

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.01.039

# 预测微生物学在水产品货架期中应用研究进展

## Advances on application of predictive microbiology in Shelf Life of Aquatic Products

沈 勇<sup>1,2,3,4</sup> 梅 俊<sup>1,2,3,4</sup> 谢 晶<sup>1,2,3,4</sup>SHEN Yong<sup>1,2,3,4</sup> MEI Jun<sup>1,2,3,4</sup> XIE Jing<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 2. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 3. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心〔上海海洋大学〕, 上海 201306; 4. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(1. Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering [Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China; 4. Shanghai Ocean University College of Food Science and Technology, Shanghai 201306, China)

**摘要:** 预测微生物学可通过数学建模来快速预测水产品中腐败菌和致病菌的生长规律, 从而预测水产品的货架期。文章阐述了预测微生物学初级模型、二级模型、三级模型的含义, 列举了预测微生物学在水产品货架期中的应用, 分析了预测微生物学在水产品货架期预测中存在的问题, 并对预测微生物学的应用前景进行展望。

**关键词:** 水产品; 预测模型; 货架期

**Abstract:** Aquatic products is easily deteriorated, and microorganism is the main factor that leads to the deterioration. Predictive microbiology can predict the growth of spoilage organisms in aquatic products by building mathematical models, which help us predict the shelf-life of aquatic products. This paper briefly describes the meaning of predictive microbiology primary model, secondary model and tertiary model, enumerates the applications of predictive microbiology in shelf-life, and discuss the problems of predictive microbiology in the shelf-life prediction, and its application prospect is also proposed.

**Keywords:** aquatic product; predictive model; shelf-life

**基金项目:** 农业部海水鱼产业体系(编号: CARS-47); 2016 年上海市科技兴农重点攻关项目(编号: 沪农科攻字(2016)第 1-1 号); 上海市科委平台能力建设项目(编号: 16DZ2280300); 上海市科委公共服务平台建设项目(编号: 17DZ2293400)

**作者简介:** 沈勇, 男, 上海海洋大学在读硕士研究生。

**通信作者:** 谢晶(1968—), 女, 上海海洋大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: jxie@shou.edu.cn

**收稿日期:** 2018-08-06

近年来, 水产品的安全问题越来越受消费者关注, 保鲜和加工水产品的消费比例逐渐上升<sup>[1]</sup>。自然条件下水产品很快就会腐败变质, 从而失去食用价值<sup>[2]</sup>。其腐败变质主要分为外部因素和内部因素。外部因素是指水产品所处的环境条件, 包括水分活度、温度以及微生物等; 内部因素主要是水产品自身的特性, 包括营养成分、水产品自身的酶、pH 等<sup>[3]</sup>。其中, 微生物是水产品腐败的主要原因<sup>[4]</sup>, 每年有 30% 的渔获物因微生物活动而损失<sup>[5]</sup>。水产品所携带的微生物中部分微生物参与腐败过程, 这些产生腐败臭味的菌群就是该产品的特定腐败菌<sup>[6-8]</sup>。特定腐败菌的繁殖与水产品的腐败速度和程度有很强的相关性。因此通过预测特定腐败菌的生长情况就可以预测水产品的货架期<sup>[8]</sup>。另外水产品在被消费之前可能被病原微生物污染, 这类微生物是引发食源性疾病的主要因素之一, 在发展中国家每年因食源性疾病死亡人数达 180 万, 食用被污染的水产品引发的食源性疾病约占 20%<sup>[9]</sup>。因此, 对水产品中食源性致病微生物进行风险评估是食品安全风险评估体系非常重要的部分<sup>[10]</sup>。

为了实现预测货架期和对食品安全性做出快速评估, 预测微生物学的产生和发展发挥了重要作用, 预测微生物学是运用微生物学、工程数学以及统计学进行数学建模的一门新兴学科, 通过建立的模型对特定环境条件下微生物的生长和死亡规律进行预测, 从而达到预测货架期和对食品安全性做出快速评估的目的<sup>[11]</sup>。本文对水产品货架期预测的相关研究进行了综述。

