

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.03.030

# 冷链条件下马鲛鱼优势腐败菌生长动力学研究及货架期预测

Establishment and prediction of growth kinetics and shelf-life model of specific spoilage organisms in mackerel at cold chain conditions

邢家溧<sup>1</sup> 徐晓蓉<sup>2</sup> 承海<sup>1</sup> 郑睿行<sup>1</sup>

XING Jia-li<sup>1</sup> XU Xiao-rong<sup>2</sup> CHENG Hai<sup>1</sup> ZHENG Rui-xing<sup>1</sup>

张书芬<sup>1</sup> 傅晓<sup>1</sup> 周子焱<sup>1</sup> 毛玲燕<sup>1</sup>

ZHANG Shu-fen<sup>1</sup> FU Xiao<sup>1</sup> ZHOU Zi-yan<sup>1</sup> MAO Ling-yan<sup>1</sup>

(1. 宁波市食品检验检测研究院, 浙江 宁波 315048; 2. 宁波大学食品与药学院, 浙江 宁波 315211)

(1. Ningbo Institute for Food Control, Ningbo, Zhejiang 315048, China;

2. School of Food and Pharmacy, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**摘要:**为快速预测冷链马鲛鱼在不同冷链物流温度下优势腐败菌生长动态及货架期,进行了马鲛鱼 0, 4, 10 °C 下 3 种典型冷链温度的贮藏模拟试验,分析了马鲛鱼不同温度下的菌落总数、希瓦氏菌数和假单胞菌数以及各个温度下马鲛鱼货架期终点时的挥发性盐基氮含量和感官评定质量指数,采用修正的 Gompertz 和 Belehradek 方程建立了冷链马鲛鱼中优势腐败菌在 0~10 °C 的一级、二级生长预测模型与货架期预测模型。结果表明,修正的 Gompertz 方程能准确表达马鲛鱼在 3 种贮藏温度下假单胞菌的生长规律,拟合度  $R^2$  高达 0.99,采用 Belehradek 方程描述温度对最大比生长速率( $\mu_{\max}$ )和延滞期( $\lambda$ )的影响呈现良好的线性关系,相关性  $R^2 > 0.90$ 。进一步用贮藏于 2, 8 °C 马鲛鱼中假单胞菌数来验证模型的可靠性,偏差度为 1.010 4~1.024 5,准确度为 1.026 8~1.038 7,货架期预测模型的相对误差绝对值为 6.09%~8.95%。

**关键词:**冷链;马鲛鱼;优势腐败菌;预测模型;货架期

**Abstract:** The purpose of this paper was to predict the growth dynamics of dominant spoilage bacteria for Spanish mackerel in different cold-chain logistics temperatures. The total viable counts (TVC), *Shewanella* counts and *Pseudomonas* counts were analyzed respectively, and the total volatile base nitrogen (TVB-N) and sensory quality index(QI) value at the end of the shelf life of Spanish mackerel were evaluated at 0, 4, 10 °C cold-chain logistics simulation. On the basis of the dynamic change of SSO with modified Gompertz equation, Belehradek equation was used to construct the prediction models of growth and shelf life for SSO in Spanish mackerel at 0~10 °C. The results showed that the modified Gompertz equation could describe the dynamic microbial growth in Spanish mackerel at different storage temperatures with the fitting degree of  $R^2$  up to 0.99. The temperature dependence of *Pseudomonas* kinetic parameters  $\mu_{\max}$  (maximum specific growth rate) and  $\lambda$  (lag phase) were modeled using Belehradek model which the correlation greater than 0.90. Compared with experimental studies of *Pseudomonas* grown on Spanish mackerel at 2, 8 °C, the kinetic model was verified. Bias and accuracy factors were used as comparison indices and range from 1.010 4 to 1.024 5 and from 1.026 8 to 1.038 7, respectively. The absolute relative error of shelf life prediction model was 6.09%~8.95%. In conclusion, the model established in this study could accurately predict the growth dynamics of *pseudomonas* in Spanish mackerel at temperatures 0~10 °C so as to provide corresponding theoretical support for the prediction of shelf life in circulation of cold-chain Spanish mackerel and the development of

**基金项目:**国家市场监督管理总局科技计划项目(编号:2019MK080);浙江省基础公益研究计划项目(编号:LGC20C200013);宁波市自然科学基金项目(编号:2019A610438, 2019A610437, 2018A610223, 2018A610336);浙江省食品药品监督管理局 2018 年度科技计划项目(编号:201802, 201811);宁波市泛 3315 创新团队(编号:2018B-18-C);宁波市高新精英创新团队(编号:甬高科[2018]63 号);宁波市现代服务业项目(编号:2019F1017)

**作者简介:**邢家溧,女,宁波市食品检验检测研究院高级工程师,博士。

**通信作者:**郑睿行(1982—),男,宁波市食品检验检测研究院高级工程师,硕士。E-mail:13865867@qq.com

**收稿日期:**2020-01-02

reasonable preservation measures.

