

# 基于品质衰变理论的食品货架期预测模型及其应用研究进展

史波林, 赵 镭\*, 支瑞聪

(中国标准化研究院食品与农业标准化研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 食品货架期是厂商对产品质量的承诺, 也是消费者关心的质量要求。针对目前研究中货架期预测模型使用的随意性与不规范性, 本文剖析货架食品的品质影响因素, 明确感官、化学、物理和微生物4个货架期食品品质评价途径, 分析所对应的货架食品品质衰变机理和货架寿命终点检测方法, 归纳与总结现有货架预测常用模型和算法, 形成基于品质衰变原理的货架期预测模型建立体系, 并对该技术未来发展方向进行展望。

**关键词:** 货架期; 品质衰变; 预测模型

Advances in Predictive Shelf Life Models Based on Food Quality Deterioration Theory and Their Applications

SHI Bo-lin, ZHAO Lei\*, ZHI Rui-cong

(Food and Agriculture Standardization Institute, China National Institute of Standardization, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The shelf life of foods is not only the quality guarantee from manufacturers, but also the quality requirements from consumers. In view of arbitrary and improper use of predictive shelf life models, we herein analyze factors that influence the shelf life of foods, identify sensory, chemical, physical and microbiological properties as four aspects of food quality for shelf life prediction, explore the corresponding quality deterioration mechanisms and detection methods for the end of shelf life, summarize common predictive shelf life models and algorithms and develop new predictive shelf life models based on food quality deterioration theory. Meanwhile, further directions for research on shelf life prediction of foods are discussed.

**Key words:** shelf life; quality deterioration; predictive model

中图分类号: TS207.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)21-0345-06

食品品质经生产后, 随时间推移从最佳食用阶段到可接受食用但非最佳食用阶段, 最终达到不可接受食用后抛弃的阶段。目前有关货架期的概念经常与保质期含义混淆<sup>[1-5]</sup>。食品货架期是指食品的最佳食用期, 而食品保质期是食品在物理、化学、微生物或感官特性上保持被接受食用的时间周期。也就是说货架期以最佳食用与可接受食用为时间分界点, 而保质期以可接受食用与不可接受食用为时间分界点。严格地讲, 货架期侧重商业销售, 保质期则侧重食用安全。

消费者在决定购买一件食品的时候, 必先了解它的质量是否可靠, 仔细查看打印在包装物上的生产日期, 因为货架期不但影响消费者的感官享受, 同时关乎消费者的健康与安全<sup>[6]</sup>。因此它关系着食品生产厂商的信誉、品牌与经济效益。适宜长的货架期对产品的贮存、分销和消费具有重要作用。准确地预测和计算产品在具体条件下的货架期, 能够为产品的贮存、分销策略制定提供

有效依据, 为通过改进产品配方和加工技术来探索进一步延长货架期的可能性提供参考, 也是厂商对流通期内食品质量功效的保证与承诺<sup>[7]</sup>。

截至目前, 虽然国内外开展有关食品货架期预测研究已较长<sup>[8-11]</sup>, 所采用的预测模型也较多, 但对货架期预测算法的使用经常出现混用与滥用现象, 并不明确这些算法使用的合理性与针对性, 这主要源于对货架期预测原理的不明确。实际上, 对于不同食品, 贮存分销情况各不相同, 其品质衰变的影响因素各异, 往往需要凭借食品特点, 制定相应的货架期预测方法<sup>[12]</sup>。本文基于产品在贮藏过程中的品质衰变机理, 通过分析影响产品质量变化的主要因素确定用于货架期结束的关键指标, 借助对现有货架预测常用模型和算法的分析、归纳与总结, 形成基于品质衰变原理的货架期预测方法体系。

收稿日期: 2012-04-09

基金项目: 国家质检公益性行业科研专项(201110209-2)

作者简介: 史波林(1981—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为食品感官评价与智能感官分析。E-mail: shibl@cnis.gov.cn

\*通信作者: 赵镭(1968—), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为食品感官分析标准化。E-mail: zhaolei@cnis.gov.cn