# 1 预测微生物学概述

20 世纪 80 年代初,为了解决微生物生长与食品安全性的矛盾,Ross 等<sup>[12]</sup>最先提出“微生物预报技术”这一概念,从此预测微生物学应运而生。预测微生物学的应用需要可靠的数据库和各类数学模型的建立才能预测食品中微生物的生长情况。所以,自从预测微生物学诞生后,科学家们都在不断地努力建立微生物动态数据库和模型,同时加以验证其有效性。预测微生物的模型通常被分为初级模型、二级模型、三级模型<sup>[13]</sup>。初级模型是用来描述微生物数量与时间的关系,主要包括 Gompertz 方程[式(1)]、Baranyi 方程[式(2)、(3)]及 Logistic 方程[式(4)]等,二级模型描述环境因素的变化如何影响初级模型中的参数,主要有响应面方程、平方根方程[式(5)、(6)]及 Arrhenius 方程[式(7)]等,三级模型是在初级模型和二级模型的基础上,通过计算机模拟获得预测微生物学的信息和指导(建立预测微生物软件),主要软件有美国农业部微生物食品安全机构开发的 PMP(Pathogen Modeling Program),以及英国食品标准和食品研究协会和美国农业部农业研究服务机构和下属的东部地区研究中心以及澳大利亚食品安全中心联合开发的 ComBase 等。

Gompertz 模型<sup>[14]</sup>表达式:

$$\lg N_t = A + C \times \exp\{-\exp[-B \times (t - t_1)]\}, \quad (1)$$

式中:

- $N_t$ ——在时间  $t$  时微生物的数量,CFU/g;
- $t$ ——时间,h;
- $A$ ——初始菌数;
- $B$ ——在时间  $t_1$  时相对最大比生长速率, $h^{-1}$ ;
- $C$ ——随时间无限增加时菌数量的对数值,lg CFU/mL;
- $t_1$ ——达到相对最大比生长速率所需要的时间,h。

Baranyi 方程<sup>[15]</sup>表达式:

$$N(t) = y_0 + \mu_{\max} F(t) - \ln\left[1 + \frac{e^{\mu_{\max} F(t)} - 1}{e^{N_{\max} - N_0}}\right], \quad (2)$$

$$F(t) = t + \frac{1}{v} \ln[e^{-vt} + e^{-h_0} - e^{-(vt + h_0)}], \quad (3)$$

式中:

- $t$ ——贮藏时间,d;
- $N_0$ ——初始微生物数量,lg CFU/g;
- $N_{\max}$ ——贮藏过程中微生物总数最大值,lg CFU/g;
- $\mu_{\max}$ ——微生物生长的最大比生长速率, $d^{-1}$ ;
- $v$ ——速率常数;
- $h_0$ ——迟滞时间,d。

Logistic 方程<sup>[16]</sup>表达式:

$$\frac{d_m}{d_t} = \mu(T)(1 - 10^{m-m^*}), \quad (4)$$

式中:

- $m$ ——菌体浓度的对数值;
- $m^*$ ——菌体最大浓度时的对数值;
- $\mu(T)$ ——生长速率。

平方根方程<sup>[17]</sup>表达式:

$$\sqrt{k} = b_k(T - T_{\min}), \quad (5)$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = b_\lambda(T - T_{\min}), \quad (6)$$

式中:

- $k$ ——最大生长速率, $h^{-1}$ ;
- $\lambda$ ——恒温条件下迟滞期;
- $b_k, b_\lambda$ ——方程常数;
- $T$ ——摄氏温度, $^{\circ}C$ ;
- $T_{\min}$ ——微生物没有代谢活动时的理论最小温度, $^{\circ}C$ 。

Arrhenius 方程<sup>[18]</sup>表达式:

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (7)$$

式中:

- $k$ ——化学反应速率常数;
- $k_0$ ——前因子;
- $E_a$ ——活化能,J/mol;
- $T$ ——绝对温度,K;
- $R$ ——气体常数。

# 2 预测模型在水产品货架期中的应用

## 2.1 预测模型在鱼类产品货架期中的应用

水产鱼类的质量直接决定其市场价格<sup>[16]</sup>,所以保鲜极其重要<sup>[19]</sup>。鱼类腐败变质是由多种因素导致的,但微生物的活动是最重要的因素,侯温甫等<sup>[20]</sup>通过减菌处理使得菌落总数和冷鲜草鱼特定腐败菌假单胞菌的数量下降,达到了延长其货架期的目的。

鱼类腐败变质时,其感官、微生物和化学指标都会发生相应的变化。因此,国内外许多文献<sup>[21-22]</sup>都对这些指标及其和货架期之间的关系进行研究,以便构建预测模型来预测水产鱼类的货架期。水产品中的特定腐败菌是造成水产品腐败的主要原因,评估特定腐败菌的代谢能力和菌体密度可知鱼的新鲜度,因此对特定腐败菌的生长状况进行预测就可以判断水产品的货架期<sup>[23]</sup>。王亚楠等<sup>[24]</sup>利用假单胞菌落数作为草鱼片贮藏中鲜度判定的指标之一,并通过 Gompertz 模型较好地拟合了  $0 \sim 20^{\circ}C$  条件下鲜切草鱼薄片中间假单胞菌的生长模型。初级模型 Gompertz 方程的特点是开始增长较慢,逐渐加快之后又减速,最后会趋近一条水平线,能够较好地模拟微生物典型的 S 型生长曲线,因此很多研究者<sup>[25]</sup>利用该曲线来描述特定腐败菌的生长,从而进一步判断水产品的货架期。假单胞菌是许多鱼类的特定腐败菌,Mikškrainik 等<sup>[26]</sup>确

定三文鱼的特定腐败菌是假单胞菌后,使用改进的 Gompertz 模型来预测货架期;Zhong 等<sup>[27]</sup>通过 Gompertz 模型很好地描述了假单胞菌属的生长动力学,同时经过试验证明在 0~15 °C 时,在 3.8 °C 下,预测货架期和实际货架期之间的误差分别为 3.47% 和 -7.91%,表明研究中建立的微生物生长模型对在 0~15 °C 有氧存放的罗非鱼的货架期预测是有效的;张李浩等<sup>[28]</sup>基于修正的 Gompertz 方程建立的假单胞菌生长动力学数学模型可以快速、可靠地实时预测 0~15 °C 冷藏罗非鱼的剩余货架期;Li<sup>[29]</sup>的研究表明结合 Gompertz 模型对在 0~15 °C 储存的鲫鱼也是有效的。预测微生物学中有许多的模型可以供选择,可以选择不同的模型应用于水产鱼类的货架期预测。Arrhenius 模型和平方根模型是常用的二级模型,Arrhenius 模型和平方根方程可应用于描述温度对微生物生长速率的影响,从而达到预测水产品货架期的目的。Powell 等<sup>[30]</sup>研究发现利用 Belehradek 模型对 0~10 °C 不同等温条件下气调包装中三文鱼腐败菌的生长拟合效果最佳;章志超等<sup>[31]</sup>通过研究发现基于平方根方程建立的模型可以更有效地预测有氧包装鲟鱼在 0~20 °C 贮藏温度下荧光假单胞菌的生长及相应货架期。Tsironi 等<sup>[32]</sup>利用 Arrhenius 型模型描述了加工对假单胞菌生长的影响,并开发预测金头鲷的货架期预测模型,验证表明该模型可以令人满意地预测在恒定和非等温条件下渗透预处理的金头鲷鱼片中假单胞菌属的生长,并且可以在真实冷链的变温条件下可靠地应用;雷志方等<sup>[33]</sup>结合动力学模型和 Arrhenius 方程基于各个指标分别得到金枪鱼货架期预测模型并与实际货架期进行对比,其中在贮藏温度为 0.8 °C 下,基于菌落总数的货架期预测模型的预测值与实际值的相对误差在 7% 之内。目前判断水产品安全与质量的指标除了微生物指标外,还有物理指标、化学指标以及感官指标,而利用这些指标以及组合的数据来评价构建和验证预测模型使得研究更具有说服力,同时,为了更好地预测水产品的货架期,研究者在经典模型的基础上进行修正或者组合,从而进一步开发出了更多有效的预测模型。张晨雪等<sup>[34]</sup>通过对鲑鱼研究发现菌落总数、产 H<sub>2</sub>S 菌、假单胞菌作为鲑鱼贮藏过程中的鲜度指标与感官评价具有一致性;潘文龙等<sup>[35]</sup>将河鲫鱼分别贮藏于 0, 6, 9, 12, 18 °C 条件下,根据河鲫鱼的 TVB-N、脂肪氧化(TBA)、菌落总数(TVC)、K 值所建立的货架期预测模型的货架期预测值相对误差均在 5% 以内,其中 TVC 的决定系数最大为 0.991 6;宋志强等<sup>[14]</sup>通过研究活草鱼上切取的鱼腩为样品,用一级模型和二级模型推导出货架期预测模型,并预测鱼腩在 0~15 °C 条件下的货架期,结果显示较为可靠;桂萌等<sup>[36]</sup>通过对包装鲟鱼中特定腐败菌和菌落总数生长规律建立的货架期预测模型都能很好地预测托盘包装鲟鱼片 0~20 °C 贮藏

