

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.041

## 不同贮藏温度下鲈鱼腐败菌生长动力学与货架期预测

蓝蔚青<sup>1,2</sup> 张皖君<sup>1</sup> 段贤源<sup>1</sup> 吴启月<sup>1</sup> 卢瑛<sup>1,2</sup> 谢晶<sup>1,2</sup>

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 为快速预测鲈鱼在不同温度下特定腐败菌的生长规律, 模拟了鲈鱼的4种贮藏温度: 流化冰贮藏(-1.8℃)、碎冰贮藏(0℃)、冷藏1(4℃)与冷藏2(10℃), 分析了不同温度下鲈鱼的菌落总数、希瓦氏菌与假单胞菌数, 并测定了相应条件下鲈鱼货架期终点时的总挥发性盐基氮和QI值。采用修正的Gompertz方程描述鲈鱼特定腐败菌的动态变化, 分别以Belehradek平方根方程和Arrhenius方程建立微生物生长预测模型。结果表明, 修正的Gompertz方程能准确描述4种贮藏温度下鲈鱼特定腐败菌的生长规律, 希瓦氏菌和假单胞菌的腐败阈值分别为(6.48 ± 0.41)lg CFU/g与(6.33 ± 0.36)lg CFU/g。通过碎冰贮藏组(0℃)和模拟流通组(流化冰预冷(-1.8℃)—无冰运输(0.8℃)—碎冰贮藏(0℃))样品对模型适用性进行验证, 得出基于Belehradek方程的希瓦氏菌、假单胞菌生长预测模型偏差度分别为0.9936、0.9510和1.0242、0.9821, 准确度分别为1.0845、1.0425和1.1075、1.0934, 货架期预测模型相对误差绝对值在0~10%, 准确度优于Arrhenius方程。因此, 由Belehradek方程建立的模型能更准确描述鲈鱼在常规流通方式下希瓦氏菌和假单胞菌的生长规律, 可为鲈鱼流通货架期的预测提供理论依据。

**关键词:** 鲈鱼; 贮藏温度; 货架期; 特定腐败菌; 预测模型

**中图分类号:** TS254.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0351-08

## Growth Kinetics of Spoilage Organisms and Prediction of Shelf Life for *Lateolabrax japonicus* at Different Storage Temperatures

LAN Weiqing<sup>1,2</sup> ZHANG Wanjun<sup>1</sup> DUAN Xianyuan<sup>1</sup> WU Qiyue<sup>1</sup> LU Ying<sup>1,2</sup> XIE Jing<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing and Preservation, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The aim was to predict the growth of specific spoilage organisms (SSO) for *Lateolabrax japonicus* at different storage temperatures. The circulation of *Lateolabrax japonicus* was simulated by different storage methods, such as slurry ice storage (-1.8℃), crush ice storage (0℃), cold storage 1 (4℃) and cold storage 2 (10℃). The kinetic growth of total viable counts, *Shewanella* counts and *Pseudomonas* counts were analyzed respectively, and the total volatile base nitrogen (TVB-N) and Quality index (QI) value at the end of the shelf life of *Lateolabrax japonicus* were evaluated at different temperatures. On the basis of the dynamic change of SSO with modified Gompertz equation, Behlraddek equations and Arrhenius equations were used to construct the prediction models of growth and shelf life for SSO. The results showed that the modified Gompertz equation could describe the dynamic microbial growth in *Lateolabrax japonicus* at different storage temperatures and the average minimum corruption values of *Shewanella* counts and *Pseudomonas* counts were (6.48 ± 0.41) lg CFU/g, (6.33 ± 0.36) lg CFU/g respectively. Meanwhile, the applicability of models were validated under crush ice storage (0℃) and temperature-fluctuation conditions (slurry ice precooling (-1.8℃)-transportation without ice (0.8℃)-crush ice (0℃)). The bias factors ( $B_f$ ) and accuracy factors ( $A_f$ ) of *Shewanella* counts and *Pseudomonas* counts from the models based on Behlraddek equations were 0.9936,

收稿日期: 2017-09-21 修回日期: 2017-10-28

**基金项目:** 农业部海水鱼产业体系保鲜与贮运岗位科学家项目、上海市科技兴农2015年重点攻关项目(沪农科攻字(2015)第4-12号)和上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字(2016)第4-4号)

**作者简介:** 蓝蔚青(1977—),男,高级工程师,主要从事水产品保鲜技术、天然产物提取与利用研究,E-mail: wqlan@shou.edu.cn

**通信作者:** 谢晶(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事食品冷冻冷藏工程研究,E-mail: jxie@shou.edu.cn

0.951 0 and 1.024 2, 0.982 1 and 1.084 5, 1.042 5, 1.107 5, 1.093 4, respectively, and the relative errors of shelf life model were within the range of 0 ~ 10%. The accuracy of Belehraddek equation was better than that of Arrhenius equation. In conclusion, the models obtained by Belehraddek equations were more effective for predicting the growth of SSO and the shelf life of *Lateolabrax japonicus* at different storage temperatures so as to provide the theoretical basis for predicting the shelf life of *Lateolabrax japonicus*.