## 1 货架食品的品质衰变动力学原理

货架期实验是模拟品质衰变规律而设计的,其食品品质变化由内在品质性质因素( $C_i$ 表示,如浓度、pH值、水分活度等)与外在环境因素( $E_j$ 表示,如温度、相对湿度、包装等)决定,那么食品品质衰变可表示为: $rQ=f(C_i, E_j)^{[13]}$ 。Brody<sup>[14]</sup>、Mark等<sup>[15]</sup>和Robertson<sup>[16]</sup>将产品的质变速率用式(1)表示。

$$-\frac{dC}{dt}=f(I, E) \quad (1)$$

式中: $C$ 为质变指标; $t$ 为时间; $I$ 为内部变量; $E$ 为外部变量。

食品品质改变一般指货架过程中感官、化学、物理和微生物的变化,由此可形成基于不同品质参数的衰变动力学模型。

### 1.1 化学品质衰变动力学原理

在品质衰变动力学中,以化学反应动力学为基本理论模型。其食品质量损失可以用定量、期望的化学指标 $A$ (如营养素或特征风味)的损失或不期望的化学指标 $B$ (异味成分或褪色色素含量)的形成来表示<sup>[17]</sup>。

$$-\frac{d[A]}{dt}=k[A]^n \quad (2)$$

$$-\frac{d[B]}{dt}=k'[B]^{n'} \quad (3)$$

式中: $k$ 和 $k'$ 为品质变化速率常数; $n$ 和 $n'$ 为反应级数; $d[A]/dt$ 和 $d[B]/dt$ 为品质变化速率。

$A$ 或 $B$ 可转换成线性函数 $F(A)=kt$ ,即为食品的化学品质函数。由此可知,对一定的变质程度,品质变化速率常数反比于达到一定品质损失程度的时间,这个规律可以一直持续到品质变化到不可接受的时间 $t_s$ ,即货架寿命<sup>[18]</sup>。

食品不同品质衰变特征由不同级数的食品品质函数来描述。实验中,品质函数级数的确定,是根据少数的几个测定值和线性拟合的方法而求得。若满足 $A$ 或 $B$ 与时间 $t$ 的线性拟合,则为零级模式;若满足 $A$ 或 $B$ 半对数与 $t$ 的线性拟合,则为一级模式;若满足 $1/A$ 或 $1/B$ 与 $t$ 的线性拟合,则为二级模式<sup>[19]</sup>。根据拟合方程,可以推算货架终点产品品质,也可计算出达到某一品质所需要的贮藏时间,反之亦然。

### 1.2 微生物生长动力学原理

经过国内外学者对食品腐败变质与其微生物生长的关系研究,证明食品腐烂变质主要是微生物活动导致。同时一定条件下的贮藏中,其污染的微生物只有部分种群参与腐败过程,这就是该食品在这种贮藏过程的特定腐败菌(specific spoilage organisms, SSO)。SSO在刚加工食品微生物菌丛中的数量较少;但在贮藏中生长比其他微生物快,并且腐败活性强<sup>[20]</sup>。

由于SSO的对数值与产品的鲜度和剩余货架期之间存在密切关系,这就是微生物生长动力学的基础,也是预测产品剩余货架期的依据<sup>[21]</sup>。微生物生长动力学是表征微生物数量与时间的关系,即微生物生长曲线,也是微生物预报模型中的初级模型或一级模型。近年来,研究者提出不少描述微生物动力学对SSO生长速率的模型,包括Logistic方程、Gompertz方程、Richards方程、Stannard方程、Schnute方程等<sup>[22-23]</sup>。其中Gompertz方程最能有效描述微生物生长,且使用方便,在有关SSO和腐败细菌生长动力学研究、食品剩余货架期研究的文献中被广泛使用。

修正后的Gompertz方程表示为式(4)<sup>[24-25]</sup>。

$$N_t = N_0 + (N_{\max} - N_0) \times \exp\{-\exp[2.718\mu_{\max}/(N_{\max} - N_0) \times (\lambda - t) + 1]\} \quad (4)$$

式中: $N_t$ 为 $t$ 时的微生物数量( $\lg(\text{CFU/g})$ ); $N_0$ 为 $t=0$ 时的初始微生物数量( $\lg(\text{CFU/g})$ ); $N_{\max}$ 为增加到稳定期时最大的微生物数量( $\lg(\text{CFU/g})$ ); $\mu_{\max}$ 为微生物生长的最大比生长速率/ $\text{h}^{-1}$ ;  $\lambda$ 为微生物生长的延滞时间/ $\text{h}$ ;  $t$ 为货架时间/ $\text{h}$ 。