的货架期;García 等<sup>[16]</sup>利用微生物生长的动态模型并考虑环境因素、捕捞方法、贮藏条件等因素提出一种在不同储存温度下预测鲑鱼货架期的方法。综上所述,为了预测鱼类水产品的货架期,研究人员主要是经过在不同温度下贮藏鱼类,然后根据相应的指标建立一级模型,再在该基础上选择方程建立二级模型并利用该模型预测货架期,但由于初级模型和二级模型可供选择的模型较多,研究中往往只选择某一个方程构建模型进行货架期预测,因此选择的模型不一定是最优的模型,建议今后的研究可以同时选择多个方程分别进行模拟,然后得出最适合的模型,从而减小预测值与实际值之间的误差。另外由于所测数据是不连续的,为了减小误差,在研究过程中应适当增加所测数据的量。

总之,基于合适的动力模型进行货架期预测是一个研究热点。鱼类产品由于其相比虾贝类货架期较长,预测模型能够更好地发挥其预测作用,因此,预测模型在鱼类产品中的应用研究较多。

## 2.2 预测模型在虾类产品货架期中的应用

虾味道鲜美,营养丰富,深受人们的喜爱,但虾的水分和蛋白质含量高,易被微生物利用而造成腐败。Na 等<sup>[37]</sup>在研究 ε-聚赖氨酸和壳聚糖对太平洋白虾保鲜效果时,根据腐败菌的数量来确定太平洋白虾的质量并利用 Gompertz 模型预测太平洋白虾中腐败菌的生长。陈建林等<sup>[38]</sup>制得重组虾肉制品后,经过对贮存期间虾品质变化进行分析,利用 Arrhenius 方程建立重组虾肉货架期预测模型,并且由验证实验得到的货架期预测值与实际值的相对误差均在 10% 以内。在国外也有相关的研究,Dabadé 等评估了在 28, 7, 0 °C 下储存期间被污染的热带咸水虾的微生物、感官和化学变化,并开发了预测热带虾货架期的模型<sup>[39]</sup>,之后利用 Arrhenius 方程建立恒定储存温度下货架期预测模型<sup>[40]</sup>,并验证了恒定储存温度下和变温下预测虾保质期的模型,这些模型的验证表明,它们可用于预测煮熟和新鲜热带虾的保质期。Mejlholm 等<sup>[41]</sup>研究了盐水在冷冻温度下对即食冷水虾加工和随后储存期间腐败和病原菌生存和生长的影响,建立相关微生物的生长动力模型,其结果表明这些模型准确预测盐水腌制虾中莱氏酵母和单增李斯特菌的生长速度,所以也表明这些模型可以用于开发建立即食虾的货架期预测。Diallo 等<sup>[42]</sup>利用 Baranyi 模型和 Ratkowsky 平方根模型以及 Sigmoidal 函数作为二次模型,开发动态模型对熟虾的货架期进行预测。在这些国内外的研究中,经过不同处理都模拟出有效的预测模型来预测虾类产品的货架期,说明预测模型的适用性非常强,在食品货架期预测方面具有广阔的应用前景。

