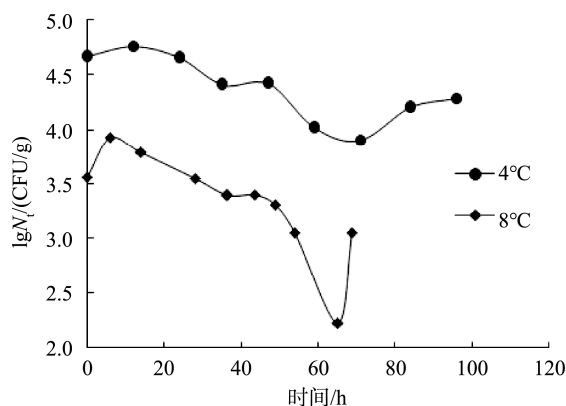


图 1 4 和 8 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏温度下鸡胸肉中大肠杆菌的生长曲线
Fig.1 Growth curves of *E. coli* O157:H7 on chicken breast meat at 4 and 8 $^{\circ}\text{C}$

2.2 10、12、16、20、28、37 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏温度下 *E. coli* O157:H7 的一级生长模型

选用修正的 Gompertz 模型为一级生长模型, 应用 MATLAB R2020a 软件对 10、12、16、20、28、37 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏温度下鸡胸肉中大肠杆菌的生长情况进行拟合, 结果如图 2 所示。在 6 种温度条件下, 大肠杆菌的生长规律大致是一样的, 首先进入延滞期, 菌落数基本保持不变。随后进入指数期, 此时大肠杆菌快速生长繁殖, 并且温度越高, 指数期越短, 到达稳定期时的菌落数分别为 2.1×10^6 、 8.1×10^9 、 6.4×10^9 、 1.8×10^9 、 3.6×10^8 、 2.2×10^8 CFU/g 。

通过计算得到其模型拟合的相关系数 R^2 和 RMSE, 这两个参数结合可用于判断该一级模型是否适合用来建立二级模型, RMSE 越小, 模型的预测结果越理想^[25-26]。如表 1 所示, 10、12、16、20、28、37 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏条件下熟鸡胸肉上大肠杆菌模型的 RMSE 值在 0.23~0.46 之间, 表明在

10~37°C的贮藏温度范围内, Gompertz 模型能较好拟合熟鸡胸肉中大肠杆菌的生长曲线。因此本研究可选用 Gompertz 模型作为大肠杆菌的一级生长模型。

2.3 二级模型的建立

根据不同温度下鸡胸肉上大肠杆菌的一级生长模型, 计算得到最大比生长速率 μ_{\max} 和延滞期 λ 。结果如表 2 所示, 在大肠杆菌初始接种量约为 $10^4 \sim 10^5$ CFU/g 时, 随着温度的增加, 熟鸡胸肉上大肠杆菌的最大比生长速率 μ_{\max} 逐渐增大, 延滞期 λ 先增加后减少。在 10°C 条件下其延滞期

λ 为 17.2211 h, 随后开始进入指数期; 而在 37°C 条件下延滞期 λ 减小至 1.9892 h。

本研究中主要考虑温度对生长参数的影响, 因此采用平方根模型和二次多项式模型作为二级模型, 应用 MATLAB R2020a 软件分别拟合最大比生长速率(μ_{\max})、迟滞期 λ 与温度 T 的关系, 结果如图 3~4 所示。图 3~4 中可以看出二次多项式模型可以更好地拟合鸡胸肉上大肠杆菌 μ_{\max} 与生长温度的关系, 而平方根模型更适合拟合延滞期 λ 与生长温度的关系。