在某一温度条件下,建立不同时间 $t$ 与对应微生物数量 $N_t$ 的拟合方程,从而确定Gompertz方程中的各个常数,由此确定特定温度条件下的微生物生长动力学模型。

### 1.3 基于食品失效的威布尔危害(Weibull hazard)分析原理

对于很多食品,感官评价是确定货架寿命的关键因素。Gacula<sup>[26-27]</sup>、Hough<sup>[28]</sup>等在理论上验证了食品感官失效时间的分布服从两参数威布尔模型(Weibull model),从而提出威布尔危险值危害分析(Weibull hazard analysis, WHA)食品货架期方法。其核心是针对产品贮藏一段时间后被消费者拒绝的概率高低情况,通过危害统计处理与分析,确定预测货架寿命(sensory shelf-life,也称为感官货架寿命)。产品被消费者拒绝所体现的累计危害率与贮藏时间的关系式为式(5)。

$$\lg t = \frac{1}{\beta} \lg H + \lg \alpha \quad (5)$$

式中: $t$ 为发现新变质食品的时间/ $\text{d}$ ;  $H$ 为累计危险率/%;  $\alpha$ 与 $\beta$ 是威布尔分布参数,前者为尺度参数,后者为形状参数。尺度参数影响概率密度函数p.d.f (probability density function for specified distribution)图形的散布程度,而形状参数影响图形的陡峭程度。

通常应用WHA方法预测食品货架寿命时,对于 $\beta > 1$ 的Weibull模型是可以接受的;当 $2 < \beta < 4$ 时,模型回归直线更符合食品实际的失效情况,可以比较准确推算适宜的预期货架寿命。危害分析方法以食品被评价小组或消费者拒绝(unacceptable)的时间作为货架终点,其判别依据为感官失效率(probability of sensory failure, PSF)达到50%,也就是累计危害率为69.3%。因此在感官危害分析中,当PSF=50%或 $H=69.3\%$ 时,通过上述直线回归方程计算的时间作为货架寿命的预测值。

## 2 货架品质影响因素及货架寿命终点检测方法

### 2.1 货架品质影响因素

许多因素可以影响食品的货架期,其核心因素可归纳为:物理因素(如水分丢失)、化学因素(腐败、变臭)、微生物侵染(微生物生长)。

物理因素方面,水分迁移是影响较大的因素,常常因水分移失改变品质而被察觉<sup>[29]</sup>。如干面包片、饼干失去脆性,沙拉食品由于水分迁移发生品质改变,冷冻食品在贮藏中发生干耗。其次是外界物质通过包装层或包装材料化学物质直接迁移到食品表面而引起食品的污染。食品内部化学反应也能加剧品质变质<sup>[30]</sup>。食品贮藏中,食品内脂肪容易发生机理复杂的反应。酶活动也是通过改变食品性质而发生保质期改变。一些非酶反应可以导致食品发生褐变。食品变质过程是大量生长的微生物将食品中的蛋白质、氨基酸、肽等有机物分解成小分子,使食品产生令人厌恶的气味<sup>[31]</sup>。引起食品腐败的微生物主要是细菌类,特别是能分泌大量分解蛋白酶的腐败细菌。

### 2.2 货架寿命终点检测方法

判定食品货架寿命终点的指标应根据不同食品体系的质量损失机理、法律、标准、消费者偏爱性或市场对产品质量的要求来确定<sup>[32]</sup>。食品变质可能包括感官接受性、营养价值和食用安全性的降低等。因此,对食品货架寿命终点的评价,必须包括以上几个方面,如微生物、质构、感官、营养成分变化等,即理化、微生物和感官指标。货架寿命终点的判断对于不同产品应采用不同的指标。