## 2.3 预测模型在贝类产品货架期中的应用

鲜度是贝类的主要品质指标,是决定其价格的主要

因素,但贝类死后极易腐败变质<sup>[43]</sup>,因此对其在储存过程中品质变化的研究非常重要。曹荣<sup>[44]</sup>对太平洋牡蛎储存过程细菌菌相和品质进行了分析,并基于修正的 Gompertz 方程建立了牡蛎在冷藏条件下的货架期预测模型;王娜等<sup>[45]</sup>则在一级化学反应动力学模型和 Arrhenius 动力学方程基础之上,建立即食花蛤货架期预测模型,并验证即食花蛤货架期预测值与实测值之间的相对误差在 5% 以内;李龙飞等<sup>[46]</sup>为了能够对 0~10 °C 条件下牡蛎肉的货架期进行预测,通过一级反应和 Arrhenius 方程建立了以菌落总数为指标的货架期预测模型,其误差在 10% 以内,说明能够对 0~10 °C 低温牡蛎肉的货架期进行预测。吴雪丽等<sup>[47]</sup>通过一级动力学方程结合 Arrhenius 方程建立了扇贝货架期预测模型,并通过货架期预测值与实测值进行比较发现建立的模型可以快速可靠地预测不同温度贮藏条件下扇贝的品质和剩余货架期。Fang 等<sup>[48]</sup>开发初级和次级模型描述去壳牡蛎中沙门氏菌以及背景微生物的生长动力学模型,经过验证这些模型可用于预测储存期间未加工牡蛎的货架期。目前,对贝类的微生物预测模型的研究较少,但由于贝类营养丰富深受消费者喜爱,保证贝类产品的质量安全具有重要的意义,因此,预测模型对贝类的保鲜在未来将会发挥出更大的作用。

### 3 结语

预测微生物学可以根据产品生产、加工、运输、贮藏、销售过程中温度波动和环境因子来预测产品的货架期和安全性。在这个过程中人们可以根据环境因子和预测结果来调控这些影响因素,从而达到延长货架期和提高食用安全性的目的。

预测微生物学的核心是建立可靠的模型和基础数据库,但是由于产品基质不完全相同,所处的环境也有差异,所以在进行微生物预测时选择合适的模型非常重要。另外,虽然科学家们进行了大量的试验获得了基础数据,但是由于测得的数据都是非连续的,而且各种因子之间存在相互影响,所以存在一定误差。不过,预测微生物学具有快速判断产品货架期和安全性的优点。未来基础数据库也会越来越完善,对应各种产品和环境因子的数学模型也会越来越多。预测微生物学的准确率会大大提高,在未来预测微生物学会发挥出更大的潜力。

#### 参考文献

[1] 励建荣, 仪淑敏, 李婷婷, 等. 水产品保鲜材料和杀菌技术研究进展[J]. 中国渔业质量与标准, 2016, 6(1): 1-11.  
 [2] 张英梅, 张振华, 林贵凤, 等. 预测微生物学与水产品的安全控制[J]. 安徽农学通报, 2013(11): 25-26.  
 [3] DALGAARD P. Fresh and lightly preserved seafood[J]. Shelf-Life Evaluation of Foods, 2000, 2: 110-139.

