

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704017



乳制品冷链物流货架寿命模型

杨玮, 杨甜, 罗洋洋

(陕西科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 以乳制品中的乳酸饮料为研究对象, 引用有效温度的概念, 基于 Arrhenius 模型构建有效温度的求解模型. 据此建立乳制品冷链全过程货架寿命模型, 分析冷链运输过程中温度对乳制品货架寿命的影响. 经过计算和预测, 结果表明: 该方法能够准确地为消费者提供真实的货架寿命, 实现对乳制品货架寿命的实时监控, 以达到对乳制品冷链物流质量控制的目的, 提高乳制品冷链物流质量.

关键词: 货架寿命; 冷链物流; Arrhenius 模型; 有效温度; 乳制品

中图分类号: O 212; TS 205

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2017)04-0537-04

Research on Shelf Life of Dairy Products in Cold Chain Logistics

YANG Wei, YANG Tian, LUO Yangyang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: In this paper, lactic acid beverages in dairy products were studied. Based on the concept of effective temperature and the Arrhenius model, the effective temperature model was established. At the same time, the shelf life model of the whole cold chain process was also established to analyze the impact of transport temperature on the shelf life of dairy products. The results show that the method can accurately provide the real shelf life for consumers and realize the real-time monitoring of shelf life of dairy products so as to achieve the purpose of quality control of dairy cold chain logistics and then improve the dairy products cold chain logistics quality.

Keywords: shelf life prediction; cold chain logistics; Arrhenius model; effective temperature; dairy

以冷链产品中的乳制品为例, 层出不穷的质量安全问题使国家对其质量监控越来越严格, 对乳制品冷链物流进行质量控制也变得尤为重要. 国内对于冷链产品的研究主要集中在冷链物流追溯与预警、经营模式、需求量与成本上, 国外则主要在冷链物流时间温度变化、生物预测模型、物流稳定性上进行研究^[1-2]. 作为终端的消费者, 判别产品优劣的直接标准是其保质期^[3-4]. 消费者购买乳制品时, 会根据包装上的保质期判断乳制品质量; 而温度却是影响保质期的主要因素. 但在冷链运输过程中, 温度会由于各种不可控因素处于不断变化中, 这使消费者购买的产品上的保质期(货架寿命)不再准确. 基于此, 本文根据冷链运输中变动的温度构建乳制品货架寿命模型, 不仅能够提高商家的利益保证消费者的权益, 同时能够提高冷链物流的质量和效率, 增强对乳制品冷链物流的控制意识.

收稿日期: 2016-10-15

通信作者: 杨玮(1972-), 女, 副教授, 博士, 主要从事智能仓储系统优化调度、冷链物流预警与追溯的研究. E-mail: yangwei613@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(71390331); 陕西省社会科学基金资助项目(13SC011); 陕西省西安市未央区科研基金资助项目(201607)

1 货架寿命模型的构建

1.1 有效温度的求解模型

由于冷链运输中温度是动态变化的,因此,引用有效温度的概念模拟乳制品冷链运输过程不断变动的温度.有效温度表示在此温度下产品的质量状态与变动的温度下产品的状态是一样,因此,可以用这一温度代替整个运输过程中变动的温度.利用 Arrhenius 模型求解得到有效温度,据此建立乳制品货架寿命模型,并通过联立效温度模型和货架寿命模型得到冷链全过程货架寿命模型^[5].由于文中所考虑的是温度的变化对乳制品质量的影响,因此,基于 Arrhenius 模型^[6]建立有效温度求解模型.即

$$k = k_{\text{ref}} \cdot \exp\left[-\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right]. \quad (1)$$

式(1)中: k 为速率常数; R 为摩尔气体常量; T 为热力学温度; E_A 为表观活化能; k_{ref} 为指前因子(也称频率因子); T_{ref} 为参考温度.

在整个冷链运输的过程中,产品最终的质量状态是由各个阶段共同作用,因此,引入时间变量,将 Arrhenius 模型整理可得

$$k_{\text{ref}} \sum_i \exp\left[-\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right] t_i = k_{\text{eff}} t_{\text{tot}}. \quad (2)$$

根据有效温度的定义,当 k_{eff} 和 k 相等时,求出的温度值则为有效温度,因此,联立公式(1),(2),可得求解有效温度的公式为

$$T_{\text{eff}} = E_A T_{\text{ref}} / \left(RT_{\text{ref}} \ln\left(\frac{\sum_i \exp\left[-\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right] t_i}{t_{\text{tot}}}\right) + E_A \right). \quad (3)$$

由于冷链运输过程中温度的变化是随机变量,而采集到的温度-时间数据是有时间间隔的.因此,提出了利用蒙特卡洛(Monte-Carlo)模拟的方法对整个冷链运输过程进行模拟,使其能够更加逼近真实的冷链运输过程.

1.2 货架寿命模型的构建

产品包装上的保质期在研究中被称之为货架寿命,是消费商品尤其是食品的重要参数^[7].文中建立货架模型有如下4个主要步骤:1)明确研究对象的反应级数和品质函数;2)建立品质变化速率曲线表达式;3)对速率曲线进行回归分析;4)联立品质函数建模.

