

食品货架期预测研究进展与趋势*

陈晓宇^{1,2} 朱志强³ 张小栓^{1,2} 穆维松^{1,2} 傅泽田^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;
3. 国家农产品保鲜工程技术研究中心, 天津 300384)

摘要: 作为食品领域的重要研究方向, 货架期预测已成为国内外研究的热点问题。在整理和总结现有相关研究文献的基础上, 阐述了食品货架期预测的研究机理, 梳理了相关研究思路与方法; 对当前研究中采用的5种方法(基于化学动力学的方法、基于微生物生长动力学的方法、BP神经网络方法、威布尔危险值分析方法和 Q_{10} 模型等基于温度的方法)进行了比较分析; 对应用于肉类、水产品、果蔬等不同类别食品并取得良好预测效果的品质指标及所采用的模型方法进行了总结和分析。最后分析了食品货架期预测研究的现状, 并展望了发展趋势。

关键词: 食品 货架期预测 动态监测

中图分类号: TS201.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0192-08

Research Progress and Trend of Food Shelf Life Prediction

Chen Xiaoyu^{1,2} Zhu Zhiqiang³ Zhang Xiaoshuan^{1,2} Mu Weisong^{1,2} Fu Zetian^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. National Engineering Technology Research Center for Preservation of Agricultural Products, Tianjin 300384, China)

Abstract: As an important research direction of food sector, shelf life prediction has become a hot topic worldwide. The related research literatures were summarized, the research mechanism and research progress of food shelf life prediction were reviewed, and the related research ideas and research methods were clarified. Five types of research methods were analyzed and compared, including the method based on chemical kinetics, the method based on growth kinetics of microbial, the method of back propagation (BP) neural networks, the method of Weibull hazard analysis and the method based on temperature such as Q_{10} model. Quality indexes and research models used in different kinds of foods' shelf life prediction, such as meat, aquatic product, fruits and vegetables, which were proved to be available to achieve good results, were summarized. Finally, the status of food shelf life prediction research was analyzed and its development tendency was presented in the respects of research mechanism, study object and its surroundings, research applications and dynamic monitoring. Analysis indicates that food shelf life prediction tends to be more accurate and utility.

Key words: Food Shelf life prediction Dynamic monitoring

引言

货架期是指食品在贮运过程中, 在推荐条件下能够保证食品安全, 保持理想的感官、理化和微生物

特性, 并保留标签上所声明的营养数据的一段时间^[1]。随着我国经济的高速发展, 人们生活水平不断提高, 人们对食品的品质也提出了更高的要求。而货架期是消费者了解食品品质的重要依据之一,

收稿日期: 2014-10-31 修回日期: 2014-11-27

* 国家自然科学基金资助项目(31371538)和新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-11-0491)

作者简介: 陈晓宇, 博士生, 主要从事农业信息化技术研究, E-mail: chen_xiaoyu@cau.edu.cn

通讯作者: 傅泽田, 教授, 博士生导师, 主要从事农业系统工程与信息化技术、食品质量安全追溯与监测研究, E-mail: fzt@cau.edu.cn

对保障食品安全具有重要意义。

通常情况下,货架期是通过食品外包装上标签来标示。但是,传统货架期标注方法在实际流通过程中存在着“两难困境”:一方面,如果食品处于良好的贮运条件下,其实际可流通期限可能远滞后于标示的保质期,但却因达到标注的保质期而被提前销毁,造成巨大的经济损失和不必要的浪费;另一方面,如果食品处于恶劣或异常的贮运条件下,可能造成在架销售的保质期内产品实际已经变质,存在着严重的质量风险与隐患。

因此,如何集成食品贮运环境的动态信息,合理地预测食品剩余货架期,缩小食品货架期预测值与实际流通期限之间的差距,在保障食品安全的基础上,最大程度地减少因标示保质期不准确而造成的不必要损失或减少质量安全隐患,已成为当前研究的热点之一^[2-4]。