[4] SHOKRI S, EHSANI A, JASOUR M S. Efficacy of lactoperoxidase system-whey protein coating on shelf-life extension of rainbow trout fillets during cold storage(4 °C)[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(1): 54-62.  
 [5] GRAM L, DALGAARD P. Fish spoilage bacteria: problems and solutions[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2002, 13(3): 262-266.  
 [6] WALLS I, SCOTT V N. Use of predictive microbiology in microbial food safety risk assessment [J]. International Journal of Food Microbiology, 1997, 36(2/3): 97-102.  
 [7] 严凌苓, 陈婷, 龙映均, 等. 国内外水产品保鲜技术研究进展[J]. 江西水产科技, 2013(2): 38-41.  
 [8] 励建荣, 李婷婷, 丁婷. 水产品新鲜度综合评价与货架期预测模型的构建研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(1): 1-8.  
 [9] GHALY A E, DAVE D, BUDGE S, et al. Fish spoilage mechanisms and preservation techniques: review [J]. American Journal of Applied Sciences, 2010, 7(7): 859-877.  
 [10] NIU Ben, MU Li-li, XIAO Li-li, et al. Reduction of infection risk mediated by co-culturing *Vibrio parahaemolyticus* and *Listeria monocytogenes* in refrigerated cooked shrimp[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2018, 98(12): 4454-4461.  
 [11] 赵勇, 王敬敬, 唐晓阳, 等. 水产品中食源性致病微生物风险评估研究现状[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(5): 899-905.  
 [12] 刘琳. 肉类保藏技术十八: 预测微生物学在肉品工业中的应用[J]. 肉类研究, 2009(7): 54-58.  
 [13] GONZÁLEZ S C, POSSAS A, CARRASCO E, et al. 'MicroHibro': A software tool for predictive microbiology and microbial risk assessment in foods[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 290: 226-236.  
 [14] 宋志强, 刘超群, 侯温甫. 鱼腩中假单胞菌预测模型的建立与货架期预测[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 292-297.  
 [15] 张健, 顾九春, 邹倩倩, 等. 基于 Baranyi 模型的波动温度下鲈鱼微生物生长动力学模型[J]. 食品科学, 2015, 36(5): 89-92.  
 [16] GARCÍA M R, VILAS C, HERRERA J R, et al. Quality and shelf-life prediction for retail fresh hake (*Merluccius merluccius*) [J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 208: 65-74.  
 [17] 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.  
 [18] 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.  
 [19] HEYDARI R, BAVANDI S, JAVADIAN S R. Effect of sodium alginate coating enriched with horsemint (*Mentha longifolia*) essential oil on the quality of bighead carp fillets