易腐败或半易腐败的产品主要以感官质量为指标,往往通过消费者的接受度或描述性分析来体现。在对食品进行货架期感官评价时,需要按照产品规定的贮藏的条件或者食用方法进行。而很多货架期长的食品在感官质量变得不能接受之前就可能降低到标签标示的标准以下,主要是由于缓慢的化学反应如营养素损失使食品质量降低,这主要以理化指标为主,检测其质构变化、营养成分缺失等。对于以微生物生长为主而引起食品品质变化时,则通常采用微生物指标,同时检测特定腐败菌的变化情况。货架期内微生物的检验,不仅可以进行食品的品质及安全性评价,还可以估算微生物的数量及其种类。

## 3 基于品质衰变原理的食品货架期预测模型建立分析

由前面分析可知,食品变质都是外界环境对品质因素的影响。而相对于其他因素,温度的影响更加直接、明显和普遍,并且它不受包装因素关联<sup>[33]</sup>。产品贮藏温度越高,货架寿命就越短,这是因为温度影响品质变化速率。

针对温度变化的环境因素,品质衰变动力学的核心是体现特定温度条件下,食品品质的变化速率或货架期;也就是不同的贮藏温度对应不同的衰变速率或货架期。而货架期预测模型的目的是建立温度与货架期的关系模型,也就是通过这个模型可以针对贮藏温度预测对应的货架期,从而做出相应的品质控制与销售策略。由此可知,品质衰变动力学是贮藏时间与食品品质的关联方程;而货架期预测模型是贮藏时间、贮藏温度与食品品质的关联方程,同样也就是品质衰变动力学与贮藏温度的关联方程,即衰变速率或货架期与贮藏温度的关联方程。简单讲,货架期预测模型建立以食品品质衰变模型为基础,主要是通过建立单一温度条件下不同货架时间的品质变化关系从而确定对应的品质变化速率或对应的货架期,由此建立不同温度与其变化货架寿命的货架期预测模型。目前,此方式主要通过货架期加速实验(accelerated shelf-life testing, ASLT)<sup>[34]</sup>来实现,就是通过改变贮藏的环境条件(温度),在短时间内加速对产品品质影响至关重要的物理或化学的变质过程,从而预测其货架期与实际贮藏运销环境之间的关系。采用ASLT加速实验,要求其实验温度不能过高,否则食品在加速实验过程中的变化机理会发生改变,得到的回归直线也会与实际情况产生较大偏差。

食品品质可以根据产品特征分别以物理化学、感官和微生物为指标进行体现。不同指标在各自品质衰变动力学方法基础上,针对性地采用不同货架预测算法。基于温度的货架期预测算法主要包括:Q<sub>10</sub>模型、Z值模型、Arrhenius模型、Belehradek方程。其中Q<sub>10</sub>模型只侧重于温度对货架期的影响,而导致其预测精度比较低;Z值模型更侧重于以微生物改变为主的生化变化过程,预测精度较高。Arrhenius模型,利用活化能的概念,主要侧重于低温贮存、加热等过程中食品的化学反应速率对货架期的影响,此模型预测精度高,有时也用于以感官品质或微生物改变为指标的货架期预测。Belehradek方程模型(平方根模型)是温度影响微生物生长的最佳温度经验方程式,模型相对精确,应用广泛。

### 3.1 Arrhenius方程建模

Labuzar<sup>[35]</sup>研究得出温度对品质变化速率的影响符合Arrhenius关系式。

$$k = k_0 e^{-E_a/RT} \quad (6)$$

式中: $k$ 为质变品质变化速率常数/ $d^{-1}$ ;  $k_0$ 为速率常数(指前因子/频率因子,也叫表观速率因子),与温度无关/ $d^{-1}$ ;  $E_a$ 为活化能(品质因子A或B变坏或形成所需克服的能垒);  $R$ 为气体常数(1.9872cal/(mol·K)或8.3144J/(mol·K));  $T$ 为绝对温度/K; 其中 $k_0$ 和 $E_a$ 都是与反应系统物质本性有关的经验常数。

对式(6)取自然对数后为:

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

由品质衰变函数 $F(A)=kt$ 可知:

$$k \propto \frac{1}{t_s}$$

结合Arrhenius方程式的数学推导,可以得到式(8)。

$$\ln t_s = \frac{E_a}{2.303RT} + c \quad (8)$$

因此,  $\ln t_s$ 对 $1/T$ 作图可得到一条直线。根据此理论其货架期预测可以通过两个步骤实现:首先根据品质衰变动力学模型确定特定温度条件下的货架期,然后根据货架期预测模型建立不同温度与对应货架期的线性拟合方程。Arrhenius方程建模可以应用所有的品质衰变动力学原理中。即通过理化、微生物或感官指标独自或综合体现,由Arrhenius方程建立温度与货架期的数学关系。