**Key words:** *Lateolabrax japonicus*; storage temperature; shelf life; specific spoilage organisms; prediction model

## 0 引言

鲈鱼 (*Lateolabrax japonicus*) 为鲈形目真鲈科花鲈属经济鱼类,其肉质白嫩,营养丰富。由于鱼肉中的水分和蛋白质含量高,组织脆弱,极易受微生物生长的影响而发生腐败变质。鲜鱼流通期间,在腐败过程中逐渐占据优势,并产生异味代谢产物的小部分微生物,被称为该产品的特定腐败菌 (Specific spoilage organism, SSO) [1-2]。SSO 生长变化与鱼肉腐败速度密切相关,因此建立与鲈鱼品质高度相关的腐败菌生长动力学模型,预测其贮藏货架期,是预防鱼肉腐败变质的可靠而迅速的手段之一 [3]。

低温保鲜可降低水产品中微生物的增殖速率,是淡水鱼最常用的贮存和保鲜方法,利用不同低温保鲜方式模拟温度对水产品品质及微生物生长变化的影响更契合实际。目前,一级模型中修正的 Gompertz 方程和 Logistic 方程在微生物动力学研究中应用较广泛,二级模型用于表达不同环境因素 (如 pH 值、温度、水分活度等) 对微生物增殖的影响。温度是影响鱼肉腐败菌生长的最重要因子,常用 Belehraddek 方程与 Arrhenius 方程描述其与微生物动力学参数的最大比生长速率 ( $k$ ) 和延滞时间 ( $\lambda$ ) 的关系 [4-5]。不同研究对象描述其腐败程度的模型存在差异,POWELL 等 [6] 研究表明,Belehraddek 平方根方程能较好拟合 0 ~ 10℃ 温度下气调包装大西洋鲑鱼中特定腐败菌的生长情况。LIU 等 [7] 研究得出,Arrhenius 方程对反映不同温度下虹鳟鱼片中菌落总数变化特点的拟合效果极佳,并能对 0 ~ 9℃ 虹鳟鱼片的贮藏品质与剩余货架期进行更精准的预测。在生产流通中,受操作环境的影响,水产品在流通期间也会发生温度波动,对其品质造成严重影响。章志超等 [8] 模拟鲟鱼的断链流通温度,并以 8℃ 和波动温度对模型进行验证,探究不同温度下鲟鱼中荧光假单胞菌的生长模型。刘寿春等 [9] 通过对比分析 4℃ 恒温和 0 ~ 4℃ 温度波动贮藏过程中冷却猪肉感官、理化和微生物特征的变化,表明温度波动对猪肉品质劣变速率和货架期均有不同程度的影响。

为将微生物生长预测模型应用到实际生产中,

本文采用不同冰藏和冷藏方式模拟鲈鱼的实际流通环境,建立 -1.8 ~ 10℃ 范围内的特定腐败菌生长动力学模型及货架期预测模型,并同时采用碎冰贮藏 (0℃) 与温度波动条件对预测模型的适用性进行验证,以期快速预测鲈鱼在流通过程中的品质与货架期提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料处理

鲜活鲈鱼 (*Lateolabrax japonicus*) 60 条,质量为 (500 ± 20) g,购自上海市浦东新区工商超市,挑选个体均一鱼样,30 min 内运往实验室进行实验。

将鲜鲈鱼放入盛满碎冰的泡沫箱中,使其窒息死亡,经去头去尾去内脏处理,用蒸馏水清洗、沥干后装入自封袋中,分成 5 组。为贴近实际生产应用,实验模拟了鲜鲈鱼的不同流通条件,具体如图 1 所示 (图中  $n$  表示所用鲈鱼样品条数)。

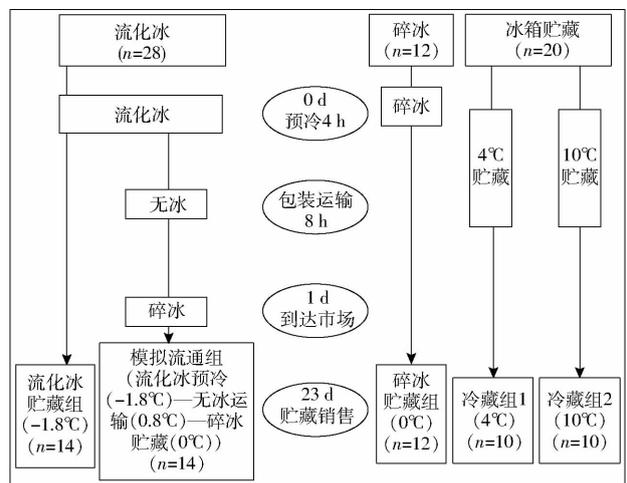


图 1 实验设计流程图

Fig. 1 Flowchart of experimental design

其中,模拟流通组鲈鱼在捕获后先经流化冰预冷 (-1.8℃) 4 h,后置于无冰泡沫箱中模拟运输 (0.8℃) 8 h,当天到达超市后利用碎冰进行贮藏销售 (0℃) 至 23 d。取样周期为流化冰处理组、碎冰处理组与模拟流通组 (即波动温度) 每 2 d 测定 1 次,冷藏处理组与常温处理组每天测定 1 次,各组指标至少重复 3 次。流化冰、碎冰处理组样品置于冷

藏柜中,根据需要及时更换补充冰,保持体系温度恒定。采用数显温度记录仪测定贮藏过程中冰箱温度与鱼肉温度。流化冰由80%冰与20%水组成,盐水质量浓度为3.3 g/mL,利用RE-1000W-SP型流化冰机制取冰浆。