食品质量的变化通常是指在生产过程中的化学、物理和微生物过程的变化.研究表明,以化学反应动力学为基本理论模型可以反映这些变化^[8],食品的品质损失是可定量的、可描述的.食品品质函数的表达式,如表1所示.表1中: A 为产品的质量状态值,可以通过检测得出; A_0 为初始的质量状态值.

表1 食品品质函数的形式

Tab.1 Forms of food quality function

反应级数	0	1	2
品质函数	$A_0 - A$	$\ln(A_0/A)$	$1/[(n-1)(A^{1-n} - A_0^{1-n})]$

对于乳制品来说,影响乳制品变质的主要因素是温度变化.因此,选择 Arrhenius 方程作为预测货架寿命的模型. Arrhenius 方程表示的是食品质量下降的速度与温度的函数,速度与温度的关系式^[9-11],如表2所示.表2中: k 为反应变化速率; T 为热力学温度; C 为摄氏温度; a, b 为待定常数.

表2 食品品质变化速度与温度之间的关系式

Tab.2 Relational expressions between changing rate of food quality and temperature

序号	1	2	3	4	5
公式	$k = a + bT$	$k = aT^b$	$k = ab^C$	$k = a \cdot \exp(-b/T)$	$k = a/(b - c)$

定义不同温度下食品品质变化速率的表达式为

$$Y_T = d_T \times t + f_T. \quad (4)$$

式(4)中: Y_T 为温度 T 时影响食品品质因素值; t 为时间; d_T 为不同温度下影响食品品质因素值的变化速率值; f_T 为温度 T 时的常数值.

将不同温度下影响食品品质因素值的变化速率值(d_T)按照表 1 中食品品质变化速度与温度之间的关系式, 分别按照 $k-T$, $\ln k-\ln T$, $\ln k-C$, $\ln k-1/T$ 和 $1/k-C$ 的线性关系进行回归分析, 得到

$$\left. \begin{aligned} k &= g_1 T + h_1, & \ln k &= g_2 \ln T + h_2, & \ln k &= g_3 C - h_3, \\ \ln k &= g_4 \cdot (1/T) - h_4, & 1/k &= g_5 C - h_5. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中: k 为反应变化速率; T 为热力学温度; C 为摄氏温度; $g_1, \dots, g_5, h_1, \dots, h_5$ 均为常数。

式(5)是通过不同对品质速率值进行回归分析得到的. 因此, 选择品质变化速率与温度的表达式时应选择回归系数高的. 将式(5)代入表 1 的品质函数表达式, 可得到不同品质函数下的货架寿命模型。

1.3 冷链全过程货架寿命模型

建立冷链全过程货架寿命模型是将求解得到的有效温度代入货架寿命模型中, 因此, 冷链全过程货架寿命模型, 如表 3 所示。

表 3 货架寿命模型
Tab.3 Model of shelf life

反应级数	品质函数	速率温度关系式	货架预测模型
0	$A_0 - A$	$k = g_1 T + h_1$	$t = (A_0 - A) / (g_1 T_{\text{eff}} + h_1)$
		$\ln k = g_2 T + h_2$	$t = (A_0 - A) / \exp(g_2 T_{\text{eff}} + h_2)$
		$\ln k = g_3 C + h_3$	$t = (A_0 - A) / \exp(g_3 C + h_3)$
		$\ln k = g_4 \cdot (1/T) + h_4$	$t = (A_0 - A) / \exp(g_4 \cdot (1/T)_{\text{eff}} + h_4)$
		$1/k = g_5 C + h_5$	$t = (A_0 - A) \cdot (g_5 C + h_5)$
1	$\ln(A_0 / A)$	$k = g_1 T + h_1$	$t = \ln(A_0 - A) / (g_1 T_{\text{eff}} + h_1)$
		$\ln k = g_2 T + h_2$	$t = \ln(A_0 - A) / \exp(g_2 T_{\text{eff}} + h_2)$
		$\ln k = g_3 C + h_3$	$t = \ln(A_0 - A) / \exp(g_3 C + h_3)$
		$\ln k = g_4 \cdot (1/T) + h_4$	$t = \ln(A_0 - A) / \exp(g_4 \cdot (1/T)_{\text{eff}} + h_4)$
		$1/k = g_5 C + h_5$	$t = \ln(A_0 - A) \cdot (g_5 C + h_5)$
2	$1 / [(n-1)(A^{1-n} - A_0^{1-n})]$	$k = g_1 T + h_1$	$t = 1 / [(n-1)(A^{1-n} - A_0^{1-n})] / (g_1 T_{\text{eff}} + h_1)$
		$\ln k = g_2 T + h_2$	$t = 1 / [(n-1)(A^{1-n} - A_0^{1-n})] / \exp(g_2 T_{\text{eff}} + h_2)$
		$\ln k = g_3 C + h_3$	$t = 1 / [(n-1)(A^{1-n} - A_0^{1-n})] / \exp(g_3 C + h_3)$
		$\ln k = g_4 \cdot (1/T) + h_4$	$t = 1 / [(n-1)(A^{1-n} - A_0^{1-n})] / \exp(g_4 \cdot (1/T)_{\text{eff}} + h_4)$
		$1/k = g_5 C + h_5$	$t = 1 / [(n-1)(A^{1-n} - A_0^{1-n})] \cdot (g_5 C + h_5)$

