

生鲜食品的品质动力学模型研究综述

邹毅峰, 谢如鹤, 刘广海
(广州大学, 广州 510006)

摘要: **目的** 研究生鲜食品品质动力学模型的方向。**方法** 归纳整理国内外生鲜肉、生鲜鱼、蔬菜、水果及其冷链物流过程中的品质动力学模型相关文献, 并进行比较分析。**结论** 在生鲜食品品质下降过程中, 各种品质特性的变化速率是不一样的, 但是对于某一种特定的生鲜食品而言, 总可以通过一些关键指标(如微生物菌落总数、硬度、维生素C、叶绿素等)建立品质动力学模型, 品质变化速率一般遵循Arrhenius关系式。肉类、鱼类等动物性食品的品质动力学模型遵循一级反应方程式, 而果蔬等植物性食品的品质动力学模型一般遵循零级反应方程式, 由于其要考虑的因素和检测的指标更多, 所以品质动力学模型趋于多样化。将食品品质动力学模型应用于冷链物流管理是一个新兴的研究领域, 由此建立一些简明的、能够满足物流需求的品质动力学模型和指标亟待解决。

关键词: 生鲜食品; 品质动力学模型; 冷链物流

中图分类号: TS206.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)15-0009-07

Review on Quality Kinetic Model for Fresh Food

ZOU Yi-feng, XIE Ru-he, LIU Guang-hai
(Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to provide direction and reference for the research on quality kinetic model of fresh food. This paper reviewed the quality kinetic model for fresh meat, fish, vegetable, fruit and their cold chain logistics process based on a large number of domestic and foreign literatures, with comparative analysis. The conclusions were as following: The rate of change in different kinds of quality characteristics was not the same in the declining process of fresh food quality. But the quality kinetic model could be established for a particular kind of fresh food through some key indicators such as the total number of microbial colonies, hardness, vitamin C, chlorophyll, etc., and the change rate of quality was generally consistent with the Arrhenius relation. The kinetic model of animal food such as meat and fish followed the first order reaction equation. In general, the plant food such as fruits and vegetables follows the zero order reaction equation, and its quality kinetic model tended to be diverse because more factors and indicators needed to be considered. It was a new research field to apply kinetic model in cold chain logistics management. To meet the demand of logistics, it is urgent to establish some simple and concise models and indicators.

KEY WORDS: fresh food; quality kinetic model; cold chain logistics

随着生活质量的提高, 人们对各类生鲜食品的品质要求也越来越高, 因此如何减少物流中的食品品质损耗、保证食品安全是亟待解决的问题。品质动力学模型是指从动力学变化的角度研究食品品质的损

失。针对生鲜食品的品质动力学模型进行研究, 可以建立生鲜食品的品质下降量化模型, 满足生鲜食品物流过程中对快速、无损分析和计算等要求, 为生鲜食品在物流过程中的品质和安全提供保障。

收稿日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(71172077); 2014年广州市属高校科研项目(1201421083)

作者简介: 邹毅峰(1971—), 男, 湖南娄底人, 博士, 广州大学副教授, 主要研究方向为食品冷链物流。

1 生鲜肉的品质动力学模型研究

国内外关于生鲜肉的品质动力学研究主要集中在微生物生长模型方面^[1-14]。微生物是引起生鲜肉品质变化的主要原因,影响着肉类生产、加工、运输、储存、配送和销售等整条冷链。目前,生鲜肉中微生物生长模型以 GomPertz 模型和平方根模型为多。如 Stefanie 等根据鲜猪肉中的假单胞菌数量,建立了 GomPertz 模型^[1]:

$$N(t)=A+C \cdot \exp[-\exp(-B(t-t_m))] \quad (1)$$

式中: $N(t)$ 为 t 时刻假单胞菌数量; A 为初始时刻假单胞菌数量; C 为初始和最终时刻的假单胞菌数量差值; B 为假单胞菌最大生长速率; t_m 为达到最大生长速率需要的时间。

同样,LI Miao-yun 根据鲜猪肉中的假单胞菌变化情况^[2]和鲜牛肉中的乳酸菌变化情况^[3],获得了以下形式的 GomPertz 动力学模型:

$$\gamma(t)=A+(B-A)\exp\{-\exp[-\mu(t-t_m)]\} \quad (2)$$

式中: $\gamma(t)$ 为 t 时刻微生物菌落总数的对数值; A 为初始时刻微生物菌落总数的对数值; B 为微生物最大菌落总数的对数值; μ 为微生物最大生长速率; t_m 为达到最大生长速率所需时间。