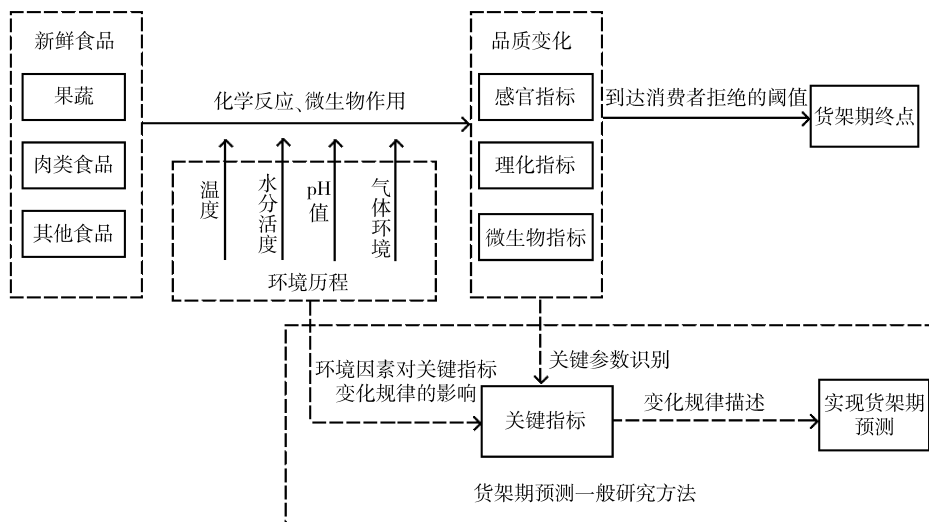


图1 食品品质衰变机理与货架期研究方法

Fig. 1 Food quality decay mechanism and shelf life prediction methods

货架期预测研究方法主要有2种类型。第1种是在不考虑食品品质变化过程中所发生的具体化学变化或内在原因的基础上,将食品品质变化过程作为黑盒,仅通过数据相关性分析研究食品所经历的环境历程与食品整体品质变化的关系,如潘治利等^[5]基于有效积温理论建立了速冻水饺所经历的时间温度历程与剩余货架期的关系模型。此类方法的优点在于直接建模,系统误差较少。缺点在于所构建的模型适用范围通常比较有限。第2种是选择有代表性的、关键的食品品质指标,基于化学或微生物学的相关原理研究其变化规律,进而研究食品品质的整体变化规律,实现剩余货架期预测。这种指标一般又可以分为2类:①指标本身是消费者判断

本文以食品货架期建模预测理论为出发点,阐述货架期预测的研究方法和研究进展,对不同类型的预测模型及其应用进行对比分析,最后展望食品货架期预测的未来重点研究方向,以期为准确了解食品货架期动态信息,优化食品质量安全控制提供理论基础。

1 食品货架期预测建模理论

食品从生产到最终消费的过程中,在化学反应和微生物的共同作用下,品质会逐渐发生变化,产生腐败、变质,以及不良气味等现象,直至货架期终点。整个过程会受到温度、水分、气体环境等因素的影响。因此,食品品质变化通常是化学反应与微生物作用的结果,可以通过检测食品初始品质指标,集成所监测的环境历程,实现食品剩余货架期的预测,如图1所示。

食品品质与货架期终点的关键参考因素,如颜色、气味等感官指标^[6-7]。②与包括感官评价在内的其他品质指标具有同步变化规律的代表性指标,如维生素C、菌落总数等^[6,8-9],该方法的理论依据是:食品腐败过程中发生的众多化学反应对环境条件的反映在一定范围内是相似的,比如一定范围内的温度升高,可以提高酶促反应速率,相对湿度可以通过影响底物传来影响酶促反应速率等。

从建模的角度看,基于不同的原理,主要有5种方法,如表1所示。

表2对适用于不同类别食品货架期预测在相关研究中应用并取得良好效果的品质指标进行了整理和对比。

表1 食品货架期预测主要模型

Tab.1 Main prediction models for food shelf life

原理	模型	适用指标	特点
化学动力学	一级反应模型、二级反应模型	理化指标、菌落总数	形式简单,适用性比较强;通常与 Arrhenius 方程结合使用,且只考虑温度的影响
微生物生长动力学	一级模型、二级模型、三级模型	菌落总数、特定腐败菌	更接近食品品质变化的本质,除温度外,还考虑了 pH 值、水分活度等因素
人工智能	BP 神经网络	多指标综合分析	不依赖于明确的品质变化模型,从而在一定程度上减少系统误差;具有自学习能力
统计学	威布尔危险值分析(WHA)	感官评价	易受评价主观性的影响
基于温度	Q_{10} 模型	理化指标、菌落总数	通常只适用于较小的温度范围

表2 食品货架期预测相关研究指标选择对比

Tab.2 Comparison of indexes used in different kinds of foods' shelf life prediction

类别	研究对象	指标选择	文献来源
肉类	冷却猪肉	菌落总数、TVB-N(挥发性盐基总氮)、TBARS(硫代巴比妥酸反应产物)、pH 值、色值、主成分因子	[9-11]
	香肠	气味、颜色	[12]
	冷鲜猪肉馅	热杀索丝菌	[13]
水产品	大黄鱼	不同温度下的特定腐败菌;产 H_2S 菌数	[14-15]
	带鱼	细菌总数、TVB-N、鲜度指标 K 值	[7]、[16]
	罗非鱼	特定腐败菌-假单胞菌	[17]
果蔬	草莓	维生素 C、颜色	[6]
	葡萄	硬度	[18]
	上海青蔬菜	维生素 C、叶绿素、颜色参数、黄度、色差	[19]
	鲜切西兰花	维生素 C	[20]
	鲜枣	霉菌菌落总数	[21]
	番茄	硬度	[22]
其他类食品	番茄汁	维生素 C、细菌总数	[23]
	速冻水饺	酸价、过氧化值、饺皮含水率、亨特白度	[5]
	枣	维生素 C	[8]
	牛奶	类芽孢杆菌数、细菌总数、酸度	[24-26]
	鸡蛋	质量、蛋黄系数、气室高度	[27]
	米糠油	过氧化值(POV)	[28]