## 1.2 主要药品试剂

NaCl,中盐长江盐化有限公司;平板计数琼脂(PCA)培养基、假单胞菌CFC选择性培养基、含铁琼脂(IA)等,国药集团化学试剂有限公司。

## 1.3 主要仪器设备

RE-1000W-SP型流化冰机,南通瑞友工贸有限公司;MLS-3750型灭菌锅,日本SANYO公司;生化培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;Testo-176T4型德图电子温度记录仪,德国仪器国际贸易(上海)有限公司。

## 1.4 实验方法

### 1.4.1 微生物计数

细菌总数(TVC)、假单胞菌和希瓦氏菌数均参照文献[10]测定。称取10 g鱼肉于灭菌袋中,加入90 mL 0.85%无菌生理盐水,拍打均匀后以10倍梯度稀释,根据不同贮藏时间,取3个合适的稀释度,每个稀释度取1 mL置于无菌培养皿内,每个稀释度作3个平行。其中,PCA培养基测定TVC,在(30±1)℃下培养72 h计数。灭菌后的假单胞菌CFC选择性培养基冷却至50℃,加入假单胞菌CFC选择性培养基添加剂,摇匀后倒入平板。IA培养基测定希瓦氏菌,其均在(30±1)℃下培养48 h计数。

### 1.4.2 感官分析

参考朱志伟等<sup>[11]</sup>法,稍作修改,感官评价采用质量指标法(Quality index method, QIM)。由7名专业培训的评定人员,随机抽取不同时期的鲈鱼鱼肉样品,对其光泽度、通透性、颜色、表面粘液、气味与质地等方面进行分析,为确保实验的一致性,所用鱼片均取自鱼体背部肌肉。QIM法中不同参数的分值范围在0~3,其中0为最佳品质,3或每个参数的最高分代表最低品质,将各参数分值相加,得出最终质量指标(QI值)。

### 1.4.3 总挥发性盐基氮值

总挥发性盐基氮值(TVB-N)含量参照文献[12]测定。

### 1.4.4 特定腐败菌生长动力学模型的建立

利用修正的Gompertz模型<sup>[13]</sup>描述不同温度下鲈鱼特定腐败菌的生长动态,公式为

$$\lg N(t) = \lg N_0 + \lg(N_{\max}/N_0) \cdot \exp(-\exp(2.718k/\lg(N_{\max}/N_0)(\lambda - t) + 1)) \quad (1)$$

式中  $t$ ——时间, h

$N(t)$ —— $t$ 时菌数, CFU/g

$N_{\max}$ ——最大菌数, CFU/g

$N_0$ ——初始菌数, CFU/g

$k$ ——微生物生长的最大比生长速率,  $\text{h}^{-1}$

$\lambda$ ——微生物生长的延滞时间, h

二级模型主要描述温度与微生物生长动力学参数( $k$ 和 $\lambda$ )的关系。采用Belehradek平方根方程<sup>[14]</sup>、Arrhenius方程<sup>[15]</sup>描述温度对微生物最大比生长速率 $k$ 和延滞期 $\lambda$ 的影响。Belehradek方程为

$$(1/\lambda)^{1/2} = b_{\lambda}(T - T_{\min\lambda}) \quad (2)$$

$$k^{1/2} = b_k(T - T_{\min k}) \quad (3)$$

式中  $b$ ——常数  $T$ ——温度, K

$T_{\min}$ ——假设的概念,指最大比生长速率为零时的温度

Arrhenius方程为

$$\ln k = \ln k_0 - E_{ak} [1/(RT) - 1/(RT_{ref})]$$

$$\ln(1/\lambda) = \ln(1/\lambda_0) - E_{a\lambda} [1/(RT) - 1/(RT_{ref})] \quad (4)$$

式中  $R$ ——通用气体常数, J/(mol·K)

$T_{ref}$ ——基准温度, 取273 K

$k_0$ —— $T_{ref}$ 时的最大比生长速率,  $\text{h}^{-1}$

$\lambda_0$ —— $T_{ref}$ 时的延滞时间, h

$E_{ak}$ —— $k$ 的活化能, kJ/mol

$E_{a\lambda}$ —— $\lambda$ 的活化能, kJ/mol

### 1.4.5 生长预测模型的可靠性评价

采用偏差度 $B_f$ 和准确度 $A_f$ 来评价已建立的微生物生长动力学预测模型可靠性, $B_f$ 、 $A_f$ 为1.0,表示模型预测值与实测值完全吻合。偏差度和准确度公式为

$$B_f = 10 \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{N_{PV}}{N_{MV}} \right)}{n} \quad (5)$$

$$A_f = 10 \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{N_{PV}}{N_{MV}} \right|}{n} \quad (6)$$

式中  $N_{MV}$ ——实测特定腐败菌数量

$N_{PV}$ ——同一时间由微生物生长动力学模型得到的腐败菌数量预测值

$n$ ——重复次数

### 1.4.6 鲈鱼货架期预测与评价

根据已建立的-1.8~10℃温度范围内特定腐败菌的生长动态模型,由鲈鱼特定腐败菌从初始菌数增至感官拒绝点时最小腐败菌数的时间进行货架期预测。将碎冰处理组与模拟流通组的鲈鱼货架期实测值与模型预测值进行比较,通过相对误差评价预测模型的准确性。