不过针对微生物生长为主的食物腐败现象,可以直接结合微生物生长的修正Gompertz方程与Arrhenius方程进行预测<sup>[36-37]</sup>。

$$\ln \mu_{\max} = \ln \mu_{\text{ref}} - \frac{E_{a\mu}}{R} \times \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \quad (9)$$

$$\ln \frac{1}{\lambda} = -\ln \lambda_{\text{ref}} - \frac{E_{a\lambda}}{R} \times \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \quad (10)$$

式中:  $T$ 为热力学温度/K;  $T_{\text{ref}}$ 为基准温度,取273K;  $\mu_{\text{ref}}(\text{h}^{-1})$ 和 $\lambda_{\text{ref}}(\text{h})$ 分别为 $T_{\text{ref}}$ 时微生物生长速率与延滞时间;  $E_{a\mu}$ 和 $E_{a\lambda}$ 分别为 $\mu_{\max}$ 和 $\lambda$ 的活化能/(kJ/mol);  $R$ 是通用的气体常数。

因最大比生长速率( $\mu_{\max}$ )和延滞时间( $\lambda$ )是衡量货架期各种微生物生长差异的主要指标。某产品中,SSO达到稳定期后的最大菌数( $N_{\max}$ )和被感官拒绝时的最小腐败水平( $N_s$ )基本固定在一个范围内,当 $N_{\max}$ 和 $N_s$ 确定后,由式(9)、(10)可计算出最大生长速率( $\mu_{\max}$ )与延滞时间( $\lambda$ ),然后根据Gompertz方程计算SSO从 $N_0$ 增值到 $N_s$ 的时间预测货架期(SL),以及在任何时间 $t$ 的细菌数 $N_t$ 条件下产品的剩余货架期(MSL)。其SL方程式为式(11)。

$$\text{SL} = \lambda - [(N_{\max} - N_0)/2.718\mu_{\max}] \times \{\ln[-\ln(N_s - N_0)/(N_{\max} - N_0)] - 1\} \quad (11)$$

### 3.2 Z值模型建模

类似Arrhenius模型, Z值模型<sup>[38-39]</sup>也能体现温度与品质改变速率的关系。但它主要针对杀菌等操作对微生物的改变来评估食品品质损失,也就是货架过程中生成的微生物经过杀菌处理后所体现的效果与特征来反应货架时间。

结合食品工业的微生物死亡一级反应动力学模型,定义特定环境的某一温度条件下杀死90%微生物所需的时间 $D$ (decimal reduction time)为式(12)。

$$D = t/\lg(N_0/N_t) \quad (12)$$

式中:  $N_t$ 为 $t$ 时的活菌数;  $N_0$ 为初始活菌数;  $t$ 为时间/s。  $D$ 值越大,该菌的耐热性越强。此方程代表了特定温度条件下的微生物反应速率。

同时定义 $Z$ 值为引起 $D$ 值变化10倍所需改变的温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。

$$Z = \frac{T - T_{\text{ref}}}{\lg D_{\text{ref}} - \lg D} = \frac{T - T_{\text{ref}}}{\lg(D_{\text{ref}}/D)} \quad (13)$$

式中:  $D_{\text{ref}}$ 为参考温度( $T_{\text{ref}}$ )条件下的 $D$ 值,  $Z$ 值越大,因温度上升而获得的杀菌效果增长率就越小。此方程代表了不同温度条件下的不同反应速率,这两个公式组成了用于货架预测的 $Z$ 值模型。