2 食品货架期预测建模方法与应用

近年来,食品货架期预测相关研究发展迅速,肉类、水产品、果蔬等食品类别均有涉及,研究方法相对多样,考虑到的环境因素正逐步由单一的温度因素发展到多因素综合分析。基于已有研究成果,表3整理和对比了适用于不同类别食品的静态模型(确定环境条件下的品质变化模型)构建方法,及相应研究中对环境因素的分析方法。

2.1 基于化学动力学的食品货架期预测方法

基于化学动力学预测方法的出发点是:食品品质指标的变化大多是由化学反应引起的,其变化速率会受到环境因素的影响,比如温度、湿度、气体环境等^[7,12,22]。

该建模方法最早可以溯源到1978年 Labuza 等^[33]所提出的“食品品质变化规律通常符合零级或

一级反应”。基于该理论,品质指标的变化可以描述为

$$-\frac{dQ}{dt} = kQ^n \quad (1)$$

式中 Q —— t 时刻品质指标值

k ——变化速率常数

n ——反应级数

当 $n=0$ 或 1 时,分别获得零级、一级反应动力学模型:

零级反应

$$Q = Q_0 - kt \quad (2)$$

一级反应

$$Q = Q_0 e^{-kt} \quad (3)$$

式中 Q_0 ——品质指标初始值

温度对品质指标变化的影响一般用 Arrhenius 方程来描述,一般形式为

表3 食品货架期预测的方法应用对比

Tab.3 Application comparison of food shelf life prediction models

类别	研究对象	原理	基本模型	环境因素	环境因素研究方法	文献来源
肉类	香肠	化学动力学、统计学	一级反应模型、WHA模型	气体	设定不同CO ₂ 浓度进行存储试验	[12]
	猪肉	微生物生长动力学	修正的Gompertz模型	温度:0、4、7、10、14、20℃	平方根模型	[10]
		基于温度	Q ₁₀ 模型	温度:0、5、10、15、20℃	Q ₁₀ 模型	[11]
	冷鲜猪肉馅	微生物生长动力学	Gompertz模型	温度:0、5、10、15、20℃	平方根模型	[13]
水产品	罗非鱼	微生物生长动力学	Gompertz模型	温度:0~15℃	平方根模型	[29]
	带鱼	微生物生长动力学	Baranyi模型	温度:0、5、10、20℃	平方根模型	[30]
果蔬	鲜枣	化学动力学	零级反应模型	温度,常温		[21]
		化学动力学	一级反应模型	恒定温度,恒定湿度		[22]
	番茄	化学动力学	一级反应模型	温度:10、15、20、28℃	Arrhenius方程	[31]
	上海青蔬菜	化学动力学	零级反应模型	温度	Arrhenius方程	[19]
	鲜切西兰花	化学动力学	一级反应模型	温度	Arrhenius方程	[20]
	番茄汁	化学动力学	一级反应模型	温度	Arrhenius方程	[23]
	玉米	微生物生长动力学	Baranyi模型	温度:20、25、30、35℃ 水分活度:0.97、0.91、0.85、0.81	修正的Arrhenius方程	[32]
	米糠油	化学动力学	一级反应模型	温度	Arrhenius方程	[28]
其他类食品	鸡蛋	化学动力学	一级反应模型	温度	Arrhenius方程	[27]
	速冻水饺	数据分析	BP神经网络	温度:-28~-12℃		[5]
	灭菌乳	统计学	WHA模型	温度:25、30、35、40℃		[26]

$$k = A \exp(-E_a / (RT)) \quad (4)$$

式中 A ——指前因子或称为阿伦尼乌斯常数

E_a ——反应活化能,温度变化不大时,可以视为常数,kJ/mol

R ——气体常数,kJ/(mol·K)

T ——绝对温度,K

结合式(1)、式(4)可得波动温度下的食品品质指标变化动力学模型

$$F(Q) = \int_{Q_0}^Q -Q^{-n} dQ = \int_0^t A \exp(-E_a / (RT(t))) dt \quad (5)$$

$F(Q)$ 为品质指标 Q 的函数,右边为时间 t 的函数,结合货架期终点所选指标的检测值,可以实现食品货架期预测。

在实际应用过程中,基于化学动力学的货架期预测建模过程是:第1步,设定温度梯度,进行食品恒温存储试验,定期检测相关指标,选择零级或一级反应描述其变化规律。第2步,如果拟合效果良好,可以通过对试验数据的回归分析确定对数化Arrhenius方程中参数的值。从而获得变温条件下品质变化模型。结合货架期终点品质指标的值,实现对食品剩余货架期的预测。