## 2 结果与分析

### 2.1 优势腐败菌数与最小腐败量确定

为准确预测鲜鲈鱼的货架寿命,需确定鲈鱼的

SSO 数量与最小腐败量  $N_s$ , 即鱼肉鲜度在感官拒绝时的特定腐败菌数<sup>[16]</sup>。其中,图 2 是采用修正的 Gompertz 方程回归分析得到不同贮藏温度下鲈鱼的菌落总数、希瓦氏菌数和假单胞菌数生长规律。

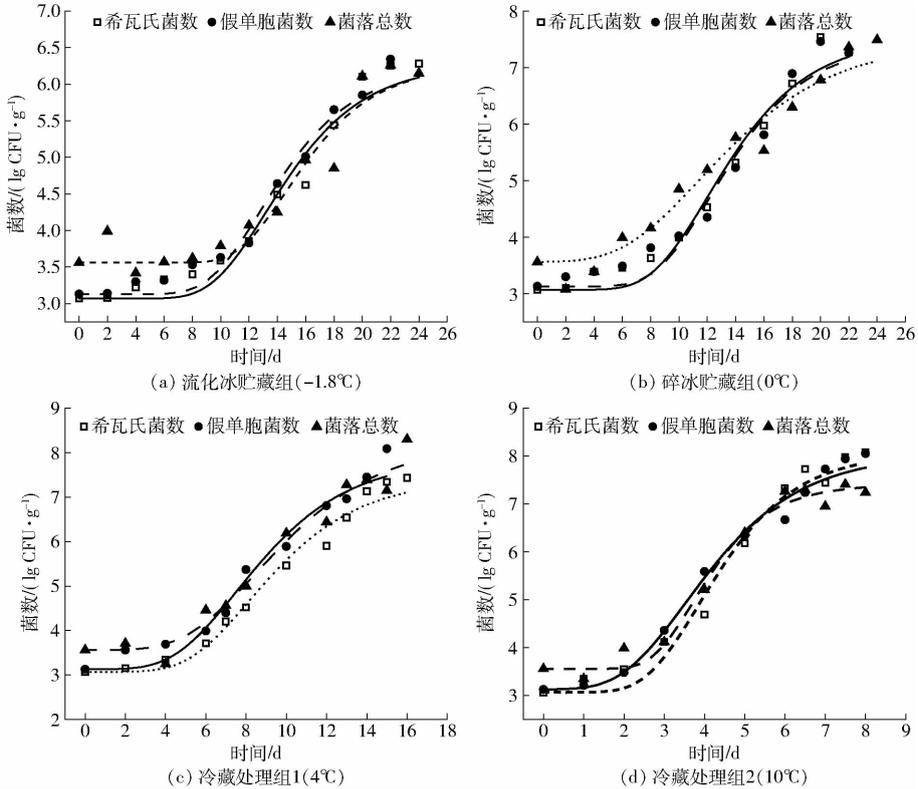


图 2 鲈鱼在不同贮藏温度下希瓦氏菌数、假单胞菌数和细菌总数的变化

Fig. 2 Changes of *Shewanella*, *Pseudomonas* and TVC growth of *Lateolabrax japonicus* stored at different temperatures

由图 2 可见,新鲜鲈鱼贮藏初期的微生物数量虽不多,但随着贮藏时间的延长,其希瓦氏菌、假单胞菌数逐渐接近总菌数,成为优势菌。王慧敏等<sup>[17]</sup>研究确定鲈鱼在微冻与冷藏下的主要优势腐败菌是希瓦氏菌和假单胞菌。由表 1 得出,鲈鱼 4 种温度下货架期终点(即感官拒绝点)时的 QI 值集中在 9~10,此时鱼肉气味和质地已不符合消费者食用要

求。TVB-N 质量比为  $(20.45 \pm 3.77) \text{ mg}/(100 \text{ g})$ , 达到文献<sup>[18]</sup>的卫生标准,说明当微生物数超过上述数量级时,鱼样可能已腐败。因此,可认定希瓦氏菌、假单胞菌的最小腐败量  $N_s$  为  $(6.48 \pm 0.41) \text{ lg CFU/g}$  与  $(6.33 \pm 0.36) \text{ lg CFU/g}$ , 根据希瓦氏菌与假单胞菌的生长规律可预测鲈鱼的贮藏货架期。

表 1 不同贮藏温度下鲈鱼初始及货架期终点时的 SSO 数、TVB-N 质量比和 QI 值

Tab. 1 SSO counts, TVB-N and QI values at beginning and end of storage time in *Lateolabrax japonicus* stored at different temperatures

微生物种类	贮藏条件	温度/°C	平均货架期/h	$N_0/$ (lg CFU·g <sup>-1</sup> )	$N_s/$ (lg CFU·g <sup>-1</sup> )	TVB-N 质量比/ (mg·(100 g) <sup>-1</sup> )	QI 值
希瓦氏菌	流化冰	-1.8	420.00	3.56 ± 0.29	5.96 ± 0.05	16.97 ± 0.08	9.05 ± 0.53
	碎冰	0	300.00	3.56 ± 0.29	6.22 ± 0.11	19.35 ± 0.05	9.33 ± 0.35
	冷藏 1	4	245.20	3.56 ± 0.29	6.76 ± 0.08	18.66 ± 0.92	9.21 ± 0.26
	冷藏 2	10	120.45	3.56 ± 0.29	6.97 ± 0.13	26.80 ± 0.33	9.94 ± 0.44
	平均值				6.48 ± 0.41	20.45 ± 3.77	9.38 ± 0.34
假单胞菌	流化冰	-1.8	420.00	3.13 ± 0.03	5.85 ± 0.07	16.97 ± 0.08	9.05 ± 0.53
	碎冰	0	300.00	3.13 ± 0.03	6.12 ± 0.22	19.35 ± 0.05	9.33 ± 0.35
	冷藏 1	4	245.20	3.13 ± 0.03	6.72 ± 0.10	18.66 ± 0.92	9.21 ± 0.26
	冷藏 2	10	120.45	3.13 ± 0.03	6.63 ± 0.03	26.80 ± 0.33	9.94 ± 0.44
	平均值				6.33 ± 0.36	20.45 ± 3.77	9.38 ± 0.34