**Keywords:** cold-chain; Spanish mackerel; specific spoilage organism; prediction model; shelf life

马鲛鱼又被称为鲭鱼(*Scomberomorus niphonius*),是中国尤其是中国东部和东南部重要的水产养殖物种之一<sup>[1]</sup>,同时也是颇具商业价值的深海鱼种<sup>[2]</sup>。近年来,由于大小黄鱼等一些经济鱼类资源越来越短缺后,马鲛鱼因繁殖快、捕捞量可观等原因已成为中国沿海城市最重要的渔业资源之一<sup>[3]</sup>。此外,马鲛鱼不仅刺少肉多,且营养丰富,味道鲜美,深受沿海及内陆居民的喜爱,逐渐成为餐桌上不可或缺的美味佳肴<sup>[4]</sup>。但是由于目前水产品流通保鲜技术不完善,马鲛鱼在长途运输中极易受到微生物繁殖的影响而导致其腐败变质。新鲜水产品运输贮藏期间,有小部分微生物逐渐占据生长优势,同时伴随着不愉快气味的出现,该类微生物一般被称为此水产品的特定腐败菌(Specific spoilage organism, SSO)<sup>[5]</sup>,特定腐败菌的繁殖情况与水产品新鲜度下降速率密切相关。综上所述,当前亟需建立与马鲛鱼新鲜度下降有关联的特定腐败菌动态生长模型,以达到预测其货架期的目的,这无疑将是减缓马鲛鱼新鲜度下降的重要手段之一<sup>[6-7]</sup>。

目前一般采用低温冷链贮藏来减缓水产品中微生物的繁殖速率,显然,贮藏温度的高低是决定水产品货架期的关键因素,不同贮藏温度对同一水产品的品质和货架期影响差异显著<sup>[8-10]</sup>。研究<sup>[11]</sup>表明当前冷链物流系统一般将温度控制在0~20℃。目前关于水产品货架期预测模型的研究主要为一级和二级模型,一级生长模型主要采用修正的Gompertz方程,二级模型一般采用Belehradek方程,主要用于表达不同环境因素(如温度、水分活度、氛围气体等)对腐败菌繁殖的影响<sup>[12-13]</sup>。如张李浩<sup>[14]</sup>利用以上两个方程建立了罗非鱼在0~15℃贮藏温度下优势腐败菌的一级和二级生长模型,并用4, 8℃的罗非鱼贮藏数据进行验证,货架期误差为±10%。李蕾蕾<sup>[15]</sup>应用修正的Gompertz方程和Belehradek方程建立了南美白对虾腐败菌在0~20℃的一级、二级生长动力模型,并用7, 10℃的腐败菌生长数据对模型进行验证,所得货架期相对误差<5%。当前针对马鲛鱼的研究还只限于其品质在不同贮藏温度下的变化情况,利用数学方程建立马鲛鱼优势腐败菌生长动态及货架期预测模型还尚未有相关报道。

试验拟研究马鲛鱼在0, 4, 10℃ 3个典型冷链温度中的优势腐败菌及其生长动态,并在此基础上建立马鲛鱼在0~10℃温度范围内优势腐败菌的生长动力学一级、二级模型和货架期预测模型,且用2, 8℃冷链贮藏中的马鲛鱼优势腐败菌试验结果验证模型的准确性和科学性,以期达

到快速预判马鲛鱼在冷链流通过程中的新鲜度与货架期的目的,为研究马鲛鱼保鲜技术提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

马鲛鱼:宁波舟山港,挑选的马鲛鱼在体型与质量上保持基本一致(体长约为280 mm,质量为500 g左右);

营养琼脂培养基(PCA)、铁琼脂培养基(IA)、假单胞菌专用培养基(CFC):北京陆桥技术股份有限公司;

碳酸钠、浓盐酸、硫酸镁、过氯酸、原硼酸等:分析纯,北京索莱宝科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

分析天平:JA5003N型,上海丙林电子科技有限公司;

磁力搅拌器:99-1型,上海甄明科学仪器有限公司;

恒温水浴锅:8002型,上海森信实验设备有限公司;

标准超净工作台:SW-CJ-2FB型,苏州安泰空气技术有限公司;

高压灭菌锅:MLS-3750型,上海智岩科学仪器有限公司;

恒温恒湿培养箱:MGC-350HPY-2型,上海精天电子仪器有限公司;

高精度培养箱:MIR153型,日本Sanyo公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 新鲜马鲛鱼按照层冰层鱼的堆叠方式均匀放置于同规格(内径尺寸:55 cm×30 cm×20 cm)的海鲜专用泡沫箱中,为了防止鱼体之间以及鱼体与冰之间产生交叉污染和摩擦损坏,每条马鲛鱼都单独袋装,最上层碎冰面与泡沫箱盖间距约5 cm。将包装好的马鲛鱼在0, 4, 10℃进行冷链模拟运输及贮藏,试验中采用设定摇床转速为50 r/min模拟运输来模拟马鲛鱼实际运输中的振荡幅度,整个模拟过程处于避光状态。此外,在贮藏过程中需及时更换碎冰并清理由冰融化的水。每次随机取3尾马鲛鱼,试验检测部位均为马鲛鱼背部中段。