### 3.3 Belehraddek方程建模

微生物二级模型是描述在生态环境条件(温度、pH值、 $a_w$ 、氛围气体、盐度等)影响下初级模型微生物生长参数的变化,即环境因子影响模型。对于不同温度对微生物生长影响的动力学模型有很多,经过大量的研究和对不同微生物生长的拟合,Belehraddek方程模型(平方根模型)相对精确,应用广泛,是温度影响微生物生长的最佳温度经验方程式或最佳微生物温度生长模型<sup>[40]</sup>。

$$\sqrt{1/\lambda} = b_{\lambda} \times (T - T_{\min\lambda}) \quad (14)$$

$$\sqrt{\mu_{\max}} = b_{\mu} \times (T - T_{\min\mu}) \quad (15)$$

式中:  $T$ 为热力学温度/K;  $T_{\min}$ 为一个假设的概念,指的是微生物没有代谢活动时的温度/K,即在此温度时最大比生长速率为零;  $b$ 为方程的常数。

具体应用跟修正Gompertz方程与Arrhenius方程推导的SL公式一样,只要确定了每个温度下的 $\mu_{\max}$ 与 $\lambda$ ,就能通过SL公式计算对应温度下的剩余货架期<sup>[41]</sup>。

## 4 国内外研究特点及未来研究

目前有关食品货架期预测研究重点主要集中于以温度为主要影响因素的化学品质衰变分析、感官品质的Weibull生存分析与微生物生长分析这三类。随着传感器技术、数学统计、化学分析、微生物分析及感官分析技术的发展,也促进了货架期预测研究的发展,主要呈现货架期品质评价的针对性与货架期预测的科学性。

### 4.1 货架期品质评价的针对性

#### 4.1.1 以预报微生物学为核心的相关研究

预报微生物学(predictive microbiology)<sup>[42]</sup>根据观察特定环境(温度、pH值、水分活度、添加剂等)下各种微生物的增殖、残存和死亡全过程,通过数学模型的计算机化来实现。研究重点为微生物生长数据库研究、货架期专家系统开发、食品货架期预测装置研制。

#### 4.1.2 基于电子鼻气味指纹图谱的货架期研究

货架期中随着品质变化会使产品成分自然分解而产生不良风味,因此产品的挥发性气味指纹图谱能直接反映

食品的剩余货架期。基于此,相关研究人员结合食品的货架期研究,利用电子鼻预测了苹果的采后货架期<sup>[43]</sup>、准确地区分了不同货架期的纯牛奶等研究<sup>[44]</sup>。

#### 4.1.3 除温度外其他因素影响下的货架期预测研究

将产品本身质量的损失与包装材料的影响相结合过来的产品货架期预测M-Rule Container Performance模型研究<sup>[10]</sup>,能将塑胶材料的包装几何学(形状、表面积、规格等)、材料及其密封性多方面因素结合起来考虑。对于低水分食品货架期预测的吸湿等温模型有BET(Brunauer-Emmett-Teller)模型、GAB (Guggenherm-Anderson-de Boer)模型、直线模型等<sup>[45]</sup>。

#### 4.2 货架期预测的科学性

##### 4.2.1 货架期预测研究中统计方法的深入应用

往往货架期内食品品质衰变,由理化、微生物和感官等多项指标综合体现,若通过对这些指标的整体分析则货架期预测将更加准确和清晰。然而,这需要借助数学统计方法,将多因素多变量的预测回归方法进行拟合。目前可以采用主成分分析法将多维变量进行数据降维或坐标转换,形成少数的正交变量能简化模型分析过程;也可以采用逐步线性回归和聚类分析,将相关性变量进行合并与组合,实现多变量的综合拟合预测方程<sup>[46]</sup>。

##### 4.2.2 食品品质动态衰变的剩余货架期预测研究

食品在不同温度和流通阶段具有不同的品质变化速率,而不同的变化速率可采用不同的算法计算其货架期。时间-温度经历-耐藏性(time-temperature-tolerance, TTT)一般是用于食品在流通环节中,保持产品质量的决定条件<sup>[47]</sup>。同时,此概念还表明食品在流通中因所经历的时间、温度而引起的品质降低值是累积的,也是不可逆的,而且以往的实验表明这种品质降低的变化与所经历的高温和低温顺序无关。

##### 4.2.3 货架期预测模型的可靠性分析研究

采用常规的货架期测定方法往往需要较长的实验周期,寿命加速实验虽然能够大大缩短实验周期,但是并不能对实验样品的商业货架寿命进行可靠性分析,因此不能获得过期食品保持可接受品质的概率。目前在机械、电子等工程产品设计领域经常使用的寿命实验中产品失效数据的可靠性分析方法,对分析验证货架期预测模型具有重要的意义<sup>[48-49]</sup>。