### 2.2 鲈鱼特定腐败菌的生长曲线

图 3 为在模拟鲈鱼 4 种流通温度 ( - 1.8、0、4、10℃ ) 下得到的假单胞菌及希瓦氏菌生长实测值, 通过采用修正的 Gompertz 方程对微生物生长曲线进行拟合。

由表 2 可知, 拟合的决定系数  $R^2$  较高, 均大于 0.93, 生长曲线都呈现出典型“S”型特征, 说明修正的 Gompertz 方程能准确描述不同温度下假单胞菌和希瓦氏菌随时间的变化规律。张新林等<sup>[19]</sup>在三文鱼荧光假单胞菌的研究中也有类似结论。两种腐

败菌的初始菌数在 3 ~ 4 lg CFU/g, 表明样品新鲜, 符合实验预期值, 稳定期的最大菌数在 6.34 ~ 8.30 lg CFU/g。- 1.8℃ 的假单胞菌、希瓦氏菌最大比生长速率  $k$  为 0.012 6、0.011 9 h<sup>-1</sup>, 延滞期  $\lambda$  分别为 217.20、269.28 h。随着温度的升高, 两种菌的最大比生长速率逐渐增大, 延滞期缩短, 表明温度对特定腐败菌的生长有较大影响<sup>[5]</sup>。低温降低了微生物体内酶的活性, 抑制其生长速率, 延长增殖适应期, 说明流化冰的微冻处理对鲈鱼腐败菌生长有明显抑制作用。

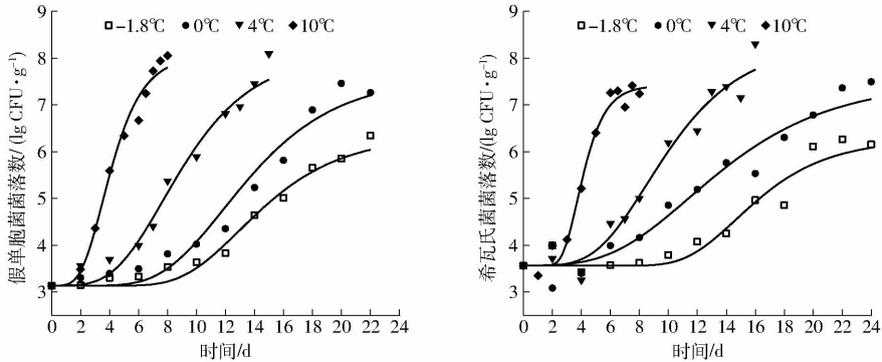


图 3 不同贮藏温度下鲈鱼肉中假单胞菌、希瓦氏菌的生长曲线

Fig.3 Growth curves of *Pseudomonas* and *Shewanella* in *Lateolabrax japonicus* stored at different temperatures

表 2 不同贮藏温度下鲈鱼微生物生长动力学参数

Tab.2 Kinetic parameters in *Lateolabrax japonicus* of microorganism growth at different temperatures

微生物种类	贮藏条件	温度/℃	$R^2$	$\lambda/h$	$k/h^{-1}$	$N_{max}/(lg CFU \cdot g^{-1})$
假单胞菌	流化冰	-1.8	0.975 8	217.20	0.012 6	6.34
	碎冰	0	0.960 5	201.12	0.017 3	7.46
	冷藏 1	4	0.972 4	102.48	0.022 3	8.09
	冷藏 2	10	0.978 6	48.00	0.049 7	8.05
希瓦氏菌	流化冰	-1.8	0.932 5	269.28	0.011 9	6.76
	碎冰	0	0.957 6	143.52	0.011 1	7.49
	冷藏 1	4	0.966 9	118.80	0.020 4	8.30
	冷藏 2	10	0.983 7	64.56	0.056 4	7.41

### 2.3 温度对微生物生长动力学参数的影响

应用二级模型 Belehradec 方程和 Arrhenius 方程描述温度  $T$  与 Gompertz 方程所得的特定腐败菌最大比生长速率  $k$  和延滞期  $\lambda$  的关系。

从图 4 可知, Belehradec 方程对两种特定腐败菌的  $k$ 、 $\lambda$  决定系数均大于 0.90, 表现出良好的线性关系, 说明 Belehradec 方程能很好描述温度对微生物  $k$  和  $\lambda$  的影响, 反映鲈鱼优势腐败菌随温度变化