1.3.2 感官评定 采用质量指标法<sup>[16]</sup>(QIM)。感官评定专家由10名专业感官评审专家组成(男女比例一致,平均年龄35岁),随机抽取不同贮藏期的马鲛鱼按照体表、气味、鱼鳃、肌肉弹性及眼睛状况5方面对其进行感官品质评定。QIM法中不同参数的分值范围在0~10,分值越高,品质越好,将各个参数分值按照20%权重比例相加,得出最终质量指标(QI值),若马鲛鱼QI值低于5分,则表明马鲛鱼不能食用,以此确定感官拒绝点的时间。马鲛鱼感官评价参照徐晓蓉等<sup>[17]</sup>的评价标准。

1.3.3 挥发性盐基氮(TVB-N)测定 按GB 5009.228—2016执行,结果表示为每100 g样品中所含有的TVB-N毫克数。

1.3.4 微生物计数 马鲛鱼中菌落总数(TVC)、假单胞

菌和希瓦氏菌的测定按 GB 4789.2—2016 执行, 结果表示为 lg(CFU/g)。具体操作: 称取 25 g 马鲛鱼鱼肉糜置于盛有 225 mL 无菌生理盐水的无菌袋中, 混合均匀后以 10 倍梯度稀释, 根据不同贮藏时间, 选取 2~3 个合适的稀释度, 每个稀释度作 3 个平行。其中, PCA 培养基用于测定 TVC, 在 30 °C 下培养 72 h 进行计数, 假单胞菌选择性 CFC 琼脂培养基用于测定假单胞菌含量, 一般在 30 °C 培养 48 h 后计数。IA 培养基用于测定希瓦氏菌, 其在 30 °C 下培养 48 h 计数。

1.3.5 优势腐败菌动态生长模型的建立 利用修正的 Gompertz 模型<sup>[18]</sup>描述不同冷链温度下马鲛鱼特定腐败菌的生长动态, 公式为:

$$\lg N(t) = \lg N_0 + \frac{\lg N_{\max}}{\lg N_0} \times \exp[-\exp \times \frac{2.718 \times \mu_{\max}}{\lg N_{\max} - \lg N_0} \times (\lambda - t) + 1], \quad (1)$$

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;

$\mu_{\max}$ ——微生物生长的最大比生长速率,  $h^{-1}$ ;

$\lambda$ ——微生物生长的延滞时间, h。

优势腐败菌生长动态二级模型主要描述温度与腐败菌动力学参数 ( $\mu_{\max}$  和  $\lambda$ ) 的关系。采用 Belehradek 平方根方程<sup>[19]</sup>描述温度对优势腐败菌最大比生长速率  $\mu_{\max}$  和延滞期  $\lambda$  的影响。Behrdekek 方程为:

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

$$\mu_{\max}^{1/2} = b_{\mu_{\max}}(T - T_{\min\mu}), \quad (3)$$

式中:

$b$ ——常数;

$T$ ——温度, K;

$T_{\min}$ ——生长最低温度(即最大比生长速率为零时的温度), °C。

1.3.6 生长预测模型准确性评价 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的科学性, 若  $B_f$ 、 $A_f$  都为 1, 则表示所建模型预测值与实测值完全吻合<sup>[20]</sup>, 偏差度  $B_f$  和准确度  $A_f$  的公式为:

$$B_f = 10^{\frac{\sum \lg(N_{\text{预测}}/N_{\text{实测}})}{n}}, \quad (4)$$

$$A_f = 10^{\frac{\sum | \lg(N_{\text{预测}}/N_{\text{实测}}) |}{n}}, \quad (5)$$

式中:

$N_{\text{实测}}$ ——试验测定的特定腐败菌, CFU/g;

$N_{\text{预测}}$ —— $N_{\text{实测}}$  同一时间通过生长动力学模型计算所得的特定腐败菌的预测值, CFU/g;

$n$ ——试验次数。

1.3.7 马鲛鱼货架期预测与评价 根据建立的马鲛鱼优势腐败菌的一级、二级生长动力模型, 再利用其优势腐败菌从起始菌落数目 ( $N_0$ ) 增至感官排斥点时的最小腐败菌数量 ( $N_s$ ) 所需要的时间来进行货架期的预测<sup>[21]</sup>。货架期预测公式如下:

$$SL = \lambda - \frac{\lg N_{\max} - \lg N_0}{2.718 \times \mu_{\max}} \times \left\{ \ln \left[ -\ln \frac{\lg N_s - \lg N_0}{\lg N_{\max} - \lg N_0} \right] - 1 \right\}. \quad (6)$$

将实际贮藏在 2, 8 °C 的冷链马鲛鱼试验所得的货架期数据与所建模型预测的货架期数据进行对比分析, 验证建立的马鲛鱼货架期预测模型的准确性, 一般用相对误差<sup>[22]</sup>来描述。

$$RE = \frac{SL_{yc} - SL_{sc}}{SL_{yc}} \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

$RE$ ——相对误差, %;

$SL_{yc}$ ——所建模型预测的货架期值, h;