在平方根模型方面,Carmen 等根据猪肉中的沙门氏菌变化情况^[4],建立如下动力学模型:

$$\sqrt{\mu_{\max}} = b(T - T_{\min}) \quad (3)$$

式中: $\mu_{\max}$ 为微生物最大生长速率; $T_{\min}$ 为微生物的零生长温度; T 为达到微生物最大生长速率时的温度; b 为实验常数。

一些学者在研究过程中同时得到了微生物生长的 Gompertz 模型和平方根模型。如何帆根据猪肉中菌落总数变化情况^[8],建立了以下模型:

$$\begin{aligned} \lg N &= \lg N_0 + A \exp\{-\exp[-B(t-t_m)]\} \\ \sqrt{u_m} &= b_1(T - T_{\min}) \\ \sqrt{1/\lambda} &= b_2(T - T_{\min}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: N_0 为初始时刻菌落总数; A 为菌落总数增量的对数值; u_m 为微生物最大生长速率; λ 为微生物生长延滞期。其他参数同公式(3)。

同样,唐晓阳对猪肉的研究^[10],刘莹莹对羊肉的研究^[11],赵国娇等对五花肉的研究^[12],以及王宏勋等对猪腩肉的研究等^[13]都获得了 Gompertz 模型和平方根模型。这是因为 GomPertz 模型中的微生物最大生长速率 u ,以及达到最大生长速率需要的时间 t_m 远不如温

度 T 容易获得,而平方根方程则可以弥补这方面的不足,只需要对温度进行测量就可以得到微生物最大生长率和迟滞期,所以将 GomPertz 模型和平方根模型结合起来可以方便获得生鲜肉中微生物数量,进而确定生鲜肉的品质。

另外,一些学者还建立了生鲜肉中微生物生长的指数模型。如柴春祥考察了猪肉在5种温度下的菌落总数和挥发性盐基氮的变化,得到如下微生物生长模型^[14]:

$$N(t)=N_0 e^{k_s(t-\lambda)} \quad (5)$$

式中: $N(t)$ 为 t 时刻微生物总数; N_0 为初始时微生物的总数; t 为时间; k_s 为微生物的最大生长速率。

从国内外生鲜肉相关文献基本可以得出以下结论:无论何种生鲜肉(猪肉、牛肉、羊肉及肉制品),其品质变化动力学模型都是以微生物生长模型为基础的。也就是说,虽然影响生鲜肉品质的因素有各种理化指标和微生物指标,但微生物指标始终是建立其品质动力学模型的基础;微生物生长模型可以建立 GomPertz 模型或指数模型,而这2类模型中的微生物生长速率和迟滞期都可以通过平方根模型求得。另外,指数模型同样可以与平方根模型结合,通过温度变量方便地求得生鲜肉中微生物的数量。

2 生鲜鱼的品质动力学模型研究

国内外关于生鲜鱼的品质动力学模型的研究较多,对各种鱼类品种的研究也较全面^[15-25]。一般通过实验的方式,根据生鲜鱼在贮藏过程中的微生物、挥发性盐基氮水平的测量结果,拟合模型并得出模型的参数。研究表明,生鲜鱼的品质动力学模型满足一级反应方程式。如 Benjakul 等研究了鲜带鱼在不同温度条件下的品质变化,认为 Arrhenius 方程对鲜带鱼的微生物菌落总数、挥发性盐基氮(TVBN)的变化具有较高的拟合精度,其品质动力学模型为^[15]:

$$B = B_0 \exp(k_0 \exp(-\frac{E_A}{RT})t) \quad (6)$$

式中: t 为时间; B 为 t 时刻的品质指标值; B_0 为初始品质指标值; k_0 为品质变化速率; E_A 为鲜带鱼活化能(J/mol); T 为热力学温度; R 为气体常数, $R=8.3144$ J/(mol·K)。

又如佟懿等研究了鲳鱼随贮藏时间的延长,其菌落总数、TVBN、鲜度指标 K 和感官指标的变化规律,通过相应的品质能级函数分析,得到鲳鱼的总菌落数、TVBN、 K 值符合一级化学反应动力学模型,且化学

反应动力学方程的相关系数均大于0.9,具有较高的拟合精度^[16-17]。Giannakourou等建立了大西洋鲷的品质下降动力学模型^[18]:

$$F(t)=k_{\text{ref}}\exp\left[-\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right] \quad (7)$$