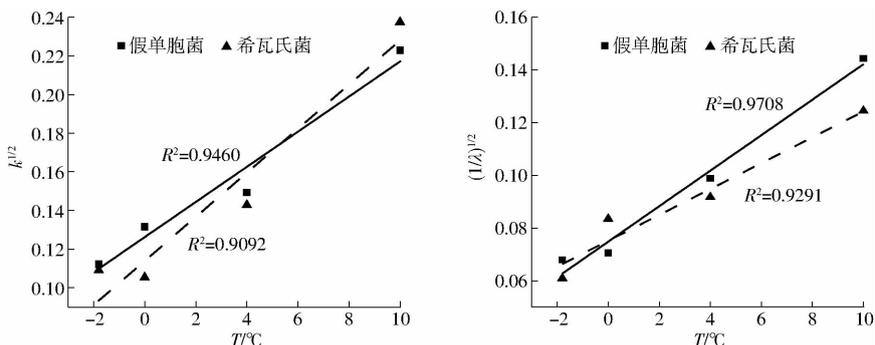


图 4 Belehradec 方程中温度对特定腐败菌最大比生长速率 ( $k$ )、延滞期 ( $\lambda$ ) 的影响

Fig.4 Effect of temperature on maximum specific growth rate ( $k$ ) and lag phase ( $\lambda$ ) of SSO with Belehradec equation

而呈现出的规律。国内相关人员<sup>[8, 20]</sup>研究假单胞菌在草鱼、鲟鱼等的生长数据也得到类似结论。

温度  $T$  与鲈鱼假单胞菌最大比生长速率  $k$  和延滞期  $\lambda$  的 Belehradek 方程为

$$k^{1/2} = 0.0089T + 0.1270$$

$$(1/\lambda)^{1/2} = 0.0066T + 0.0755$$

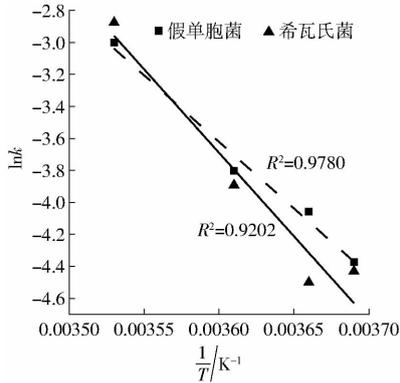


图 5 Arrhenius 方程中温度对特定腐败菌最大比生长速率( $k$ )、延滞期( $\lambda$ )的影响

Fig.5 Effect of temperature on maximum specific growth rate ( $k$ ) and lag phase ( $\lambda$ ) of SSO with Arrhenius equation

其中,温度与鲈鱼假单胞菌  $k$  和  $\lambda$  的 Arrhenius 方程为

$$\ln k = -8326.19/T + 26.35$$

$$\ln(1/\lambda) = -9958.75/T + 31.28$$

$T$  与希瓦氏菌  $k$  和  $\lambda$  的 Arrhenius 方程为

$$\ln k = -10444.35/T + 33.91$$

$$\ln(1/\lambda) = -8091.00/T + 24.43$$

2.4 微生物生长预测模型的建立与可靠性评价

为使建立的模型更具实用性与可靠性,结合鲈鱼实际流通环境,本实验以碎冰贮藏(0℃)和波动温度条件下的特定腐败菌实测值验证生长预测模型的准确性。ROSS<sup>[21]</sup>曾提出  $B_f$  值的划分标准:  $0.90 < B_f < 1.05$ , 模型为最佳;  $0.70 < B_f < 0.90$  或  $1.06 < B_f < 1.15$ , 模型为可接受;  $B_f < 0.70$  或  $B_f > 1.15$ , 模型为不可接受。 $A_f$  值越小(大于 1), 模型预测的准确性越高。

由表 3 可知,0℃和波动温度下基于 Belehradek 方程得出的假单胞菌、希瓦氏菌生长预测模型的  $B_f$  分别为 0.951 0、0.993 6 和 0.982 1、1.024 2, 处于模型最佳范围,  $A_f$  分别为 1.042 5、1.084 5 和 1.093 4、1.107 5, 模型的预测误差绝对值在 4.25% ~ 10.75%, 表明建立的模型能很好预测鲈鱼特定腐败菌在 0℃和波动温度下的生长规律。而基于 Arrhenius 方程所得的假单胞菌、希瓦氏菌的预测模型的  $B_f$  处于模型可接受范围, 预测误差绝对值在 9.55% ~ 21.66%, 因此, 基于 Belehradek 方程的生长预测模型对腐败菌的预测效果更好。

$T$  与希瓦氏菌  $k$  和  $\lambda$  的 Belehradek 方程为

$$k^{1/2} = 0.0112T + 0.115$$

$$(1/\lambda)^{1/2} = 0.0049T + 0.0756$$

由图 5 可知, Arrhenius 方程除对希瓦氏菌  $\lambda$  的拟合度( $R^2 > 0.8776$ )较小外, 其余  $R^2$  均较大( $R^2 > 0.92$ )。

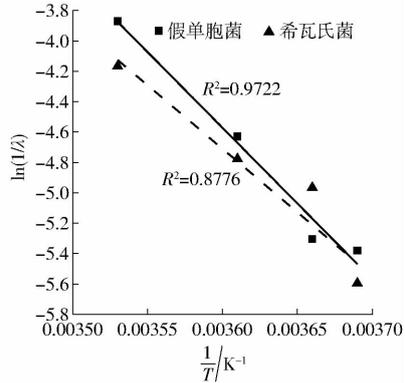


表 3 波动温度条件下特定腐败菌生长模型预测的偏差度和准确度

Tab.3 Bias and accuracy factors from different models of growth value of SSO under non-isothermal conditions