$SL_{sc}$ ——所建模型实测的货架期值, h。

## 1.4 数据处理

TVB-N、TVC、假单胞菌数、希瓦氏菌数采用 SPSS 17.0 软件进行数据分析, 结果均以(平均值±标准差)表示; 作图采用 Origin 8.6; 微生物一级生长动力模型采用修正的 Gompertz 方程描述, 微生物二级生长动力模型采用修正的 Belehradek 方程描述。

## 2 结果与分析

### 2.1 特定腐败菌及其最小腐败量 $N_s$ 的确定

马鲛鱼在贮藏期间会产生多种微生物, 但是只有其中的一种或几种才会作用于马鲛鱼的腐败变质, 即特定优势腐败菌 (SSO)。研究<sup>[23]</sup>表明, 深海鱼类中的优势腐败菌一般为假单胞菌和(或)希瓦氏菌。图 1 为马鲛鱼在 0, 4, 10 °C 冷链温度下, 其肌肉中菌落总数、假单胞菌数以及希瓦氏菌含量变化状况。从图 1 中可以看出, 马鲛鱼在 3 种温度贮藏下都呈现出菌落总数 > 假单胞菌数 > 希瓦氏菌数的变化趋势。从贮藏初期至末期, 假单胞菌数量逐渐接近于菌落总数, 成为优势菌群, 而希瓦氏菌数却随着贮藏时间的延长逐渐落后于菌落总数, 在马鲛鱼贮藏后期不具备生长优势。当贮藏末期时, 0 °C 冷链马鲛鱼中的菌落总数、假单胞菌数及希瓦氏菌数分别为 (8.03 ± 0.14), (7.86 ± 0.17), (6.75 ± 0.17) lg(CFU/g), 4 °C 冷链马鲛鱼中的菌落总数、假单胞菌数及希瓦氏菌数分别为 (8.43 ± 0.17), (8.23 ± 0.11), (7.02 ± 0.09) lg(CFU/g), 10 °C 冷链马鲛鱼中的菌落总数、假单胞菌数和希瓦氏菌数分别为 (8.43 ± 0.16), (8.12 ± 0.23), (6.62 ± 0.15) lg(CFU/g)。由此可见, 假单胞菌更适合作为冷链马鲛鱼的腐败指示菌, 该结果与试验前期利用宏基因组测序对这 3 种温度下马鲛鱼贮藏过程中优势腐败菌的试验

结果一致。张晨雪等<sup>[24]</sup>对贮藏于低温环境下的鲑鱼中微生物含量的研究中确定假单胞菌的生长要优于希瓦氏菌,该结果与试验一致。

为了达到精准预测不同贮藏温度下马鲛鱼货架期的目的,不仅需要确定马鲛鱼的优势腐败菌,还要确定其SSO的起始菌落数量( $N_0$ )与感官排斥点时的优势腐败菌的最小腐败量( $N_s$ )<sup>[15]10</sup>。由表1可知,冷链马鲛鱼在两种不同温度下货架期终点时的QI值集中在5分以下,

此时马鲛鱼已处于腐败状态,无论是外观色泽还是鱼肉硬度都已超出消费者可接受范围。同时,TVB-N的含量为 $(30.13 \pm 0.94)$  mg/100 g,该含量已超过海水鱼类中TVB-N的含量临界值 $(30 \text{ mg}/100 \text{ g})$ <sup>[25]</sup>,表明当假单胞菌数超过上述含量时,马鲛鱼基本已处于腐败状态。因此,可以确定假单胞菌的最小腐败量( $N_s$ )为 $(7.64 \pm 0.03)$  lg(CFU/g),根据假单胞菌的生长规律和最小腐败量( $N_s$ )可以预测冷链马鲛鱼的货架期。

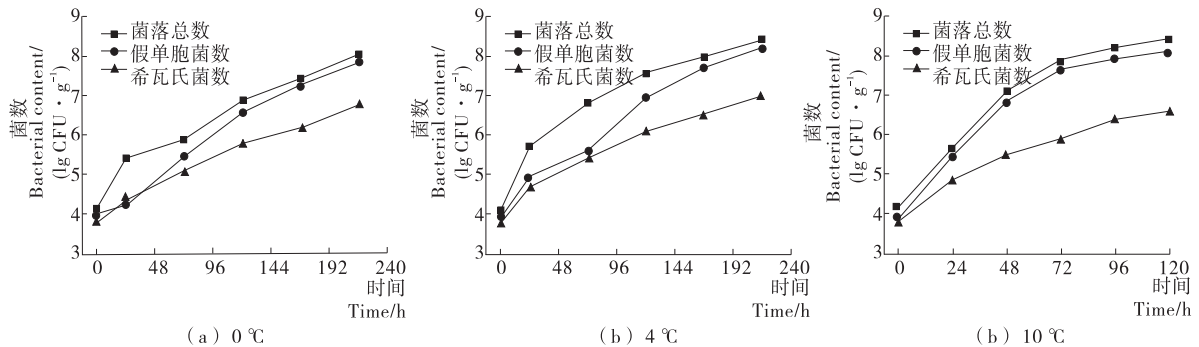


图1 不同冷链温度下马鲛鱼菌落总数、假单胞菌数及希瓦氏菌数的变化

Figure 1 Changes of TVC, *Pseudomonas* and *Shewanella* growth of cold-chain Spanish mackerel in different temperature ( $n=3$ )