式中: k_{ref} 为基准速率; T_{ref} 为基准温度。其他符号意义与公式(6)相同。

Dalgaard根据菌落总数变化,建立了生鲜鱼的品质动力学模型^[19]:

$$\lg N(t)=\lg\left(\frac{N_{\text{max}}}{1+\exp(-\mu_{\text{max}}(t-t_i))}\right) \quad (8)$$

式中: N_{max} 为菌落总数最大值; μ_{max} 为微生物最大生长速率; t_i 为微生物生长迟滞期。

黄卉等建立了卵形鲳鲹的品质动力学模型^[20]:

$$A=A_0\exp[-k_0\exp(-E_A/RT)t] \quad (9)$$

式中: A_t 为时间 t 后的菌落总数; A_0 为菌落总数初始值。

柴春祥等^[21]、杨华等^[22]建立了鱼肉和美国红鱼的品质动力学模型:

$$N=N_0e^{kt} \quad (10)$$

式中: $k=k_0e^{-E_A/RT}$,其他符号意义同上。

以上研究均检测了生鲜鱼中的微生物菌落总数和挥发性盐基氮指标,说明这2个指标是表征生鲜鱼品质的关键指标。因为挥发性盐基氮实质上是腐败产生的中间产物,所以鲜鱼在物流过程中的品质下降机理也是微生物生长繁殖导致的腐败作用,其品质动力学模型符合一级化学反应方程式,同时与Arrhenius方程有较高的拟合度。

3 生鲜蔬菜的品质动力学模型研究

国内外关于生鲜蔬菜的品质动力学模型的研究很多,品种也较全面^[26-39]。如Joaquina等分别在不同的储存温度对番茄的颜色、冷害程度、硬度、质量损失和总酚含量进行了研究,通过对实验数据分析,发现番茄的颜色、品质、质量损失和总酚含量会受到不同贮藏温度的影响^[26],建立的模型为:

$$C=C_{\text{eq}}+(C_0-C_{\text{eq}})\exp\left[-k_{\text{ref}}\left[\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right]t\right] \quad (11)$$

式中: C 为评价质量的因素(包括颜色、硬度、糖度和质量); C_0 为测得的初始值; t 为储存时间; k_{ref} 为在参考温度(T_{ref})时的反应速率。

Giannakourou等根据菠菜、豌豆、青豆、秋葵等4

种蔬菜中维生素C的变化情况,建立了如下品质动力学模型^[27]:

$$K_{\text{eff}}(t)=K_{\text{ref}}\sum_i\left(\exp\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_i}-\frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right]t_i\right) \quad (12)$$

式中: K_{ref} 为参考温度下维生素C损失的价值; T_{ref} 为参考温度。

Lana等根据土豆硬度变化情况,建立了品质动力学模型^[28]:

$$F=(F_0-F_{\text{fix}})e^{-kt}+F_{\text{fix}} \quad (13)$$

式中: F 为经历时间 t 后的硬度; F_0 为初始硬度; F_{fix} 为不变部分的硬度; k 为反应的速率常数。

Chairat等根据西兰花的 CO_2 变化情况,建立了如下品质动力学模型^[29]:

$$A_t=A_0\exp(-\beta AR_{\text{CO}_2}) \quad (14)$$

式中: A_0 为抗坏血酸的初始浓度(mg/100 g); A_t 为时间 t 后抗坏血酸的浓度(mg/100 g); R_{CO_2} 为 CO_2 的累积值(mg/kg); β 为实验参数。

此外,Oliveira等对蘑菇^[30]、张利平等对鸡毛菜^[31]、陈杰等对香菇^[32]、宋晨等对花椰菜^[33]、任珂等对青花菜颜色的研究^[34]均得到了公式(15)所示的品质动力学模型(Arrhenius方程):

$$K=A\exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (15)$$

通过关于蔬菜品质动力学研究可知,一般情况下,蔬菜在冷链物流过程中品质衰减程度与时间、温度、活化能、气体等密切相关,其品质腐败主要取决于新陈代谢的速率,品质变化服从零阶反应方程;无论何种蔬菜(番茄、花椰菜、土豆、菠菜、鸡毛菜等),采用何种评价指标(颜色、硬度、质量损失、总酚含量、VC损失等),最后得到的品质动力学模型中反应速率常数 k 随温度变化的关系基本符合Arrhenius方程,模型区别仅在于是否考虑设定参考值,如参考温度 T_{ref} ,参考反应速率常数 k_{ref} 。