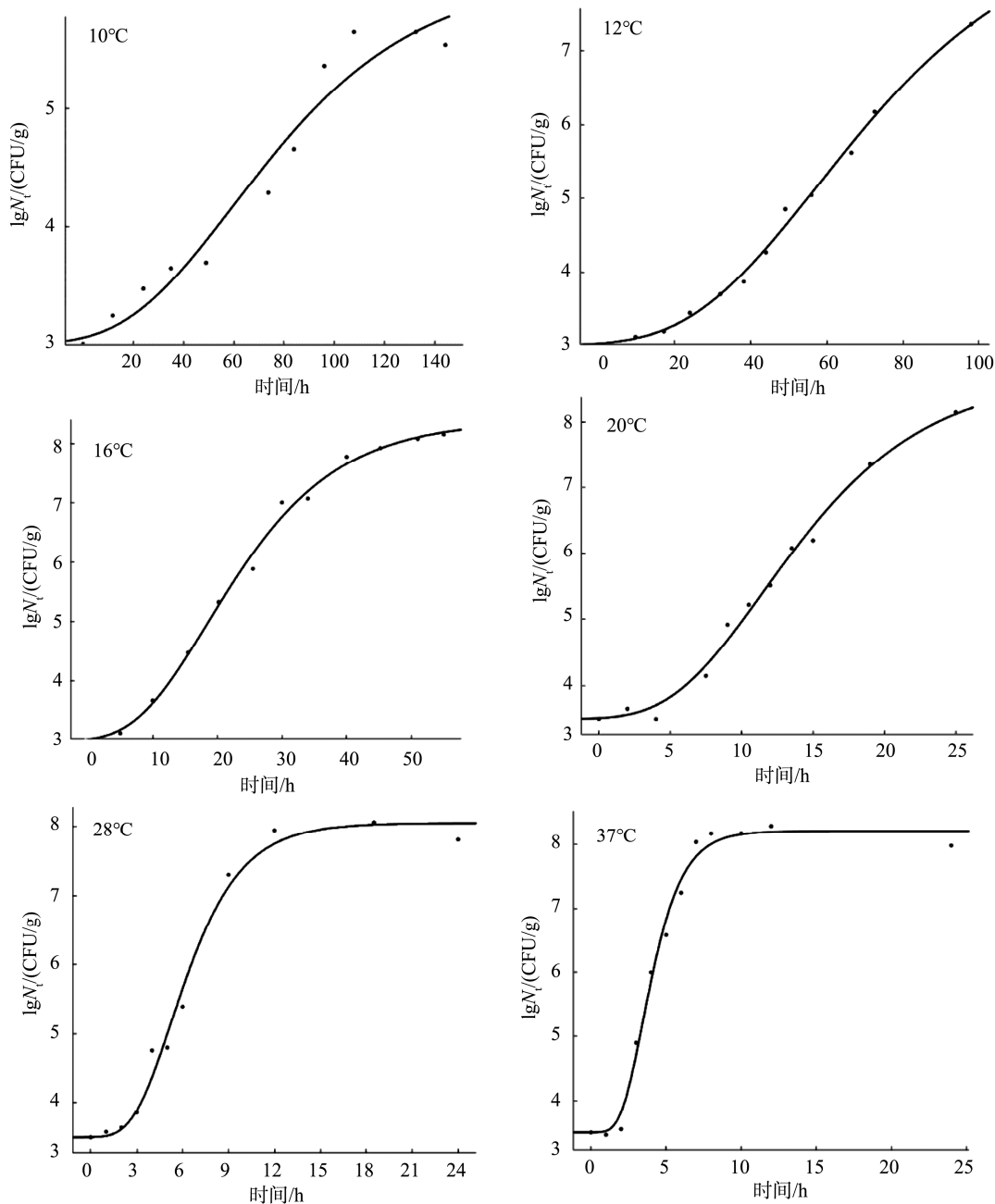


图 2 不同温度下鸡胸肉上大肠杆菌的生长模型

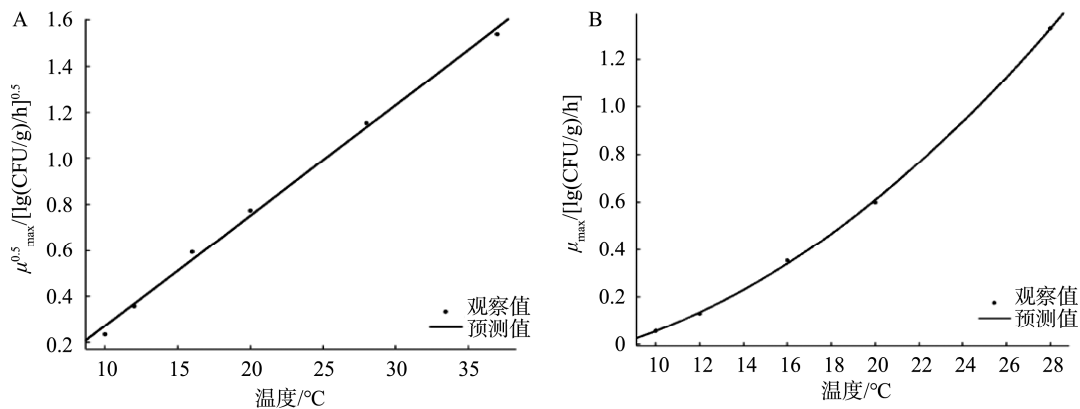
Fig.2 Growth models of *E. coli* O157:H7 on chicken breast meat at different temperatures

表 1 鸡胸肉上大肠杆菌一级生长模型的动力学参数
Table 1 Growth kinetic parameters of *E. coli* O157:H7 on chicken breast meat

温度/°C	系数			RMSE
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
10	6.316	1.409	0.02375	0.46
12	11.96	1.715	0.02921	0.23
16	10.87	1.649	0.08825	0.29
20	10.44	1.794	0.1557	0.32
28	9.096	2.094	0.3973	0.44
37	9.414	2.359	0.6832	0.41

表 2 不同温度下鸡胸肉上大肠杆菌的生长参数
Table 2 Growth parameters of *E. coli* O157:H7 on chicken breast meat at different temperatures

温度/°C	$\mu_{\max}/[\lg(\text{CFU/g})/\text{h}]$	λ/h