表1 不同冷链温度下马鲛鱼初始及货架期终点的特定腐败菌数、TVB-N含量和QI值  
Table 1 SSO, TVB-N contents and QI values at beginning and end of storage time in Spanish mackerel at different cold-chain temperatures ( $n=3$ )

冷链温度/°C	货架期/h	$N_0/$ (lg CFU · g <sup>-1</sup> )	$N_s/$ (lg CFU · g <sup>-1</sup> )	TVB-N值/ (10 <sup>-2</sup> mg · g <sup>-1</sup> )	QI值
0	192	3.95±0.15	7.60±0.18	31.01±0.58	4.98±0.27
4	144	3.95±0.15	7.66±0.08	28.83±0.36	4.82±0.18
10	72	3.95±0.15	7.65±0.11	30.55±0.46	4.88±0.15
平均值			7.64±0.03	30.13±0.94	4.89±0.07

## 2.2 冷链马鲛鱼特定腐败菌的生长曲线(一级模型)

优势腐败菌的一级模型描述的是在特定环境下其数量和时间的关系<sup>[26]</sup>。根据构建的一级生长模型可以预测出某一时间的优势腐败菌数量。目前,用于研究优势腐败菌一级动态生长的数学模型并不单一,主要有以下几种:Logistics方程、Gompertz方程、Richards方程等<sup>[27]</sup>。依照相关文献<sup>[28]</sup>报道,修正的Gompertz方程因其准确性高、计算简便在优势腐败菌的一级生长动力学研究中更受青睐。图3为不同冷链温度(0,4,10 °C)贮藏下马鲛鱼鱼肉中含有的假单胞菌数采用修正的Gompertz方程对其生长曲线进行的拟合。由图2和表2可知,0,4,10 °C冷链温度下的马鲛鱼生长曲线均呈“S”型,并且曲线的拟合系数 $R^2$ 较高,均大于0.99,残差平方和( $\chi^2$ )均较小,说明修正的Gompertz方程能准确描述不同冷链温度下的假单胞菌生

长规律。张李浩<sup>[14]</sup>在对冷藏罗非鱼中假单胞菌生长规律的研究中得出与试验类似的结论。试验中假单胞菌的起始菌落数还未超过4 lg(CFU/g),表明样品还未进入腐败状态<sup>[29]</sup>,这与模型的成功建立要求相符,货架期终点阶段的最大菌落数集中在8 lg(CFU/g),0,4,10 °C的假单胞菌最大比生长速率 $\mu_{max}$ 分别为0.028 6,0.033 6,0.072 3 h<sup>-1</sup>,迟滞期 $\lambda$ 分别为20.68,10.85,4.25 h。显而易见,假单胞菌的最大比生长速率与迟滞期的变化都和冷链马鲛鱼的贮藏温度有关,从上述结果可知,冷链马鲛鱼贮藏温度越高,其SSO的最大比生长速率越大,但是迟滞期越短<sup>[30]</sup>。造成这种现象的原因可能是贮藏温度低于假单胞菌的生长最适温度,假单胞菌增值适应期变长,使得假单胞菌生长速率变缓,且温度越低对其生长速率抑制效果越明显,说明低温冷链处理对马鲛鱼SSO的生长有明显干扰作用,对延缓其腐败变质具有一定成效。

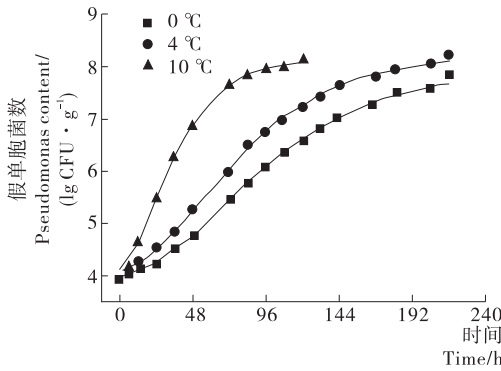


图 2 不同冷链温度下马鲛鱼中假单胞菌生长曲线

Figure 2 Growth curves of *Pseudomonas* in Spanish mackerel stored at different cold-chain temperatures ( $n=3$ )

表 2 不同冷链温度下马鲛鱼优势腐败菌生长动力学参数  
Table 2 Kinetic parameters in Spanish mackerel of *Pseudomonas* growth at different cold-chain temperatures

温度/ °C	$R^2$	$\chi^2$	$\lambda/h$	$\mu_{max}/h^{-1}$	$N_{max}/(lg CFU \cdot g^{-1})$
0	0.997 1	0.005 9	20.68	0.028 6	7.86
4	0.998 1	0.004 5	10.85	0.033 6	8.23
10	0.996 9	0.008 2	4.25	0.072 3	8.12

将表 2 中各个温度的最大比生长速率、迟滞期代入修正的 Gompertz 方程,得到如下马鲛鱼中 SSO 在 0, 4, 10 °C 的生长动力学模型:

(1) 0 °C 条件下假单胞菌的生长动力学模型:

$$\lg N(t) = \lg N_0 + \lg\left(\frac{7.86}{N_0}\right) \times \exp\left[-\exp \times \frac{2.718 \times 0.028 6}{\lg(7.86/N_0)} \times (20.68 - t) + 1\right]. \quad (8)$$

(2) 4 °C 条件下假单胞菌的生长动力学模型:

$$\lg N(t) = \lg N_0 + \lg\left(\frac{8.23}{N_0}\right) \times \exp\left[-\exp \times \frac{2.718 \times 0.033 6}{\lg(8.23/N_0)} \times (10.85 - t) + 1\right]. \quad (9)$$

(3) 10 °C 条件下假单胞菌的生长动力学模型:

$$\lg N(t) = \lg N_0 + \lg\left(\frac{8.12}{N_0}\right) \times \exp\left[-\exp \times \frac{2.718 \times 0.072 3}{\lg(8.12/N_0)} \times (4.25 - t) + 1\right]. \quad (10)$$

### 2.3 温度对马鲛鱼优势腐败菌生长动力学参数的影响 (二级模型)

二级模型 Belehraddek 方程常用于阐述微生物一级动态生长模型中的参数( $\mu_{max}$ 、 $\lambda$  等)与环境因素(温度、 $A_w$ 、空气湿度等)之间的函数关系,试验采用 Belehraddek 方程

对冷链贮藏温度与 Gompertz 方程所得的假单胞菌最大比生长速率( $\mu_{max}$ )和延滞期( $\lambda$ )的关系进行描述<sup>[31-32]</sup>。从图 3 可知,Belehraddek 方程对马鲛鱼肉中假单胞菌的生长速率和延滞期与温度的拟合系数 $>0.90$ ,表明所建立的二级模型具有较高的可信度,同时也说明 Belehraddek 方程能较好地描述不同冷链贮藏温度对马鲛鱼假单胞菌的  $\mu_{max}$  和  $\lambda$  的作用,揭示了冷链马鲛鱼 SSO 随温度变化而表现出的规律。其中,许钟等<sup>[12]</sup>对不同贮藏温度下的罗非鱼中假单胞菌的生长规律和蓝菌青等<sup>[33]</sup>对不同贮藏温度下的鲈鱼中优势腐败菌的生长规律进行研究时得到的结果都与试验类似。

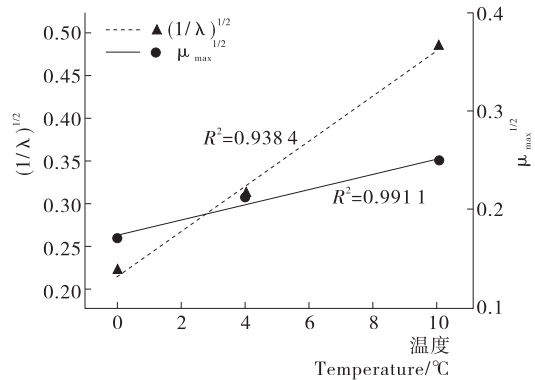


图 3 Belehraddek 方程中温度与假单胞菌最大比生长速率( $\mu_{max}$ )、延滞期( $\lambda$ )的关系

Figure 3 Effect of temperature on maximum specific growth rate ( $\mu_{max}$ ) and lag phase ( $\lambda$ ) of *Pseudomonas* with Belehraddek equation

温度与马鲛鱼 SSO 最大比生长速率( $\mu_{max}$ )和延滞期( $\lambda$ )的 Belehraddek 方程为:

$$(1/\lambda)^{1/2} = 0.026 7T + 0.213 7, \quad (11)$$

$$\mu_{max}^{1/2} = 0.007 8T + 0.173 9. \quad (12)$$

### 2.4 微生物生长预测模型的建立与可靠性评价

为客观评估所建模型的准确性和科学性,试验采用准确度( $A_f$ )、偏差度( $B_f$ )作为评判指标来描述<sup>[34]</sup>。若  $B_f$  在 10% 以内,即处于 0.90~1.10,  $A_f$  为 20% 以内,即 0.80~1.20,则表明建立的预测模型能有效预测产品中的微生物生长规律<sup>[35]</sup>。冷链马鲛鱼在 2 °C 和 8 °C 贮藏过程中,其肌肉中 SSO 假单胞菌的生长动力学参数  $\mu_{max}$ 、 $\lambda$  以及  $N_{max}$  的实测值与采用 Belehraddek 方程求得的预测值之间的比较结果如表 3 所示。表 4 为冷链马鲛鱼在不同贮藏温度下的预测值偏差度  $B_f$  和准确度  $A_f$  结果。由表 4 可知,试验建立的生长模型对贮藏于 2, 8 °C 的冷链马鲛鱼肉中的假单胞菌生长动态具有很好地预测能力,偏差度为 1.010 4~1.024 5,准确度为 1.026 8~1.038 7,都处于两个评价指标的可接受范围之内,表明试验建立的预测模型能较好预测冷链马鲛鱼在 0~10 °C 范围内假单胞菌的生长动态。