4 生鲜水果的品质动力学模型研究

从目前各文献研究所得到的数据和分析结果来看,水果在物流过程中品质变化率与时间、温度、活化能、呼吸作用等具有密切关系,新陈代谢的快慢决定着其品质的下降速率,且水果品质下降速率与温度关系一般满足Arrhenius方程。在动力学模型方面,有可能遵循零级反应方程式,也有可能遵循一级反应方程式^[40-50]。如Yan等研究了不同温度条件下香蕉水分活度随时间的变化量,实验结果表明在储存

过程中香蕉的水分活度遵循指数规律增加(即一级反应),水分活度变化速率满足 Arrhenius 关系式^[40]:

$$K_{aw} = K_{ref} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \\ a_w = a_{we} + (a_{wo} - a_{we}) \cdot \exp\left(K_{ref} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)t\right) \quad (16)$$

式中: K_{aw} 为水分活度变化值; a_w 为在时间 t 的水分活度; a_{we} 为平衡时的水分活度; a_{wo} 为初始时的水分活度; K_{ref} 为在参考温度(T_{ref})时的水分活度变化速率。

Lise 等研究了红色水果中维生素 C 的变化情况,建立了如下品质动力学模型^[41]:

$$C = C_{\infty} + (C_0 - C_{\infty}) \cdot \exp(-k_a \cdot t) \\ k = k_{ref} \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \quad (17)$$

式中: C_0 为维生素 C 初始值; C_{∞} 为维生素 C 最终值; k_a 为一阶反应退化率; k_{ref} 为维生素 C 在参考温度(T_{ref})时的降解速率。

同样,Medeni 根据猕猴桃颜色的变化^[42]、Chen 等根据香蕉维生素 C 的变化^[43]、Ben í tez 等根据菠萝硬度的变化^[44]、Robert 等根据香梨硬度的变化^[45]、狄华涛根据杨梅腐烂指数的变化^[46]都建立了一级反应方程式。余美丽等人则研究了不同贮藏温度对枇杷硬度的影响,得到硬度随时间变化的零级反应方程式^[47]:

$$Y = Y_0 + 5.14 \times 10^{10} \times \exp(-8 \times 10^3/T)t \quad (18)$$

式中: Y_0 为初始硬度。

同样,邢宏杰根据草莓的腐烂指数变化^[48]、邓云等根据葡萄的硬度变化^[49]、高梦祥等根据苹果维生素 C 变化^[50]分别得到了零级反应方程式。

另外,也有一些学者应用其他方法对水果进行了研究,获得了不同形式的动力学模型。如 Edward 将有限元模型用于分析苹果果实彼此之间的或与刚性壁碰撞的动态过程,如卡车运输,分拣操作或任何其它装卸处理过程,得到苹果在运输过程中品质下降模型^[51]:

$$c = \sum_i (\delta_n(t_i) - \delta'_n(t_i))^2 + \sum_i (\dot{\delta}_n(t_i) - \dot{\delta}'_n(t_i))^2 \quad (19)$$

式中: c 为碰撞参数方程的价值函数; t 为时间; δ_n , δ'_n 为有限元模型的位移数据。

Odriozola 等用威布尔动力学模型研究了高氧贮藏环境下的鲜切草莓在 5~20 °C 间抗氧化性能的变化,结果表明维生素 C 的变化符合一阶反应方程^[52],模型如下:

$$R_A = R_{A0} \exp[-(t \cdot k_a)^\gamma] \quad (20)$$

式中: R_A 为相对的抗氧化性质(%); R_{A0} 为曲线的截距(%); γ 为形状参数; t 为储存时间; k_a 为动力学常数。

Antonio Barberis 等用一种新型低成本的遥测设备来确定采后的鲜切水果(猕猴桃,菠萝和西瓜)中维生素 C 变化,结果表明 3 种鲜切水果在加工、包装、冷藏期间 VC 含量都有所下降,且符合以下动力学模型^[53]:

$$A_t = A_0(1/2)^{t/t_{1/2}} \quad (21)$$

式中: A_0 为抗坏血酸的初始浓度(mg/100 g); A_t 为一段时间后抗坏血酸的剩余浓度(mg/100 g); t 为半衰期。

李会会对草莓和杨梅果实采后贮藏期间一系列酶活性的变化进行了分析,探究了果实乙醇含量和腐烂指数之间存在的联系,得到了品质动力学预测模型^[54]:

$$y = b_0 + b_1 \chi \quad (22)$$

式中: y 为果实腐烂指数; χ 为果实乙醇含量($\mu\text{g/g}$); b_0 为回归线的截距; b_1 为回归线的斜率。

5 生鲜食品冷链物流过程中的品质动力学模型

生鲜食品冷链物流是由采收(屠宰)、分级、包装、运输、储存、配送等过程组成,而每个过程的时间和温度都可能有所差异。现有研究均根据 TTT 理论的叠加原理得到物流过程中的品质动力学公式,如 Rong 等基于果蔬供应链生产及零售环节鲜果质量变化的研究,构建零级和一级品质变化模型^[36]:

$$q = q_0 - \sum_{i=1}^m k_0 t_i \exp\left[-\frac{E_a}{RT_i}\right] \quad (23)$$

$$q = q_0 \exp\left[-\sum_{i=1}^m k_0 t_i \exp\left[\frac{E_a}{RT_i}\right]\right] \quad (24)$$