10	0.0552	17.2211
12	0.1285	24.4779
16	0.3529	7.3541
20	0.5981	5.0996
28	1.3296	2.7536
37	2.3663	1.9892



注: A 为平方根模型, B 为二次多项式模型, 下同。

图 3 鸡胸肉上大肠杆菌 μ_{\max} 与生长温度的关系曲线

Fig.3 Relationship curves between μ_{\max} and growth temperature for *E. coli* O157:H7 on chicken breast meat

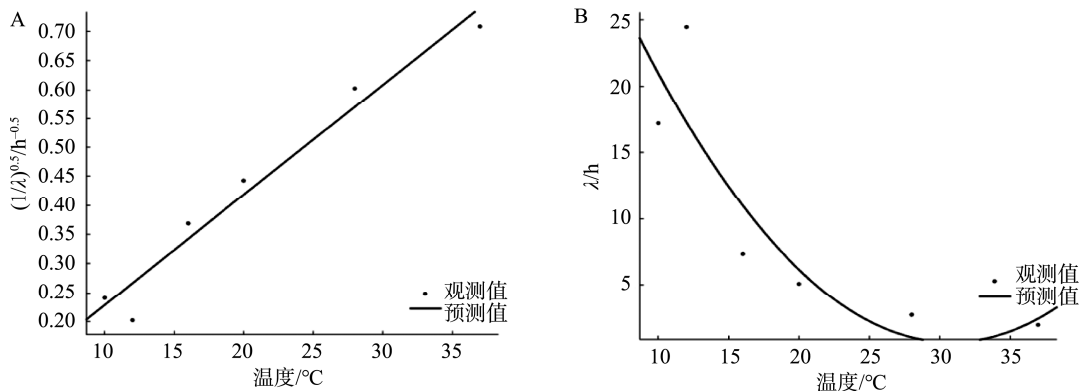


图 4 鸡胸肉上大肠杆菌延滞期 λ 与生长温度的关系曲线

Fig.4 Relationship curves between λ and growth temperature for *E. coli* O157:H7 on chicken breast meat

2.4 二级模型的评价

利用偏差因子 B_f 和准确因子 A_f 对二级模型的可靠度进行验证。 B_f 一般用来判断预测模型的偏差度, 表明所建预测模型结果与真实值的偏差程度。若 B_f 在 0.90~1.05 之间, 它越接近 1, 模型越可靠; 若 B_f 值在 0.70~0.90 或者在 1.06~1.15 之间, 该模型能够被接受。 A_f 表明预测模型的准确度, 用来衡量预测值和观测值两者的接近程度。 $A_f=1$ 表明预测值和观测值都相等, A_f 值越接近 1, 表明该模型预测的平均精确度越