2.2 基于微生物生长动力学的方法

该方法认为食品变质变化主要是由微生物生命活动引起的,因此,可以通过构建合适的模型来描述其生长规律,通过预测食品经历不同环境后微生物

的生长状况,实现对剩余货架期的预测^[2,3,10]。

Whiting等^[34]提出了将微生物生长动力学模型分为一级模型、二级模型和三级模型。其中,一级模型通常用于描述一定生长条件下微生物数量变化与时间的关系;二级模型描述环境因子(温度、pH值、水分活度等)的变化对一级模型中参数的影响;三级模型主要指建立在一级和二级模型基础上的应用程序软件。表4对比分析了主要的微生物生长动力学模型。

总的来说,基于微生物生长动力学的预测模型构建思路是:构建恒温条件下静态货架期预测模型(一级模型);获取动态环境历程,探讨微生物最大变化率与温度等影响因素的关系(二级模型);结合二级模型和静态货架期预测模型形成动态条件下货架期预测模型。

2.3 基于温度的方法

货架期预测中所采用的基于温度的方法,主要是 Q_{10} 模型和 Z 值模型(表4)。 Q_{10} 是指温度增加10℃,物理或化学系统的改变率,应用于食品货架期预测或食品品质变化动力学中, Q_{10} 模型可表示为

$$F_{k(T)} = F_{k(T_0)} Q_{10}^{(T_0 - T)/10} \quad (6)$$

其中 $F_{k(T)}$ 为 T 温度下食品的货架期, $F_{k(T_0)}$ 表示 T_0 温度下食品的剩余货架期。对不同温度下的试验数据进行回归分析可得 $F_{k(T_0)}$ 和 Q_{10} ,从而得到一定温度范围内的货架期预测模型。罐头类食品感官品质

表4 主要微生物生长动力学模型

Tab.4 Main models of microbial growth kinetics

模型	基本公式/网址(三级模型)	特点
一级模型	Monod 模型 ^[35] $y = a \exp(b(t - c))$ 修正的 Gompertz 模型 ^[36] $y = A_1 \exp(-\exp(\mu_{\max} e(\lambda - t)/A_1 + 1))$ 修正的 Logistic 模型 ^[36] $y = A_1 / [1 + \exp(4\mu_{\max}(\lambda - t)/A_1 + 2)]$ Baranyi 模型 ^[37] $dN/dt = \mu_{\max} \alpha(t) u(N) N$ $\alpha(t) = q_0 / (q_0 + \exp(-\nu t))$ ROSSO 模型	最早提出的微生物生长动力学模型之一,应用比较广泛 体现了良好的拟合效果,并且易于使用 形式简单,在一些三级模型中仍有应用 适用于变温的情况,当前在一级模型中应用最为广泛 应用于三级模型中微生物生长规律的描述
二级模型	(修正的)平方根模型 ^[38-43] $\sqrt{k} = a(T - T_0)$ $\sqrt{k} = a(T - T_{\min}) [1 - \exp(b(T - T_{\max}))]$ $k = [a(T - T_{\min})]^2 [1 - \exp(b(T - T_{\max}))]$ $\sqrt{k} = a \sqrt{(A_w - A_{w_{\min}})(T - T_{\min})}$ $\sqrt{k} = a \sqrt{V_{\text{pH}} - V_{\text{pH}_{\min}}}(T - T_{\min})$ $\sqrt{k} = a \sqrt{(A_w - A_{w_{\min}})(V_{\text{pH}} - V_{\text{pH}_{\min}})}(T - T_{\min})$ $\mu = a(A_w - A_{w_{\min}})(V_{\text{pH}} - V_{\text{pH}_{\min}})(V_{\text{pH}} - V_{\text{pH}_{\max}})(T - T_{\min})^2$	使用最为广泛的二级模型 有多种修正形式,可以综合分析温度、水分活度、pH 值等因素对食品中微生物生长的影响
三级模型	Arrhenius 模型 $\ln k = -\frac{E_{\alpha}}{RT} + \ln A$ Z 值模型 $D = t / \lg(N_0/N)$ $Z = (T - T_r) / (\lg D_r - \lg D)$ 响应面模型 基于多元回归方法 Sym' Previous http://www.symprevious.org/ ComBase http://www.combase.cc/index.php/en/ SSSP Pathogen Modeling Program http://pmp.ercr.ars.usda.gov/PMPHome.aspx	用于分析温度对微生物生长的影响 适用于温度波动范围较小的情况 应用于基于杀菌效果的罐头或其他食品货架期分析中 当影响因素超过 3 个时,会变得比较复杂 由法国研究机构开发并维护,是当前比较完备的三级模型数据库之一 当前使用最广泛的三级模型 用于水产品腐败和安全预测 由美国农业部开发,可分析多种环境因素对微生物的影响