## 5 结 语

货架期不但关系食品生产企业的产品质量、品牌信誉、工艺技术、货物流通、货架销售等方面,同时也直接影响消费者的食用安全、消费偏好与接受程度。目前有关食品货架期的研究,除了以往以温度变化而引起品质变化速率转变的加速老化实验方法外,也引入了一

些新的便捷、快速、更加符合消费者实际欲望的预测方法。因此,随着传感器快速检测技术、数学回归建模方法研究、品质动态分析技术的发展与革新,会不断加速食品货架期预测研究的深入、细化,其货架期品质数据采集将更迅速合理、货架期分析模型更接近实际、货架期预测结果更快速准确。

#### 参考文献:

- [1] DAVID K, PERSIS S. The stability and shelf-life of food[M]. Cambridge: Wood head publishing limited, 2000: 6-13.
- [2] IFT. Shelf life of foods[J]. Journal of Food Science, 1984, 39: 861-964.
- [3] ALICE P. Shelf-life[J]. Nutrition and Food Science, 1999, 99(3): 131-135.
- [4] IFT. Shelf life of foods-guideline for its determination and prediction[M]. London: IFST, 1993: 81-82.
- [5] MCGINN C J P. Evaluation of shelf life[C]//IFST Proceedings. London: IFST, 1982: 153-161.
- [6] THOMAS A, MEEKIN M, THOMAS R. Shelf life prediction: status and future possibilities[J]. Int J Food Microbiol, 1996, 33: 65-83.
- [7] 曹悦, 陆利霞, 熊晓辉. 食品货架期预测新技术进展[J]. 食品研究与开发, 2009, 5(5): 165-168.
- [8] 梁艳, 李晓东. CO<sub>2</sub>延长乳和乳制品货架期的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2007(7): 53-56.
- [9] 焦宇知. 泡菜货架期研究[J]. 中国调味品, 2005(5): 42-45.
- [10] BRODY A L. Predicting packaged food shelf life[J]. Food Technology, 2003, 57(4): 100-102.
- [11] CARDELLI C, LABUZA T E. Application of weibull hazard analysis to the determination of the shelf life of roasted and ground coffee[J]. Lebensm Wissu Technol, 2001, 34(3): 273-278.
- [12] NELSON K, LABUZA T P. Water activity and food polymer science: implications of state on Arrhenius and WLF models in predicting shelf life[J]. Journal of Food Engineering, 1994, 22: 271-190.
- [13] 王晓兰, 靳焱, 云战友. 包装食品的货架期及其预测方法[J]. 中国供销商情: 乳品导刊, 2006(2): 35-37.
- [14] BRODY A L. Developing new food products for a changing marketplace[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000: 36-37.
- [15] MARK S, JON D. Shelf life testing[J]. Analytical Progress, 2003, 21(1): 156-159.
- [16] ROBERTSON G L. Predicting the shelf life of packaged foods[J]. ASEAN Food Journal, 1991, 6(2): 43-51.
- [17] VEGEL-TURENNE C, MAHFOUZ M, ALLAF K. Three Models for determining the induction time in the browning kinetics of the Granny Smith apple under static conditions[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 41: 133-139.
- [18] TAOUKIS P S, BILI M, GIANNAKOUREOU M. Application of shelf life modeling of chilled salad products to a TTI based distribution and stock rotation system[J]. Acta Horticulturae, 1998, 476: 131-140.
- [19] 余晓琴, 车晓彦, 张丽平. 食品货架寿命预测研究[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(3): 84-87.
- [20] DALGAARD P. Qualitative and quantitative characterization of spoilage bacteria from packed fish[J]. Int J Food Microbiol, 1995, 26: 319-333.
- [21] 肖琳琳, 张凤英, 杨宪时, 等. 预报微生物学及其在食品货架期预测领域的研究进展[J]. 海洋渔业, 2005, 27(1): 68-73.
- [22] BUCHANAN R L. Predictive food microbiology[J]. Trends Food Science Tech, 1993, 4: 6-11.
- [23] JONGENBURGER M H, ROMBOUTS F M. Modeling of the bacterial growth curve[J]. Appl Environ Microbiol, 1990, 56: 1875-