高。若 A_f 值在 1.1~1.9 之间, 模型可以被接受^[27-28]。

如表 3 所示, 根据温度 T 和最大比生长速率 μ_{\max} 的关系建立的两种模型中, 二次多项式模型的 B_f 和 A_f 都更接近 1, 而在温度 T 和延滞期 λ 建立的两种模型中, 平方根模型的 B_f 和 A_f 都更接近 1。这表明二次多项式模型更适合拟合温度 T 和最大比生长速率 μ_{\max} 的关系, 平方根模型拟合温度 T 和延滞期 λ 的关系效果更好, 并且上述温度下建立的二级模型均能够被接受。

表 3 二级模型评价参数
Table 3 Evaluation parameters of second-order model

参数	模型类型	方程	B_f	A_f
μ_{\max}	平方根模型	$\mu^{0.5}=0.0479T-0.2065$	1.0301	1.1037
	二次多项式模型	$\mu=-0.1118-0.002691T+0.001933T^2$	1.0112	1.1441
λ	平方根模型	$\lambda^{-0.5}=0.019T+0.0386$	0.9722	1.2048
	二次多项式模型	$\lambda=45.16-2.8867T+0.04681T^2$	0.9493	10.0899

3 结论与讨论

本研究采用修正的 Gompertz 模型建立了 10~37°C 贮藏温度范围内熟鸡胸肉上大肠杆菌的生长预测模型, 根据相关参数 RMSE 的值, 明确了该模型具有可靠性。并且二级模型中的偏差因子 B_f 和准确因子 A_f 均在可接受范围内, 说明该模型能准确预测在 10~37°C 的贮藏温度范围内鸡胸肉上大肠杆菌的生长繁殖情况。

本研究中熟鸡胸肉上的大肠杆菌生长预测模型所用方程和前人研究大致相同, 但不适合建立 4 和 8°C 条件下 *E. coli* O157:H7 的预测模型。这可能是因为研究所针对的食品原料不同, 则会引起大肠杆菌生长条件中的 pH、水分活度等因素的差异, 也可能是因为所使用的菌株不同, 本研究中使用的 *E. coli* O157:H7 最低生长温度在 8°C 左右, 低于该温度其生长会受到抑制。

在 4~8°C 条件下, *E. coli* O157:H7 存在一个先下降再上升的生长趋势, 可能的原因是大肠杆菌在低温下会自我保护进入“活的不可培养”(viable but non-culturable, VBNC) 状态, 使菌落数快速下降。一段时间后, *E. coli* O157:H7 可以通过利用鸡肉上的营养元素, 提高代谢能力, 激活内部抗性基因, 增强抵御外界低温胁迫的能力, 进而复苏使菌落数上升。因此, 低温条件下大肠杆菌等微生物的 VBNC 状态存在严重的食品安全隐患^[29-31]。

本研究选取的温度范围为实际生活中可能用到的 4~37°C, 在此温度范围建立的鸡胸肉中大肠杆菌的生长预测模型具有实际意义。本次研究结果可以为规范鸡肉沙拉储存和运输的操作方法、创新鸡胸肉保鲜贮藏技术等方面提供参考。

参考文献

- [1] 胡浩, 肖霞莹, 夏黎. O2O 视域下的武汉外卖轻食创新发展对策研究 [J]. 现代食品, 2021, (23): 22-25.
HU H, XIAO XY, XIA L. Research on the innovation and development countermeasures of wuhan takeaway light food from the perspective of O2O [J]. Mod Food, 2021, (23): 22-25.
- [2] YANG T, TIAN C, LIU S. Technology and equipment for cold-chain storage and transportation of fresh agricultural products [J]. Eng Sci, 2021, 23(4): 37-44.
- [3] CUI H, BAI M, YUAN L, et al. Sequential effect of phages and cold

nitrogen plasma against *Escherichia coli* O157:H7 biofilms on different vegetables [J]. Int J Food Microbiol, 2018, 268: 1-9.