Giannakourou 等根据多环节物流过程中菠菜等 4 种蔬菜中的维生素 C 变化情况得到了与公式(23)类似的一级品质变化模型^[27]。邹毅峰等则根据微生物生长模型和致病菌的剂量-反应曲线推导出食品冷链物流单元的安全可靠度模型,并根据递推关系得到食品经过 i 个冷链单元后的安全可靠度 R_i ^[55-56]。

$$R_i = R_0 - d \sum_{j=1}^i \Delta T_j^2 t_j \quad (25)$$

式中: R_0 为食品初始时刻的安全可靠度; R_i 为食品经过 i 个冷链单元后的安全可靠度; d 为由冷链物流环境和食品中的致病菌种类确定的实验参数; $\Delta T_j = T_j - T_{min}$,其中 T_j 为冷链单元 j 的温度, T_{min} 为微生物零生长温度。

6 结语

由于生鲜食品品种繁多,品质属性范围非常广,物流条件也多样,因此建立生鲜食品的品质动力学模型是一件非常复杂的工作。在生鲜食品品质下降过程中,并不是所有品质特性(如安全性、营养性和可食用性等)都服从同一个数值模型,各种品质特性的变化速率也不同,但是对于某一种特定的生鲜食品而言,总能通过一些关键指标(如微生物菌落总数、硬度、维生素C、叶绿素等)建立品质动力学模型,品质变化速率也往往符合Arrhenius关系式。

一般而言,肉类、鱼类等动物性食品的腐败变质机理是由于微生物的生命活动和酶所进行的生物化学反应所造成的,所以其品质动力学模型遵循一级反应方程式。果蔬等植物性食品品质下降的机理主要是新陈代谢,其品质动力学模型往往遵循零级反应方程式,但是植物性生鲜食品要考虑的因素和检测的指标更多,尤其要考虑物流过程中碰撞和振动的影响,所以品质动力学模型趋于多样化。

现有研究根据TTT理论的叠加原理得到有多个物流环节的生鲜品质动力学模型,但迄今为止还没有文献对叠加原理进行专门实验验证。这个命题还有待进一步研究。因为如果模型满足叠加原理,则意味着各物流环节是相互独立的,前后环节之间不存在相互影响,但这与冷链物流必须协同管理似乎有冲突。另外,生鲜食品的品质动力学模型都较复杂,参数较多,而且大多是指数形式,难于满足生鲜食品物流过程中对快速、无损分析的要求,进行系统优化时求解也十分困难。将食品品质动力学模型应用于冷链物流管理是一个新兴的研究领域,因此,建立一些简明的、能够满足物流需求的品质动力学模型和指标是非常重要的。

参考文献:

- [1] STEFANIE B, ANTONIA A, BRIGITTE P, et al. Influence of Cold Chain Interruptions on the Shelf Life of Fresh Pork and Poultry[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2012, 47: 1639—1646.
- [2] LI Miao-yun, NIU Hui-min, ZHAO Gai-ming, et al. Analysis of Mathematical Models of *Pseudomonas* Spp Growth in Pallet-package Pork Stored at Different Temperatures[J]. *Meat Science*, 2013, 93: 855—864.
- [3] LI M Y, SUN X M, ZHAO G M, et al. Comparison of Mathematical Models of Lactic Acid Bacteria Growth in Vacuum-packaged Raw Beef Stored at Different Temperatures[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(4): 600—604.
- [4] CARMEN P, GASPAR A P, ELENA C C, et al. Modeling *Salmonella* Concentration throughout the Pork Supply Chain by Considering Growth and Survival in Fluctuating Conditions of Temperature, pH and aw[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2011, 145: 96—102.
- [5] FRANCIELI D, FERNANDO P R, GUIOMAR D, et al. Modelling Growth of *Lactobacillus Plantarum* and Shelf Life of Vacuum-packaged Cooked Chopped Pork at Different Temperatures[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2013, 48: 2580—2587.
- [6] WANG Jun, RAHMAN S M E, MYOUNG P, et al. Modeling the Response of *Listeria Monocytogenes* at Various Storage Temperatures in Pork with/without Electrolyzed Water Treatment[J]. *Food Science*, 2012, 21(6): 1549—1555.
- [7] 肖虹, 谢晶. 冷却肉品质变化动力学模型的试验研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(1): 361—363.
XIAO Hong, XIE Jin. Research on the Kinetic Model of Chilled Pork Quality[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(1): 361—363.
- [8] 何帆. 冷却猪肉贮藏过程中的品质变化及货架期预测模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
HE Fan. Study on Quality Change and Prediction Model for Shelf-life of Chilled Pork[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [9] 乔磊, 卢立新, 唐亚丽, 等. 酶型时间温度指示器监测冷却猪肉贮藏货架期[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 263—269.
QIAO Lei, LU Li-xin, TANG Ya-li, et al. Monitoring Storage Shelf Life for Chilled Fresh Pork Using Enzymatic Time-temperature Indicator[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 263—269.
- [10] 唐晓阳. 冷却猪肉的货架期预测模型[D]. 上海: 上海海洋大学, 2010.
TANG Xiao-yang. The Shelf Life Predictive Model of Chilled Pork[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2010.
- [11] 刘莹莹. 冷却羊肉品质变化的研究及微生物生长预测模型的建立[D]. 银川: 宁夏大学, 2012.
LIU Ying-ying. Study on the Quality Change of Cooling Mutton and the Establishment of Microbial Growth Forecast Model[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2012.
- [12] 赵国娇, 王宏勋, 刘明芹. 冷鲜五花肉中假单胞菌预测模型的建立与验证[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(12): 217—220.
ZHAO Guo-jiao, WANG Hong-xun, LIU Ming-qin. Establishment and Validation of Growth Predictive Model of *Pseudomonas* from Chilled Marbled Meat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(12): 217—220.
- [13] 王宏勋, 黄娜丽, 宋志强. 冷鲜猪腩肉假单胞菌生长动力学模型的分析研究[J]. *食品工程*, 2012(4): 31—34.
WANG Hong-xun, HUANG Na-li, SONG Zhi-qiang. Study