注: y 表示 t 时刻微生物浓度初始微生物浓度比值的自然对数, N_0 表示初始时刻的微生物浓度, a 、 b 、 c 表示常数, μ 表示比生长速率, μ_{\max} 表示微生物最大比生长速率, λ 表示延滞期, A_1 表示一定条件下微生物可以达到的最大浓度与初始浓度比值的对数, $\alpha(t)$ 表示微生物生长对环境的适应性函数, q_0 表示初始时刻微生物生理学状态, ν 表示限制性生长因子变化速率, $u(N)$ 表示生长抑制函数, T_{\min} 和 T_{\max} 分别表示微生物生长的最低温度和最高温度, $A_{w_{\min}}$ 表示微生物生长最低水分活度, V_{pH} 表示 pH 值, D 表示一定温度下杀死 90% 微生物所需要的时间, Z 表示 D 值减小 90% 所需要提高的温度。

指标的 Q_{10} 值在 1.5 ~ 2 之间, 酸败变质的 Q_{10} 值在 1.5 ~ 3 之间, 褐变反应的 Q_{10} 值在 4 ~ 10 之间, 对于冷冻水果和蔬菜的质量损失 Q_{10} 值在 20 ~ 40 之间^[44]。

Q_{10} 模型用于食品货架期预测时, 通常与 Arrhenius 方程一起使用, 结合式(4)、式(6), 可得

$$Q_{10} = \frac{F_{k(T)}}{F_{k(T+10)}} = \exp \frac{10E_{\alpha}}{RT(T+10)} \quad (7)$$

用式(4)对不同温度下的试验数据进行回归分析可确定一定温度范围内的 E_{α} 值, 代入式(6)可得 Q_{10} 。将 E_{α} 和 Q_{10} 代入式(7)可得恒温下的食品货架期预测模型, 用温度时间函数 $T(t)$ 代替 T , 通过积分变形可以得到波动温度下的货架期预测模型。

顾海宁等^[11] 基于 Q_{10} 模型构建了冷却猪肉在 0 ~ 10℃、5 ~ 15℃、10 ~ 20℃ 3 个温度段的冷却猪肉货架期预测模型, 在验证试验中, 相对误差均在

±10% 范围内。佟懿等^[7] 运用 Q_{10} 模型结合 Arrhenius 方程, 基于挥发性盐基氮构建了 273 ~ 283 K 温度范围内带鱼的货架期预测模型, 在 277 K 和 280 K 温度条件下的验证试验中, 相对误差分别为 17.440 0% 和 0.244 4%。

Q_{10} 模型为经验模型, 应用范围比较有限, 结合 Arrhenius 方程使用时, 反应活化能通常被视为常数, 因此一般只能在比较小的温度范围内取得比较理想的预测效果。

2.4 BP 神经网络方法

BP 神经网络 (Back propagation neural network) 是一种人工智能建模方法, 由 Rumelhart 等于 1986 年提出, 近年来在食品货架期预测领域的应用相对比较广泛。比如, 潘治利等^[5] 应用 BP 神经网络研究了波动温度下速冻水饺有效积温与剩余货架期的关系, 验证试验表明, 预测效果优于传统动力学的方法。

基于BP神经网络的食物货架期预测优势在于:不需要事先确定品质指标变化规律,可以减少系统误差;并且BP神经网络的自学习功能可以在应用中不断提高预测模型的准确性,结合信息技术可能会在实际应用中取得更好的发展。但是同时,BP神经网络的应用也有一定的局限性:一方面BP神经网络的应用通常需要对评价数据进行训练,训练时间可能比较长;另一方面,关于隐含层的层数和节点数当前并没有可靠的理论指导,一般基于经验和试验数据分析来确定。

2.5 威布尔危险值分析法

威布尔分布是一种连续性概率分布。Gacula等^[45]将其应用于食品货架期失效,提出了威布尔危险值分析方法。假设 $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示观察到的按时间倒序排列的一系列失效样本,则危险函数为

$$h(t) = 100/n \quad (8)$$

累积危险函数可以表示为

$$H(t) = \sum_{i=1}^n h(t_i) \quad (9)$$

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^\beta \quad (10)$$

两边取对数可变形为

$$\lg t = (1/\beta) \lg H + \lg \alpha_1 \quad (11)$$

其中 H 表示危害积累率, α_1 表示尺度参数, β 表示形状参数。使用WHA模型预测食品货架期需要满足2个前提条件,即形状参数与温度不具有相关性,预测货架期与温度的关系符合Arrhenius方程中反应速率常数与温度的关系。一般认为 $H = 69.3\%$ 时,食品到达货架期终点。通过恒温存储试验获得的数据拟合式(11)可得到参数 α_1, β ,从而获得相应温度下的食品货架期。

基于WHA模型的食物货架期研究通常以感官评价为基础,评价人员的主观性在一定程度上限制了其应用。曹平等^[26]以酸度为指标,研究了灭菌乳基于WHA模型的货架期预测方法,预测结果与