- [4] GONZÁLEZ-GONZÁLEZ CR, LABO-POPOOLA O, DELGADO-PANDO G, et al. The effect of cold atmospheric plasma and linalool nanoemulsions against *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* on ready-to-eat chicken meat [J]. LWT, 2021, 149: 111898-111898.
- [5] SAMAD A, ABBAS F, AHMAD Z, et al. Prevalence of foodborne pathogens in food items in Quetta, Pakistan [J]. Pakistan J Zool, 2018, 50: 1597-1600.
- [6] CAYALVIZHI BS, BALACHANDHAR D. Prevalence of Shiga-like toxin producing *Escherichia coli* strain (*E. coli* O157) in freshly consumed vegetables and its characterization [J]. J Food Saf, 2019, 39(1): 12577.
- [7] SÖDERSTRÖM A, ÖSTERBERG P, JÖNSSON B, et al. A large *Escherichia coli* O157 outbreak in Sweden associated with locally produced lettuce [J]. Foodborne Pathog Dis, 2008, 5(3): 339-349.
- [8] CHEKABAB SM, PAQUIN-VEILLETTE J, DOZOIS CM, et al. The ecological habitat and transmission of *Escherichia coli* O157:H7 [J]. Fems Microbiol Lett, 2013, 341(1): 1-12.
- [9] CONNOR H, MPH JH, PATEL K, et al. Notes from the field: An outbreak of *Escherichia coli* O157:H7 infections linked to romaine lettuce exposure-United States, 2019, MMWR [J]. MMWR-MORBID Mortal W, 2021, 70(18): 689-690.
- [10] ENABULELE SA, URAIH N. Enterohaemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 prevalence in meat and vegetables sold in Benin City, Nigeria [J]. Afr J Microbiol Res, 2009, 3(5): 276-279.
- [11] ABAKPA GO, UMOH VJ, KAMARUZAMAN S, et al. Fingerprints of resistant *Escherichia coli* O157:H7 from vegetables and environmental samples [J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(1): 80-86.
- [12] HUANG C, SHEEN S, SOMMERS CH, et al. Modeling the survival of *Escherichia coli* O157:H7 under hydrostatic pressure, process temperature, time and allyl isothiocyanate stresses in ground chicken meat [J]. Front Microbiol, 2018, 1: 9.
- [13] Centers for Disease Control and Prevention. Multistate outbreak of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* O157:H7 infections linked to Costco rotisserie chicken salad (final update) [EB/OL]. [2022-06-03]. <https://www.cdc.gov/ecoli/2015/o157h7-11-15/index.html> [2015-12-22].
- [14] Gram-Negative Bacteria-*Escherichia coli*. Researchers from Chung Ang University describe findings in *Escherichia coli* (predictive growth model of the effects of temperature on the growth kinetics of generic *Escherichia coli* in the Korean traditional rice cake product “Garaetteok”) [Z].
- [15] 周志扬, 王启芝, 唐承明, 等. 不同冰温贮藏条件对鸡肉贮藏期的影响 [J]. 肉类工业, 2020, (8): 23-26.
ZHOU ZY, WANG QZ, TANG CM, et al. Effect of different