贮藏条件	贮藏温度/℃	微生物种类	生长预测模型方程	偏差度	准确度
碎冰	0	假单胞菌	Behlradek	0.951 0	1.042 5
			Arrhenius	0.921 1	1.200 7
		希瓦氏菌	Behlradek	0.993 6	1.084 5
			Arrhenius	1.056 8	1.095 5
模拟流通	波动温度	假单胞菌	Behlradek	0.982 1	1.093 4
			Arrhenius	0.954 4	1.193 7
		希瓦氏菌	Behlradek	1.024 2	1.107 5
			Arrhenius	1.098 8	1.216 6

2.5 鲈鱼剩余货架期模型建立与评价

由表 1 已知假单胞菌、希瓦氏菌的初始菌数 ( $N_0$ ) 和最小腐败值 ( $N_s$ ), 利用修正的 Gompertz 方程结合 2.3 节的温度  $T$  与最大比生长速率  $k$  和延滞期  $\lambda$  的 Belehradek 方程得出鲈鱼在 -1.8 ~ 10℃ 下的货架期预测模型

$$S_{Pseudomonas} = \frac{1}{(0.0066T + 0.0755)^2} - \frac{7.49 - N_0}{2.718(0.0089T + 0.1270)^2} \cdot \left[ \ln \left( -\ln \frac{6.33 - N_0}{7.49 - N_0} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

$$S_{Shewanella} = \frac{1}{(0.0049T + 0.0756)^2} - \frac{7.37 - N_0}{2.718(0.0112T + 0.115)^2} \cdot \left[ \ln \left( -\ln \frac{6.48 - N_0}{7.37 - N_0} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

同理, 结合 2.3 节的温度  $T$  与  $k$  和  $\lambda$  的 Arrhenius 方程得出鲈鱼在  $-1.8 \sim 10^\circ\text{C}$  下的货架期预测模型

$$S_{Pseudomonas} = \frac{1}{\exp \left( -\frac{9958.75}{T} + 31.28 \right)} - \frac{7.49 - N_0}{2.718 \exp \left( -\frac{8326.19}{T} + 26.35 \right)} \cdot \left[ \ln \left( -\ln \frac{6.33 - N_0}{7.49 - N_0} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

$$S_{Shewanella} = \frac{1}{\exp \left( -\frac{8091.00}{T} + 24.43 \right)} - \frac{7.37 - N_0}{2.718 \exp \left( -\frac{10444.35}{T} + 33.91 \right)} \cdot \left[ \ln \left( -\ln \frac{6.48 - N_0}{7.37 - N_0} \right) - 1 \right] \quad (10)$$

表 4 是鲈鱼特定腐败菌在  $0^\circ\text{C}$  和波动温度条件下预测值和实际值比较, 其中由 Belehraddek 方程得到的货架期预测模型对假单胞菌、希瓦氏菌的预测相对误差为  $-4.96\%$ 、 $-8.81\%$  和  $-7.30\%$ 、 $-5.02\%$ , 绝对值在  $0 \sim 10\%$  范围内, 表明预测模型准确度较好。由 Arrhenius 方程得到的货架期预测模型对假单胞菌、希瓦氏菌的预测相对误差较大, 其中希瓦氏菌达  $19.37\%$ , 说明由 Belehraddek 方程所得货架期模型预测效果更佳。

表 4 波动温度条件下货架期预测模型的验证

Tab. 4 Validation of shelf life prediction models under non-isothermal conditions

贮藏条件	贮藏温度/ $^\circ\text{C}$	微生物	$N_s /$ (lg CFU·g $^{-1}$ )	实测货架期/ h	预测模型 方程	预测货架期/ h	相对误差/ %
碎冰	0	假单胞菌	6.12	300	Belehraddek	285.10	-4.96
					Arrhenius	340.30	13.40
		希瓦氏菌	6.22	300	Belehraddek	273.55	-8.81
					Arrhenius	279.24	-6.92
模拟流通	波动温度	假单胞菌	6.29	276.42	Belehraddek	256.25	-7.30
					Arrhenius	303.79	9.90
		希瓦氏菌	6.15	276.42	Belehraddek	262.53	-5.02
					Arrhenius	338.25	19.37

### 3 结论

(1) 修正的 Gompertz 方程能较好描述  $-1.8 \sim 10^\circ\text{C}$  下鲈鱼假单胞菌和希瓦氏菌的生长情况, 拟合决定系数  $R^2$  均达 0.93 以上。在 Belehraddek 方程下, 温度与希瓦氏菌和假单胞菌最大比生率 ( $k$ ) 和延滞期 ( $\lambda$ ) 呈良好线性关系,  $R^2$  均大于 0.90, 拟合效果优

于 Arrhenius 方程, 反映了低温对特定腐败菌生长的抑制效果。

(2) 基于 Belehraddek 方程所建鲈鱼温度模型在  $-1.8 \sim 10^\circ\text{C}$  范围内预测误差较小, 位于模型最佳范围, 且剩余货架期预测模型的相对误差绝对值在  $0 \sim 10\%$ , 比 Arrhenius 方程建立的生长预测模型和货架期模型准确。