ASLT方法基本一致。

3 结论与展望

货架期预测研究对食品行业的发展具有重要意义。随着研究的广泛深入,食品货架期预测正在向着准确性与实用性的方向发展,当前食品货架期预测研究的发展趋势主要包括以下4方面:

(1) 研究机理更接近食品品质变化的本质。研究方法从简单的数据相关性分析发展到基于食品品质变化本质机理的研究。基于微生物生长规律的研究,包括一定环境条件下特定腐败菌的研究,正更多地应用于不同类别的食品^[10,30,46]。研究中对环境因素的分析从基本的温度因素发展到综合考虑温度、湿度、pH值等多种环境因素的方法。研究方法的发展对提高食品货架期预测的准确性与适用性具有重要意义。同时,当前基于食品品质变化关键代谢过程的研究还相对较少。

(2) 研究对象与所处环境更加丰富与细化。研究对象正覆盖更多的食品种类,同时开始从特定实验室条件下的食品发展到实际仓储和物流条件下的食品^[46]。

(3) 研究应用更加广泛。基于动态品质变化模型的发展,货架期预测在食品流通和仓储领域的研究应用正更加广泛。在流通领域,已发展到对整个物流链的监控分析^[47];剩余货架期的标示方面,已经从固定标识发展到基于食品所经历实际环境历程的动态标识^[2-4,48];在仓储管理方面,从传统的“先进先出(FIFO)”,发展到基于食品剩余货架期动态预测的“先腐败先出货(LSFO)”的新型库存管理方式。

(4) 食品品质变化动态监测与快速检测的有效集成与相互验证与成为新的研究热点。基于食品所经历环境历程的动态品质变化模型正更加完善,结合无线传感技术实现食品品质即时感知和动态监测;结合无损检测技术实现食品剩余货架期的快速检测,正成为新的研究热点与趋势^[49-52]。

参 考 文 献

- David Kilcast, Persis Subramaniam. The stability and shelf-life of food[M]. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2000.
- Theofania Tsironi, Anastasios Stamatou, Marianna Giannoglou, et al. Predictive modelling and selection of time temperature integrators for monitoring the shelf life of modified atmosphere packed gilthead seabream fillets[J]. LWT—Food Science and Technology, 2011, 44(4): 1156–1163.
- Maidier Nuin, Begoña Alfaro, Ziortza Cruz, et al. Modelling spoilage of fresh turbot and evaluation of a time temperature integrator (TTI) label under fluctuating temperature[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 127(3): 193–199.
- Ellouze M, Augustin J C. Applicability of biological time temperature integrators as quality and safety indicators for meat products[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 138(1–2): 119–129.
- 潘治利, 黄忠民, 王娜, 等. BP神经网络结合有效积温预测速冻水饺变温冷藏货架期[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 276–281.