- ice-temperature storage conditions on the storage period of chicken [J]. Meat Ind, 2020, (8): 23–26.
- [16] 莫凡, 李玲, 韩颖颖, 等. 真空冷却鸡胸肉优势腐败菌生长模型的预测[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(6): 86–92.
- MO F, LI L, HAN YY, *et al.* Kinetic model prediction of predominant spoilage bacteria in vacuum-cooled chicken breast [J]. J Food Sci Biotechnol, 2021, 40(6): 86–92.
- [17] 李苗云, 张佳焯, 朱瑶迪, 等. 精油对熟制鸡胸肉中产气荚膜梭菌抑制效果预测模型研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 315–320.
- LI MY, ZHANG JY, ZHU YD, *et al.* Prediction model for inhibitory effect of essential oils on *Clostridium perfringens* in cooked chicken breast [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2019, 35(9): 315–320.
- [18] 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.
- JIANG YJ, ZOU XK, PENG ZQ. Construction of growth prediction model of *Escherichia coli* in longissimus dorsi muscle [J]. Food Sci, 2008, 29(12): 115–119.
- [19] 张辉, 杨振泉, 赵隼, 等. 食源性大肠杆菌在即食食品中的生长预测模型[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(5): 1122–1127.
- ZHANG H, YANG ZQ, ZHAO J, *et al.* Establishment of a predictive growth model for foodborne *Escherichia coli* in ready-to-eat food [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2011, 27(5): 1122–1127.
- [20] 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.
- [21] 陈雨, 梁莹, 周萍萍, 等. 不同贮藏温度下进口生鲜牛肉中大肠杆菌生长预测模型的建立[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 81–88.
- CHEN Y, LIANG Y, ZHOU PP, *et al.* Establishment of growth prediction model of *Escherichia coli* in imported fresh beef at different temperatures [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(12): 81–88.
- [22] GULLIAN-KLANIAN M, SÁNCHEZ-SOLIS MJ. Growth kinetics of *Escherichia coli* O157:H7 on the epicarp of fresh vegetables and fruits [J]. Braz J Microbiol, 2018, 49(1): 104–111.
- [23] 周康, 刘寿春, 李平兰, 等. 食品微生物生长预测模型研究新进展[J]. 微生物学通报, 2008, 35(4): 589–594.
- ZHOU K, LIU SC, LI PL, *et al.* New advances in predictive food microbial growth model [J]. Microbiol Bull, 2008, 35(4): 589–594.
- [24] 王增辉, 赵彦军, 贾鑫玉. Gompertz 生长曲线参数估计的一种新方法及应用[J]. 生物数学学报, 2019, 34(1): 145–151.
- WANG ZH, ZHAO YJ, JIA XY. A new method and application of Gompertz growth curve parameter estimation [J]. J Biomathemat, 2019, 34(1): 145–151.
- [25] 郭全友, 杨宪时. 冷藏大黄鱼不同细菌生长模型比较[J]. 南方水产, 2005, (5): 48–53.
- GUO QY, YANG XS. Comparison of different bacteria growth models on chilled *Pseudosciaena crocea* [J]. South China Fish Sci, 2005, (5): 48–53.
- [26] 陈仕佳, 马箐, 付晓焰, 等. 鱼肉中沙门氏菌生长预测模型的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8): 2474–2481.
- CHEN SJ, MA Z, FU XY, *et al.* Establishment of prediction model for the growth of *Salmonella* in fish meat [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(8): 2474–2481.
- [27] 张微, 宇胜好, 曹慧, 等. 熟肉制品中金黄色葡萄球菌生长模型的建立[J]. 工业微生物, 2018, 48(3): 40–45.
- ZHANG H, YU SH, CAO H, *et al.* Establishment of *Staphylococcus aureus* growth model in cooked meat products [J]. Ind Microbiol, 2018, 48(3): 40–45.
- [28] 胡铮璐, 陈喜生, 罗晨曲, 等. 清蛋糕中金黄色葡萄球菌生长预测模型的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(4): 955–961.
- HU ZR, CHEN XS, LUO CQ, *et al.* Establishment of growth prediction models for *Staphylococcus aureus* in plain cakes [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(4): 955–961.
- [29] PAWLAK A, BELBEKHOUCHE S. Controlling the growth of *Escherichia coli* by layer-by-layer encapsulation [J]. Colloid Surf B, 2021, 206: 111950.
- [30] SE J, FU Y, XIE Y, *et al.* Proteomic changes of viable but nonculturable (VBNC) *Escherichia coli* O157:H7 induced by low moisture in an artificial soil [J]. Biol Fert Soils, 2021, 57(2): 219–234.
- [31] LI Y, ZHOU DG, HU SF, *et al.* Transcriptomic analysis by RNA-seq of *Escherichia coli* O157:H7 response to prolonged cold stress [J]. LWT, 2018, 97: 17–24.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



石 媚, 主要研究方向为食品微生物。
E-mail: 2019306100219@cau.edu.cn



董 丽, 博士, 实验师, 主要研究方向为食品微生物。
E-mail: li_dong127@163.com