- on the Growth Kinetics Model of *Pseudomonas* in Chilled Streaky Meat[J]. Food Engineering, 2012(4):31—34.
- [14] 柴春祥. 猪肉品质变化的动力学模型[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(6):10—12.
- CHAI Chun-xiang. Research on the Kinetics Model of Pork Quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(6):10—12.
- [15] BENJAKUL S, SEYMOUR T A, MORRISSEY M T. Method for Forecasting Fresh Hairtail Quality Variation[J]. Journal of Food Science, 2005(5):3369—3375.
- [16] 佟懿, 谢晶. 鲳鱼品质变化动力学模型的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(5):489—494.
- TONG Yi, XIE Jing. Experimental Research on Kinetic Model of Pomfret[J]. Journal University of Shanghai for Science and Technology, 2009, 31(5):489—494.
- [17] 佟懿, 谢晶. 动力学模型预测鲳鱼货架寿命的实验研究[J]. 食品科学, 2009, 30(10):265—268.
- TONG Yi, XIE Jing. Experimental Research on Application of Kinetic Model to Predict Shelf-life of Pampus Argenteus[J]. Food Science, 2009, 30(10):265—268.
- [18] GIANNAKOUROU M C, KOUTSOUMANIS B K, NYCHAS J G E, et al. Field Evaluation of the Application of Time Temperature Integrators for Monitoring Fish Quality in the Chill Chain[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 102:323—336.
- [19] DALGAARD P. Modelling of Microbial Activity and Prediction of Shelf Life for Packed Fresh Fish[J]. International Journal of Food Microbiology, 1995, 26:305—317.
- [20] 黄卉, 李来好, 杨贤庆, 等. 卵形鲳鲹贮藏过程中品质变化动力学模型[J]. 食品科学, 2010, 31(20):490—493.
- HUANG Hui, LI Lai-hao, YANG Xian-qing, et al. Kinetic Model of Quality Change for *Trachinotus Ovatus* during Storage[J]. Food Science, 2010, 31(20):490—493.
- [21] 柴春祥, 杜利农. 动力学模型在鱼肉品质变化中的应用[J]. 食品工业科技, 2006, 27(1):75—76.
- CAI Chun-xiang, DU Li-nong. Application of Kinetic model in the Change of Fish Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2006, 27(1):75—76.
- [22] 杨华, 李敏, 揭珍, 等. 美国红鱼贮藏过程中品质变化动力学模型研究[J]. 食品科技, 2012, 37(11):136—140.
- YANG Hua, LI Min, JIE Zhen, et al. Kinetics Model of Quality Change during Storage of *Sciaenops Ocellatus*[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(11):136—140.
- [23] BOEKEL M A J S. Statistical Aspects of Kinetic Modeling for Food Science Problems[J]. Food Chemistry, 2010(3):258—269.
- [24] 马妍, 谢晶, 周然, 等. 暗纹东方鲀在不同冻藏温度下品质变化的动力学研究[J]. 中国农业大学学报, 2012, 7(1):138—142.
- MA Yan, XIE Jing, ZHOU Ran, et al. Quality Degradation Kinetics of *Takifugu Obscure* at Different Storage Temperatures[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 7(1):138—142.
- [25] 郭全友, 王锡昌, 姜朝军, 等. 养殖尼罗罗非鱼鲜度特征及动力学模型构建[J]. 食品科学, 2013, 34(4):245—249.
- GUO Quan-you, WANG Xi-chang, JIANG Chao-jun, et al. Quality Kinetic Model and Quality Characteristics of Cultivated *Oreochromis Niloticus*[J]. Food Science, 2013, 34(4):245—249.
- [26] JOAQUINA P, CARLA A, MARTA A, et al. Kinetics of Changes in the Physical Quality Parameters of Fresh Tomato Fruits (*Solanum Lycopersicum* cv 'Zinac') during Storage[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114:338—345.
- [27] GIANNAKOUROU M C, TAOUKIS P S. Kinetic Modelling of Vitamin C Loss in Frozen Green Vegetables under Variable Storage Conditions[J]. Food Chemistry, 2003, 83:33—41.
- [28] LANA M M, TIJSKENS L M M, KOOTEN O. Effects of Storage Temperature and Fruit Ripening on Firmness of Fresh Cut Tomatoes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 35:87—95.
- [29] CHAIRAT T, KOHEI N, SHIGENORI M. Prediction of Ascorbic Acid Content in Broccoli Using a Model Equation of Respiration[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 47:373—381.
- [30] OLIVEIRA F, SOUSA-GALLAGHER M J, MAHAJAN P V, et al. Development of Shelf-life Kinetic Model for Modified Atmosphere Packaging of Fresh Sliced Mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111:466—473.
- [31] 张利平, 谢晶, 何蓉, 等. 鸡毛菜的颜色变化动力学及两种货架期预测方法[J]. 食品工业科技, 2013, 34(16):75—78.
- ZHANG Li-ping, XIE Jing, HE Rong, et al. Colour Kinetic Change and Shelf Life Prediction of Chinese Small Cabbage (*Brassica Rapa* L *Chinensis* Group) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(16):75—78.
- [32] 陈杰, 刘晓丹, 邓伯祥, 等. 不同温度下香菇品质动力学及货架期的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(5):2243—2245.
- CHEN Jie, LIU Xiao-dan, DENG Bo-xiang. Research on Kinetics of Quality and Shelf Life of Shiitake under Different Temperatures[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(5):2243—2245.
- [33] 宋晨, 刘宝琳, 王欣, 等. 花椰菜在不同贮藏温度下的品质变化及货架期预测[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(11):168—171.
- SONG Chen, LIU Bao-lin, WANG Xin, et al. The Quality Changes of Broccoli Stored at Different Temperatures and Its Shelf Life Prediction[J]. Food and Fermentation Industries, 2009, 35(11):168—171.
- [34] 任珂, 屠康, 潘磊庆, 等. 青花菜贮藏期间颜色变化动力学模型的建立[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8):146—150.
- REN Ke, TU Kang, PAN Lei-qing, et al. Modeling of the Kinetics of Color Change of Broccoli during Storage[J]. Transac-