表 3 冷链马鲛鱼在 2,8 °C 贮藏中 SSO 生长动力学模型参数的预测和实测值  
Table 3 Predicted and observed values of growth kinetic parameters for SSO of cold-chain Spanish mackerel stored at 2 °C and 8 °C

贮藏温度/ °C	N <sub>0</sub> / (lg CFU · g <sup>-1</sup> )	μ <sub>max</sub> /h <sup>-1</sup>		λ/h		N <sub>max</sub> /(lg CFU · g <sup>-1</sup> )	
		预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值
2	3.82	0.035 9	0.035 2	14.016 9	16.601 1	8.07	8.12
8	3.82	0.055 8	0.056 7	5.476 9	7.656 6	8.07	8.05

表 4 冷链马鲛鱼在 2,8 °C 贮藏中假单胞菌预测值结果评价

Table 4 Evaluation of predicted contents of *Pseudomonas* in cold-chain Spanish mackerel stored at 2 °C and 8 °C

贮藏温度/°C	试验次数	偏差度	准确度
2	20	1.010 4	1.038 7
8	20	1.024 5	1.026 8

2.5 马鲛鱼剩余货架期模型建立与评价

按照冷链马鲛鱼肉中假单胞菌生长动力学模型,根据假单胞菌从最初菌数 N<sub>0</sub> 增长至感官下限时最小 SSO 数量 N<sub>s</sub> 所需要的时间来预测货架期终点。由表 1、2 可知,假单胞菌的最小腐败量 N<sub>s</sub> 为 7.64 lg (CFU/g),最大菌数 N<sub>max</sub> 为 8.07 lg (CFU/g),此时,只需测定冷链马鲛鱼刚捕捞时的假单胞菌数 N<sub>0</sub> 以及贮藏温度,即可利用 Belehradek 方程计算马鲛鱼在 0~10 °C 的最大比生长速率(μ<sub>max</sub>)和延滞期(λ)值,由式(6)求出该温度范围内的剩余货架期<sup>[36]</sup>。0~10 °C 的剩余货架期计算公式为:

$$SL = \frac{1}{(0.026\ 7T + 0.213\ 7)^2} - \frac{8.07 - N_0}{2.718 \times (0.007\ 8T + 0.173\ 9)^2} \times \left\{ \ln \left[ -\ln \left[ \frac{7.64 - N_0}{8.07 - N_0} \right] - 1 \right] \right\} \quad (13)$$

表 5 为冷链马鲛鱼贮藏 2,8 °C 时,货架期实测值与预测值两者之间的比较结果。评价预测值的可靠性由相对误差大小决定,其中 2 °C 贮藏的冷链马鲛鱼货架期预测与实测之间的相对误差为 6.09%,8 °C 时货架期预测值与实测值的相对误差为 8.95%,两者均小于 10%。表明利用建立的假单胞菌生长动力学模型,预测 0~10 °C 贮藏温度内冷链马鲛鱼的货架期时所得的结果较为可靠。

表 5 冷链马鲛鱼在 2,8 °C 贮藏过程中货架期模型评价  
Table 5 Evaluation of shelf life prediction models for cold-chain Spanish mackerel stored at 2 °C and 8 °C

贮藏温度/°C	预测 SL/h	实测 SL/h	相对误差/%
2	178.23	168	6.09
8	111.13	102	8.95

3 结论

利用修正的 Gompertz 方程构建了 0,4,10 °C 温度条件下冷链马鲛鱼特定腐败菌假单胞菌的一级生长动力学模型,拟合度 R<sup>2</sup> 高达 0.99。利用微生物二级模型 Belehradek 方程构建了冷链马鲛鱼假单胞菌的二级生长动态模型,所建模型的拟合度 R<sup>2</sup> > 0.90。将马鲛鱼在 2,8 °C 下进行冷链模拟贮藏,测定假单胞菌的繁殖状况,同时对所建立的假单胞菌二级生长模型进行了准确度评价及可信度分析。试验中冷链马鲛鱼假单胞菌在不同冷链温度贮藏过程中预测值与实测值之间的偏差度为 1.010 4~1.024 5,准确度为 1.026 8~1.038 7。表明建立的特定腐败菌生长预测模型能很好的拟合出假单胞菌在 0~10 °C 温度范围内的生长情况。此外,在马鲛鱼不同冷链贮藏下假单胞菌一级、二级生长动力学基础上建立的货架期预测模型预测马鲛鱼在 2,8 °C 的货架期与试验所得货架期的相对误差分别为 6.09%,8.95%,上述结果说明研究构建的马鲛鱼假单胞菌一级、二级生长模型以及货架期预测模型均可迅速、可靠地预测马鲛鱼在 0~10 °C 冷链温度范围内的剩余货架期。在后期还将针对实际贮藏环境下的马鲛鱼腐败情况进行更深入的研究,使得所建模型更为可靠,应用性更强。

参考文献

[1] LI Zhong-rui, WANG Bin, CHI Chang-feng, et al. Isolation and characterization of acid soluble collagens and pepsin soluble collagens from the skin and bone of Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(1): 103-113.