- 1881.
- [24] KOUTSOUMANIS K, NYEHAS G J E. Application of systematic experimental procedure to develop a microbial model for rapid fish shelf life prediction[J]. *Int J Food Microbiol*, 2000, 60: 171-184.
- [25] ZWIETERING M H, JONGENBERGER I, ROMBOUS F M, et al. Modeling of the bacterial growth curve[J]. *Application Environment Microbiology*, 1990, 56: 1875-1881.
- [26] GACULA M C. The design of experiments for shelf life study[J]. *Journal of Food Science*, 1975, 40: 399-403.
- [27] GACULA M C, KUBALA J J. Statistical models for shelf life failures[J]. *Journal of Food Science*, 1975, 40: 404-409.
- [28] HOUGH G, LANGOHR K, CEMEZ G, et al. Survival analysis applied to sensory shelf life of foods[J]. *J Food Sci*, 2003, 68(1): 359-362.
- [29] 余亚英, 袁唯. 食品货架期概述及其预测[J]. *中国食品添加剂*, 2007(5): 77-79.
- [30] 曾庆孝. 食品加工与保藏原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 36-37.
- [31] MOSSEL D A A, CORRY J E L, STRUIJK C B, et al. Essentials of the microbiology of foods: a textbook for advanced studies[M]. Chichester: Wiley, 1995: 175-214.
- [32] 王延丽. UHT乳货架期及预测模型的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [33] 王璋, 许时婴, 江波, 等, 译. 食品化学[M]. 3版. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 849-850.
- [34] AL-KADAMANY E, TOUFEILI I, KHATAR M. Determination of shelf life of concentrated yogurt(Labneh) produced by in-bag straining of set yogurt using hazard analysis[J]. *Journal of Dairy Science*, 2001, 85(6): 1023-1030.
- [35] LABUZA T P. Temperature/enthalpy/entropy compensation in food reactions[J]. *Food Technol*, 1980, 34(2): 67-69.
- [36] ZWIETERING M H, ROMBOUS F M. Some aspects of modeling microbial quality of food[J]. *Food Control*, 1993, 4: 89-96.
- [37] RATKOWSKY D A, OLLEY J, MCMECKIN T A, et al. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures[J]. *J Bacteriol*, 1982, 149: 1-5.
- [38] FUJIKAWA H, HOB T. Thermal inactivation analysis of Mesophiles using the Arrhenius model and Z-value models[J]. *J Food Prot*, 1998, 61(7): 910-912.
- [39] JONSSON V, SNGAG B G. Testing models for temperature dependence of the inactivation rate of *Bacillus* spores[J]. *J Food Sci*, 1997, 42(5): 1251-1252.
- [40] DAVEY K R. Applicability of the Davey linear Arrhenius predictive model to lag phase of microbial growth[J]. *Journal of Application Bacteriology*, 1991, 70: 253-257.
- [41] 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): 235-239.
- [42] MCMECKIN T A, OLLEY J N, ROSS T, et al. Predictive microbiology: theory and application[M]. Taunton: Research Studies Press, 1993: 32-34.
- [43] 张晓华, 张东星, 刘远方, 等. 电子鼻对苹果货架期质量的评价[J]. *食品与发酵工业*, 2007, 33(6): 20-23.
- [44] 郭奇慧, 白雪, 康小红. 应用电子鼻区分不同货架期的纯奶[J]. *乳业科学与技术*, 2008, 31(2): 68-69.
- [45] 冯梅, 王京海. 低水分食品防潮包装后货架寿命的预测模型[J]. *包装过程*, 1999, 20(6): 17-19.
- [46] 姜松, 王海鸥, 赵杰文. 猕猴桃低温贮藏期间硬度与化学品质的相关性研究[J]. *食品科学*, 2005, 26(5): 244-247.
- [47] 秦瑞昇, 谷雪莲, 刘宝林, 等. 基于TTT理论检测冷冻冷藏食品品质的方法[J]. *食品工业科技*, 2006, 27(9): 189-191.
- [48] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 32-33.
- [49] 刘国俊, 陈景鹏. 威布尔分布在寿命分析中的应用[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2003, 14(6): 65-67.