- tions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(8): 146—150.
- [35] WANG Xiao-jun, LI Dong. A Dynamic Product Quality Evaluation Based Pricing Model for Perishable Food Supply Chains[J]. Omega International Journal of Management Science, 2012, 40: 906—917.
- [36] RONG AI-YING, AKKERMAN R, MARTIN G. An Optimization Approach for Managing Fresh Food Quality throughout the Supply Chain[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 131: 421—429.
- [37] JORGE S, ANDRS C, LENA G, et al. Principal Component Analysis as an Exploration Tool for Kinetic Modeling of Food Quality: A Case Study of a Dried Apple Cluster Snack[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119: 229—235.
- [38] SIMONE Z, LUCIO Z. Chilled or Frozen Decision Strategies for Sustainable Food Supply Chains[J]. Int J Production Economics, 2012, 140: 731—736.
- [39] 谢晶, 张利平, 苏辉. 上海青蔬菜的品质变化动力学模型及货架期预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 271—278.
- XIE Jing, ZHANG Li-ping, SU Hui, et al. Quality Kinetic Model and Shelf Life Prediction of Green Vegetable (Brassica Rapa var Chinensis)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 271—278.
- [40] YAN Zheng-yong, SOUSA-GALLAGHER M J. Mathematical Modelling of the Kinetic of Quality Deterioration of Intermediate Moisture Content Banana during Storage[J]. Journal of Food Engineering, 2007(5): 359—367.
- [41] LISE V, RAGNE B. Modelling of Vitamin C Degradation during Thermal and High-pressure Treatments of Red Fruit[J]. Food Bioprocess Technol, 2013, 6: 1015—1023.
- [42] MEDENI M. Kinetics of Colour Change of Kiwifruits during Hot Air and Microwave Drying[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48: 169—175.
- [43] CHEN C R, RAMASWAMY H S. Color and Texture Change Kinetics in Ripening Bananas[J]. IWT, 2002, 35: 415—419.
- [44] BENTEZ S, CHIUMENTI M, SEPULCRE F, et al. Modeling the Effect of Storage Temperature on the Respiration Rate and Texture of Fresh Cut Pineapple[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113: 527—553.
- [45] ROBERT C S, NURIA G M. Effect of Minimal Processing on the Textural and Structural Properties of Fresh-cut Pears[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, 82: 1682—1688.
- [46] 狄华涛. 杨梅果实采后腐烂指数及货架期预测模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- DI Hua-tao. Studies on Prediction Models for Fruit Decay and Shelf-life of Postharvest China Bayberry[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [47] 余美丽. 枇杷果实采后品质变化及硬度预测模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- YU Mei-li. Study on Quality Changes and Firmness Prediction Model of Loquat Fruit after Harvest[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [48] 邢宏杰. 草莓果实采后腐烂及货架期预测模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- XING Hong-jie. Studies on Prediction Models for Fruit Decay and Shelf-life of Postharvest Strawberry[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [49] 邓云, 吴颖, 李云飞. 葡萄在贮藏和货架期间品质的预测模型[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 93—97.
- DENG Yun, WU Ying, LI Yun-fei. Mathematical Model of Mass and Firmness Loss of Grapes during Storage and Shelf Life Periods[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 93—97.
- [50] 高梦祥, 喻萍萍. 苹果中维生素C氧化动力学模型研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2008, 5(3): 69—71.
- GAO Meng-xiang, YU Ping-ping. Oxidation Kinetics Model of Vitamin C in Apple[J]. Journal of Yangtze University (Nat Sci Ed), 2008, 5(3): 69—71.
- [51] EDWARD D, MICHAEL V Z, et al. Finite Element Analysis of the Dynamic Collision of Apple Fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008(2): 260—276.
- [52] ODRIOZOLA-SERRANO I, SOLIVA-FORTUNY R, MARTIN-BELLOSO O. Influence of Storage Temperature on the Kinetics of the Changes in Anthocyanins, Vitamin C, and Antioxidant Capacity in Fresh-cut Strawberries Stored under High-oxygen Atmospheres[J]. Journal of Food Science, 2009, 74: 184—191.
- [53] ANTONIO B, ANGELA F, MARIO S, et al. Detection of Postharvest Changes of Ascorbic Acid in Fresh-cut Melon, Kiwi, and Pineapple, by Using a Low Cost Telemetric System[J]. Food Chemistry, 2012, 135: 1555—1562.
- [54] 李会会. 草莓和杨梅果实乙醇积累机理及腐烂预测模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- LI Hui-hui. Studies on Mechanism of Ethanol Accumulation and Prediction Models for Fruit Decay of Strawberry and Chinese Bayberry[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [55] 邹毅峰, 林朝朋, 谢如鹤. 基于安全可靠度的食品物流系统优化[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 34(6): 1284—1288.
- ZOU Yi-feng, LIN Chao-peng, XIE Ru-he. Food Logistics System Optimum Based on Safety Reliability[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Technology), 2010, 34(6): 1284—1288.
- [56] ZOU Yi-feng, XIE Ru-he. Application of Cold Chain Logistics Safety Reliability in Fresh Food Distribution Optimization[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2013, 5(3): 356—360.