- Pan Zhili, Huang Zhongmin, Wang Na, et al. Prediction of shelf life for quick-frozen dumpling based on BP neural network and effective accumulated temperature theory[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(22):276-281. (in Chinese)
- 6 Dermesonlouoglou E D, Giannakourou M C, Taoukis P S. Shelf-life prediction and management of frozen strawberries with time temperature integrators (TTI) [C]//Riaz M N, Pionnier E, Mallia S, et al. Food flavor and chemistry: explorations into the 21st century. London: RSC, 2005:459-471.
- 7 佟懿,谢晶,肖红,等. 基于电子鼻的带鱼货架期预测模型[J]. 农业工程学报,2010,26(2):356-360.
Tong Yi, Xie Jing, Xiao Hong, et al. Prediction model of shelf life of *Trichiurus haumela* using an electric nose[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(2):356-360. (in Chinese)
- 8 Hu Y H, Liu C, Hao Q, et al. Building kinetic models for determining vitamin C content in fresh jujube and predicting its shelf life based on near-infrared spectroscopy[J]. Sensors, 2013,13(11):15673-15681.
- 9 Tang Xiaoyang, Sun Xiaohong, Wu Vivian C H, et al. Predicting shelf-life of chilled pork sold in China[J]. Food Control, 2013, 32(1):334-340.
- 10 李苗云,孙灵霞,周光宏,等. 冷却猪肉不同贮藏温度的货架期预测模型[J]. 农业工程学报,2008,24(4):235-238.
Li Miaoyun, Sun Lingxia, Zhou Guanghong, et al. Prediction model for the shelf-life of chilled pork stored at different temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(4):235-238. (in Chinese)
- 11 顾海宁,李强,李文钊,等. 冷却猪肉贮存中的品质变化及货架期预测[J]. 现代食品科技,2013,29(11):2621-2626.
- 12 Torrieri E, Russo F, Di Monaco, et al. Shelf life prediction of fresh Italian pork sausage modified atmosphere packed[J]. Food Science and Technology International, 2011,17(3):223-232.
- 13 刘超群,候温甫,王宏勋. 冷却猪肉馅中热杀索丝菌生长预测模型的建立与验证[J]. 现代食品科技,2013,29(3):483-486.
- 14 李学英,许钟,杨宪时,等. 大黄鱼产 H₂S 菌生长动力学模型和货架期预测[J]. 现代食品科技,2010,26(9):921-925.
Li Xueying, Xu Zhong, Yang Xianshi, et al. Microbial growth kinetics model of H₂S-producing bacteria and shelf life prediction for *Pseudosciaena crocea*[J]. Modern Food Science and Technology, 2010,26(9):921-925. (in Chinese)
- 15 郭全友,王锡昌,杨宪时,等. 不同贮藏温度下养殖大黄鱼货架期预测模型的构建[J]. 农业工程学报,2012,28(10):267-273.
Guo Quanyou, Wang Xichang, Yang Xianshi, et al. Predictive model construction of shelf life for cultured *Pseudosciaena crocea* stored at different temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(10):267-273. (in Chinese)
- 16 佟懿,谢晶. 鲜带鱼不同贮藏温度的货架期预测模型[J]. 农业工程学报,2009,25(6):301-305.
Tong Yi, Xie Jing. Prediction model for the shelf-life of *Trichiurus haumela* stored at different temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(6):301-305. (in Chinese)
- 17 杨宪时,许钟,郭全友. 养殖鱼类货架期预测系统的设计与评估[J]. 农业工程学报,2006,22(8):129-134.
Yang Xianshi, Xu Zhong, Guo Quanyou. Development and assessment of a shelf life prediction system for cultured fish[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(8):129-134. (in Chinese)
- 18 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 Yunfei. Mathematical model of mass and firmness loss of grapes during storage and shelf life periods [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(8):93-97. (in Chinese)
- 19 谢晶,张利平,苏辉,等. 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 Liping, Su Hui, et al. Quality kinetic model and shelf life prediction of green vegetable (*Brassica rapa* var. *chinensis*) [J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(15):271-278. (in Chinese)
- 20 范新光,张长峰,肖璐,等. 减压处理鲜切西兰花的货架期预测模型构建[J]. 现代食品科技,2013,29(9):2120-2124.
- 21 刘聪,郭康权,张强,等. 基于近红外光谱的室温贮藏下鲜枣霉菌污染动力学模型[J]. 农业工程学报,2013,29(1):278-284.
Liu Cong, Guo Kangquan, Zhang Qiang, et al. Kinetic model of mold contamination in fresh jujube stored at room temperature based on near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 278-284. (in Chinese)
- 22 王昕,李建桥,任露露,等. 番茄果实采收后的硬度测定及其变化规律[J]. 农业机械学报,2005,36(6):64-67.
Wang Xin, Li Jianqiao, Ren Luquan, et al. Mensuration and changes on firmness of tomato fruits during the post-harvest storage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(6):64-67. (in Chinese)
- 23 李卓思,程裕东,刘世雄. 微波和巴氏杀菌后番茄汁品质动力学[J]. 农业工程学报,2010, 26(7): 335-340.
Li Zhuosi, Cheng Yudong, Liu Shixiong. Quality kinetics of microwave and pasteurised processed tomato juice[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(7):335-340. (in Chinese)
- 24 Ranieri M L, Ivy R A, Mitchell R, et al. Real-time PCR detection of *Paenibacillus* spp. in raw milk to predict shelf life performance of pasteurized fluid milk products[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012,78(16):5855-5863.
- 25 谷雪莲,杜巍,华泽钊,等. 预测牛乳货架期的时间-温度指示器的研制[J]. 农业工程学报,2005,21(10):142-146.
Gu Xuelian, Du Wei, Hua Zezhao, et al. Development of time-temperature indicator to predict shelf life of milk[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(10):142-146. (in Chinese)
- 26 曹平,于燕波,李培荣. 应用 Weibull Hazard Analysis 方法预测食品货架寿命[J]. 食品科学,2007,28(8):487-491.
- 27 于滨,王喜波. 鸡蛋贮藏过程中品质变化的动力学模型[J]. 农业工程学报,2012,28(15):276-280.
Yu Bin, Wang Xibo. Kinetics of quality change for eggs during storage[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15): 276-280. (in Chinese)