- during storage at 4 °C[J]. *Food Science & Nutrition*, 2015, 3(3): 188-194.
- [20] 侯温甫, 何丽, 刘伟. 鲜切草鱼鱼腩的减菌条件优化与货架期比较(英文)[J]. *农业科学与技术*, 2016, 17(2): 409-413.
- [21] SOFRA C, TSIRONI T, TAOUKIS P S. Modeling the effect of pre-treatment with nisin enriched osmotic solution on the shelf life of chilled vacuum packed tuna[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 216: 125-131.
- [22] 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.
- [23] BOZIARIS I S, PARLAPANI F F. Chapter 3-Specific Spoilage Organisms (SSOs) in Fish[M]// BEVILACQUA A, CORBO M R, SINIGAGLIA M. *The Microbiological Quality of Food*. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2017: 61-98.
- [24] 王亚楠, 侯温甫. 鲜切草鱼薄片品质变化及假单胞菌生长预测模型研究[J]. *食品工业*, 2014(4): 62-66.
- [25] REYES J E, TABILO-MUNIZAGA G, PÉREZ-WON M, et al. Effect of high hydrostatic pressure (HHP) treatments on microbiological shelf-life of chilled Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*)[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 29: 107-112.
- [26] MIKŠKRAJNIK M, YOON Y J, UKUKU D O, et al. Volatile chemical spoilage indexes of raw Atlantic salmon (*Salmo salar*) stored under aerobic condition in relation to microbiological and sensory shelf lives[J]. *Food Microbiology*, 2016, 53(Pt B): 182-191.
- [27] XU Zhong, XIAO Lin-lin, YANG Xian-shi. Microbial growth kinetics model of specific spoilage organisms and shelf life prediction for tilapia[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(4): 540-546.
- [28] 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: 50-57.
- [29] LI Xue-ying. Microbial growth kinetics model of pseudomonas and shelf life prediction for cyprinus carpio[J]. *Food & Machinery*, 2011, 27(1): 56-55.
- [30] POWELL S M, RATKOWSKY D A, TAMPLIN 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.
- [31] 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.
- [32] TSIRONI T N, TAOUKIS P S. Effect of processing parameters on water activity and shelf life of osmotically dehydrated fish filets[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 123(2): 188-192.
- [33] 雷志方, 谢晶. 金枪鱼基于理化指标的货架期预测模型的建立[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(11): 185-191.
- [34] 张晨雪, 韩颖颖, 王晓. 鲑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.
- [35] 潘文龙, 谢晶, 黎柳, 等. 河鲫鱼在不同贮藏温度下的货架期模型预测[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(16): 312-317.
- [36] 桂萌, 章志超, 刘恩歧, 等. 托盘包装鲟鱼中腐败希瓦氏菌和总菌的生长动力学及货架期预测[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(20): 331-335, 340.
- [37] NA S, KIM J H, JANG H J, et al. Shelf life extension of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) using chitosan and  $\epsilon$ -polylysine during cold storage [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 115: 1 103-1 108.
- [38] 陈建林, 张雪娇, 王向红, 等. 中国对虾重组虾肉货架期预测模型的建立[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(10): 234-240, 262.
- [39] DABADÉ D S, BESTEN H M W D, AZOKPOTA P, et al. Spoilage evaluation, shelf-life prediction, and potential spoilage organisms of tropical brackish water shrimp (*Penaeus notialis*) at different storage temperatures [J]. *Food Microbiology*, 2015, 48: 8-16.
- [40] DABADÉ D S, AZOKPOTA P, NOUT M J, et al. Prediction of spoilage of tropical shrimp (*Penaeus notialis*) under dynamic temperature regimes[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2015, 210: 121.
- [41] MEJLHOLM O, DEVITT T D, DALGAARD P. Effect of brine marination on survival and growth of spoilage and pathogenic bacteria during processing and subsequent storage of ready-to-eat shrimp (*Pandalus borealis*)[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 157(1): 16-27.
- [42] DIALLO M A, BOGAERTS P. Dynamic microorganism growth modeling for shelf life prediction: application to cooked and brined shrimps [J]. *IFAC-Papers On Line*, 2016, 49(7): 230-235.
- [43] 高捷. 毛蚶保鲜技术的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011: 1-11
- [44] 曹荣. 太平洋牡蛎在冷藏和冻藏过程中细菌菌相及品质变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 23-57.
- [45] 王娜, 王颖, 孙剑锋, 等. 动力学模型预测即食花蛤的货架寿命[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(1): 89-94.
- [46] 李龙飞, 秦小明, 周翠平, 等. 低温流通牡蛎肉贮藏期品质变化及货架期预测[J]. *渔业现代化*, 2014, 41(5): 39-43.
- [47] 吴雪丽, 刘红英, 韩冬娇. 扇贝贮藏货架期预测模型的建立与评价[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 315-319.
- [48] FANG Ting, HUANG Li-han, LIU Li-jun, et al. Mathematical modeling of growth of *Salmonella*, spp. and spoilage microorganisms in raw oysters [J]. *Food Control*, 2015, 53: 140-146.