### 参 考 文 献

- 郭全友, 董艺伟, 李保国, 等. 淡腌青鱼中木糖葡萄糖球菌碳源代谢能力研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 258 - 266. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161032&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161032&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.032.  
GUO Quanyou, DONG Yiwei, LI Baoguo, et al. Potential of *Staphylococcus xylosus* isolated from lightly salted *Mylopharyngodon piceus* to utilize carbon sources[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 258 - 266. (in Chinese)
- MACE S, CORNET J, CHEVALIER F, et al. Characterisation of the spoilage microbiota in raw salmon (*Salmo salar*) steaks stored under vacuum or modified atmosphere packaging combining conventional methods and PCR - TTGE[J]. Food Microbiology, 2012, 30(1): 164 - 172.
- LETICIE D A G, ROBERTA H P, ALEXANDRE P P, et al. Predictive modeling of *Pseudomonas fluorescens* growth under different temperature and pH values[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2017, 48(2): 352 - 358.

- 4 陈晓宇, 朱志强, 张小栓, 等. 食品货架期预测研究进展与趋势[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8):192-199. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150826&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150826&journal_id=jcsam) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.026.  
CHEN Xiaoyu, ZHU Zhiqiang, ZHANG Xiaoshuan, et al. Research progress and trend of food shelf life prediction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8):192-199. (in Chinese)
- 5 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 Ting, LI Tingting, LI Jianrong, et al. Applicability analysis of microbial growth dynamics models and establishment of shelf-life model for salmon slices during the cold storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(5):63-73. (in Chinese)
- 6 POWELL S M, RATKOWSKY D A, TAMPLINI 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.
- 7 LIU X C, JIANG Y, SHEN S, et al. Comparison of Arrhenius model and artificial neuronal network for the quality prediction of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during storage at different temperatures[J]. LWT—Food Science and Technology, 2015, 60:142-147.
- 8 章志超, 桂萌, 彭朝辉, 等. 鲟鱼中荧光假单胞菌生长预测模型构建及货架期预测[J]. 食品科学, 2014, 35(10):278-283.  
ZHANG Zhichao, GUI Meng, PENG Zhaohui, et al. Predictive modeling of *Pseudomonas fluorescens* growth and shelf life prediction of sturgeon[J]. Food Science, 2014, 35(10):278-283. (in Chinese)
- 9 刘春春, 赵春江, 杨信廷, 等. 波动温度贮藏过程冷却猪肉货架期品质研究[J]. 食品科技, 2012, 37(12):101-106.  
LIU Shouchun, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Shelf-life quality of chilled pork during storage at fluctuating temperature[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(12):101-106. (in Chinese)
- 10 GB/T 4789.2—2016 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.
- 11 朱志伟, 李汴生, 阮征, 等. 脆肉鲩鱼片冷藏货架期的 QIM 及理化方法评价的比较研究[J]. 水产科技, 2010, 27(4):11-16.  
ZHU Zhiwei, LI Biansheng, RUAN Zheng, et al. Comparison of quality index method (QIM) and chemical and physical parameters method of assessing shelf life for refrigerated crisped grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* C. et V) fillets[J]. Fisheries Science and Technology, 2010, 27(4):11-16. (in Chinese)
- 12 SC/T 3032—2007 水产品中挥发性盐基氮测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- 13 HUANG L. A new mechanistic growth model for simultaneous determination of lag phase duration and exponential growth rate and a new Böhlerdrück-type model for evaluating the effect of temperature on growth rate[J]. Food Microbiology, 2011, 28(4):770-776.
- 14 DAVEY K. A predictive model for combined temperature and water activity on microbial growth during the growth phase[J]. Journal of Applied Microbiology, 1989, 67(5):483-488.
- 15 RATKOWSKY D, OLLEY J, MCMEEKIN T, et al. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures[J]. Journal of Bacteriology, 1982, 149(1):1-5.
- 16 李蕾蕾. 南美白对虾低温贮藏过程中的菌相变化及货架期预测模型的建立[D]. 天津: 天津商业大学, 2014.  
LI Leilei. Bacterial phase variation and establishment of shelf life prediction model for *Penaeus vannamei* during low-temperature storage[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014. (in Chinese)
- 17 王慧敏, 王庆丽, 朱军莉. 鲈鱼在微冻贮藏下品质及优势腐败菌的变化[J]. 食品工业科技, 2013, 34(20):330-334.  
WANG Huimin, WANG Qingli, ZHU Junli. Quality and dominated spoilage organisms changes of *Lateolabrax japonicus* during partially frozen storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(20):330-334. (in Chinese)
- 18 GB 2733—2015 食品安全国家标准—鲜、冻动物性水产品[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- 19 张新林, 谢晶, 钱韻芳, 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, 2016, 37(21):74-79.  
ZHANG Xinlin, XIE Jing, QIAN Yunfang, et al. Predictive growth model for *Pseudomonas fluorescens* in salmon at different temperatures[J]. Food Science, 2016, 37(21):74-79. (in Chinese)
- 20 宋志强, 刘超群, 侯温甫. 草鱼整片品质变化研究及货架期预测[J]. 食品工业, 2013, 34(9):123-127.  
SONG Zhiqiang, LIU Chaoqun, HOU Wenpu. Establishment of predictive model of *Pseudomonas* and quality change from fish fillet[J]. The Food Industry, 2013, 34(9):123-127. (in Chinese)
- 21 ROSS T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology[J]. Journal of Applied Microbiology, 1996, 81(5):501-508.