- 28 林丹,吴雪辉,杨公明,等.米糠油氧化稳定性研究及货架期预测[J].现代食品科技,2012,28(10):1323-1326.
- 29 许钟,杨宪时,郭全友,等.波动温度下罗非鱼特定腐败菌生长动力学模型和货架期预测[J].微生物学报,2005,45(5):798-801.
- Xu Zhong, Yang Xianshi, Guo Quanyou, et al. Microbial growth kinetics model of specific spoilage organisms and shelf life prediction for tilapia at fluctuating temperatures[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2005, 45(5): 798-801. (in Chinese)
- 30 邢少华.水产品冷链物流安全评价方法研究[D].北京:中国农业大学,2013.
- 31 汪琳,应铁进.番茄果实采后贮藏过程中的颜色动力学模型及其应用[J].农业工程学报,2001,17(3):118-121.
- Wang Lin, Ying Tiejun. Kinetic model on surface color in tomato fruit during the post-harvest storage and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(3): 118-121. (in Chinese)
- 32 岳晓禹,李自刚,郝修振,等.主要生态因子对贮藏玉米中黄曲霉生长影响的模拟[J].农业工程学报,2013,29(18):269-276.
- Yue Xiaoyu, Li Zigang, Hao Xiuzhen, et al. Simulation of effect of main ecological factors on radial growth of *Aspergillus flavus* during storage period of corn[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 269-276. (in Chinese)
- 33 Theodore P Labuza, Mirian Shapero, James Kamman. Prediction of nutrient losses [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1978, 2(2): 91-99.
- 34 Whiting R C, Buchanan R L. A classification of models for predictive microbiology[J]. Food Microbiology, 1993, 10(2): 175-177.
- 35 闫军,遇晓杰,汤岩,等.金黄色葡萄球菌在生乳中生长预测模型的建立[J].中国食品卫生杂志,2010,22(6):502-505.
- 36 Zweitering M H, Jongenburger I, Rombouts F M, et al. Modeling of the bacterial growth curve[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56(6): 1875-1881.
- 37 Baranyi J, Roberts Terry A. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food [J]. International Journal of Food Microbiology, 1994, 23(3-4): 277-294.
- 38 Ratkowsky D A, Olley June, Mcmeekin T A, et al. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures[J]. Journal of Bacteriology, 1982, 149(1): 1-5.
- 39 Ratkowsky D A, Lowry R K, Mcmeekin T A, et al. Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range[J]. Journal of Bacteriology, 1983, 154(3): 1222-1226.
- 40 Zweitering M H, de Koos J T, Hasenack B E, et al. Modeling of bacterial growth as a function of temperature[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, 57(4): 1094-1101.
- 41 Mcmeekin T A, Chandler R E, Doe P E, et al. Model for combined effect of temperature and salt concentration/water activity on the growth rate of *Staphylococcus xylosum*[J]. Journal of Applied Bacteriology, 1987, 62(6): 543-550.
- 42 Adarns M R, Little C L, Easter M C. Modelling the effect of pH, acidulant and temperature on the growth rate of *Yersinia enterocolitica*[J]. Journal of Applied Bacteriology, 1991, 71(1): 65-71.
- 43 Wijtzes T, Rombouts F M, Kant-Muermans M L T, et al. Development and validation of a combined temperature, water activity, pH model for bacterial growth rate of *Lactobacillus curvatus*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2001, 63(1-2): 57-64.
- 44 Labuza T P. Application of chemical kinetics to deterioration of foods[J]. Journal of Chemical Education, 1984, 61(4): 348-358.
- 45 Mc Gacala J R, Kubala J J. Statistical models for shelf life failures[J]. Journal of Food Science, 1975, 40(2): 404-409.
- 46 Theofania Tsironi, Eleni Gogou, Eirini Velliou, et al. Application and validation of the TTI based chill chain management system SMAS(safety monitoring and assurance system) on shelf life optimization of vacuum packed chilled tuna[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 128(1): 108-115.
- 47 傅泽田,邢少华,张小栓.食品质量安全可追溯关键技术发展研究[J].农业机械学报,2013,44(7):144-153.
- Fu Zetian, Xing Shaohua, Zhang Xiaoshuan. Development trend of food quality safety traceability technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 144-153. (in Chinese)
- 48 Sun Yan, Cai Huawei, Zheng Limin, et al. Development and characterization of a new amylase type time-temperature indicator [J]. Food Control, 2008, 19(3): 315-319.
- 49 Stijn Saevels, Jeroen Lammertyn, Amalia Z Berna, et al. An electronic nose and a mass spectrometry-based electronic nose for assessing apple quality during shelf life[J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 31(1): 9-19.
- 50 刘明,潘磊庆,屠康,等.电子鼻检测鸡蛋货架期新鲜度变化[J].农业工程学报,2010,26(4):317-321.
- Liu Ming, Pan Leiqing, Tu Kang, et al. Determination of egg freshness during shelf life with electronic nose[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 317-321. (in Chinese)
- 51 尹芳缘,曾小燕,徐薇薇,等.基于电子鼻的芒果储存时间预测方法研究[J].传感技术学报,2012,25(9):1199-1203.
- Yin Fangyuan, Zeng Xiaoyan, Xu Weiwei, et al. Study of mango storage time predicting method utilizing electronic nose[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(9): 1199-1203. (in Chinese)
- 52 Amalia Z Berna, Jeroen Lammertyn, Stijn Saevels, et al. Electronic nose systems to study shelf life and cultivar effect on tomato aroma profile[J]. Sensors and Actuators B, 2004, 97(2-3): 324-333.