[2] NIAMAIMANDI N, KAYMARAM F, HOOLIHAN J P, et al. Population dynamics parameters of narrow-barred Spanish mackerel, *Scomberomorus commerson* (Lacépède, 1800), from commercial catch in the northern Persian Gulf[J]. Global Ecology and Conservation, 2015, 4: 666-672.

[3] 史策, 韩烽烽, 刘鹏, 等. 鲑鱼和鲑鱼鱼肉蛋白酶解产物功能特性及抗氧化性[J]. 肉类研究, 2013(8): 13-15.

[4] 谢婷婷. 冻藏鲑鱼品质变化的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2015: 10-13.

[5] MACÉ S, CORNET J, CHEVALIER F, et al. Characterisa-

tion 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.

[6] LIN Hao, SHAVEZIPUR M, YOUSEF A, et al. Prediction of growth of *Pseudomonas fluorescens* in milk during storage under fluctuating temperature[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 99(3): 1 822-1 830.

[7] 郭全友, 许钟, 杨宪时. 养殖大黄鱼加工和冰藏过程中鲜度和细菌类型的变化[J]. 海洋渔业, 2008(3): 261-267.

[8] 史策, 钱建平, 韩帅, 等. 水产品货架期预测模型的研究进展[J]. 食品科学, 2017(15): 306-313.

[9] 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.

[10] 李娜, 谢晶. 贮藏温度对半滑舌鳎品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 116-122.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 28577—2012 冷链物流分类与基本要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 1-2.

[12] 许钟, 肖琳琳, 杨宪时. 罗非鱼特定腐败菌生长动力学模型和货架期预测[J]. 水产学报, 2005(4): 540-546.

[13] 郭全友, 王晓晋, 姜朝军. 南美白对虾即食虾仁常温贮藏品质变化与货架期研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 121-126.

[14] 张李浩. 冷藏罗非鱼微生物生长预测模型的建立[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

[15] 李蕾蕾. 南美白对虾(*Penaeus vannamei*)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.

[16] 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(4): 11-16.

[17] 徐晓蓉, 邢家漂, 承海, 等. 马鲛鱼冷链流通过程中感官和鲜度变化的相关性分析[J]. 核农学报, 2019, 33(11): 2 195-2 202.

[18] HUANG Li-han. A new mechanistic growth model for simultaneous determination of lag phase duration and exponential growth rate and a new Bělehrádek-type model for evaluating the effect of temperature on growth rate[J]. Food Microbiology, 2011, 28(4): 770-776.

[19] DAVEY K R. A predictive model for combined temperature and water activity on microbial growth during the growth phase[J]. Journal of Applied Bacteriology, 1989, 67(5): 483-488.

[20] DOMINGUEZ S A, SCHAFFNER D W. Development and validation of a mathematical model to describe the growth of *Pseudomonas* spp. in raw poultry stored under aerobic conditions[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 120(3): 287-295.

[21] 殷磊. 即食干制对虾加工工艺及货架期预测[D]. 保定: 河北农业大学, 2018: 6-12.

[22] 吴行印, 谢晶, 王旭. 不同贮藏温度下小黄鱼货架期预测模型的建立和评价[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 84-90.

[23] 邢家漂, 徐晓蓉, 丁源, 等. 水产品中特定腐败菌分析技术的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(4): 195-201.

[24] 张晨雪, 韩颖颖, 王晓. 鲛鱼贮藏过程中的品质变化和货架期预测[J]. 食品与发酵科技, 2016, 52(2): 101-105, 110.

[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 18108—2008 鲜海水鱼[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 2.

[26] LALITHA K V, SURENDRAN P K. Microbiological changes in farm reared freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii* de Man) in ice[J]. Food Control, 2006, 17(10): 802-807.

[27] KOUTSOUMANIS K, NYCHAS G-J E. Application of a systematic experimental procedure to develop a microbial model for rapid fish shelf life predictions[J]. International Journal of Food Microbiology, 2000, 60(2/3): 171-184.

[28] DALGAARD P, VANCANNEYT M, VILALTA N E, et al. Identification of lactic acid bacteria from spoilage associations of cooked and brined shrimps stored under modified atmosphere between 0 °C and 25 °C[J]. Journal of Applied Microbiology, 2003, 94(1): 80-89.

[29] MEHTA N K, ELAVARASAN K, REDDY A M, et al. Effect of ice storage on the functional properties of proteins from a few species of fresh water fish (Indian major carps) with special emphasis on gel forming ability[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(4): 655-663.

[30] 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.

[31] 刘锋, 梅俊, 谢晶. 不同贮藏温度下大菱鲆品质变化及货架期预测模型的建立[J]. 渔业现代化, 2019, 46(4): 61-68.

[32] 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, 32(15): 158-162.

[33] 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.

[34] DOMINGUEZ S A, SCHAFFNER D W. Development and validation of a mathematical model to describe the growth of *Pseudomonas* spp. in raw poultry stored under aerobic conditions[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 120(3): 287-295.

[35] ROSS T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology[J]. Journal of Applied Bacteriology, 1996, 81(5): 501-508.

[36] ALI S, ZHANG Wan-gang, RAJPUT N, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of chicken breast meat[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 808-814.