2 算例分析

以乳制品中的乳酸饮料为研究对象, 通过调研得到冷链运输过程中温度(θ)随时间的变化值, 如图 1 所示. 图 1 中: n 为次数, 将图 1 中的数据带入式(3)求解有效温度, 结果如图 2 所示。

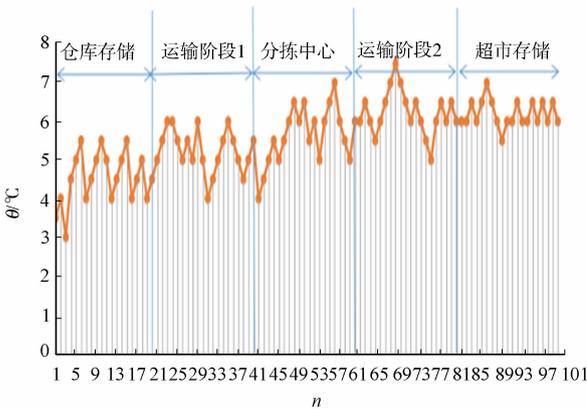


图 1 乳酸饮料冷链运输过程中温度变化
Fig.1 Changes of temperature in cold chain transport of lactic acid beverage

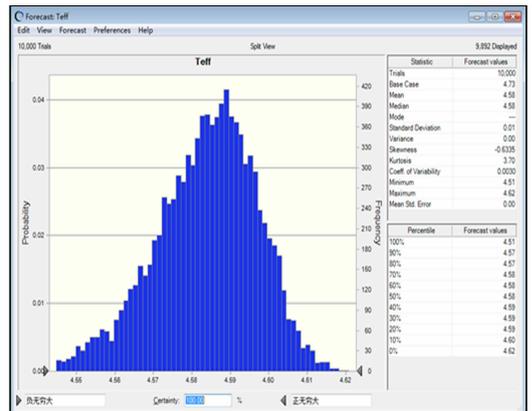


图 2 乳酸饮料模拟结果
Fig.2 Simulation results of lactic acid drink

由图 2 可知: 通过 1 万次的模拟, 整个冷链运输过程的有效温度分布在 4.55 °C 到 4.62 °C 之间, 平均值为 4.58 °C. 该值就是此次冷链运输的有效温度。

乳酸饮料在 4, 15, 23 ℃ 3 种不同温度条件下乳脂氧化速率的拟合方程, 如表 4 所示. 将其带入表 3 中的 5 个关系式中进行回归分析, 得到的回归方程如表 5 所示.

表 4 乳酸饮料在不同温度条件下速率拟合曲线

Tab. 4 Rate fitting curves under different temperature conditions of lactic beverage

温度/℃	线性回归方程	R
4	$Y=0.033\ 70x-2.975\ 6$	0.972\ 68
15	$Y=0.034\ 22x-2.872\ 8$	0.829\ 87
23	$Y=0.034\ 99x-2.916\ 4$	0.980\ 61

表 5 线性回归方程

Tab. 5 Linear regression equation

类别	线性回归方程	R
1	$Y=6.0\times 10^{-5}X+0.016\ 7$	0.961\ 3
2	$Y=0.508\ 9X-6.254\ 1$	0.959\ 5
3	$Y=0.001\ 8X-3.398\ 4$	0.963\ 1
4	$Y=-145.52X-2.867\ 0$	0.955\ 8
5	$Y=-0.05\ 19X+29.909\ 0$	0.964\ 8

由表 5 可知: 第 5 个回归方程的 R 平方值最大, 其拟合程度最高. 因此, 选取公式 $k=a/(b-c)$. 即 $g_5=0.051\ 9, h_5=29.909\ 0$, 又由于乳酸饮料遵循一级反应方程, 则货架寿命计算公式为

$$t = \ln(A/A_0) \cdot (-0.051\ 9 \cdot C + 29.909\ 0). \quad (6)$$

式(6)中: A 为乳酸饮料乳脂氧化的临界值; A_0 为乳酸饮料初始乳脂氧化的值; t 为乳酸饮料的货架寿命(d); C 为乳品贮藏的环境温度(℃).

将模拟的有效温度代入货架寿命模型中, 可得其保质期求解公式为

$$t = \ln(A/A_0) \cdot 29.671\ 298. \quad (7)$$

为了验证用有效温度代替整个冷链过程的准确性, 通过测定乳酸饮料的乳脂氧化速率对此次运输的乳酸饮料的货架寿命进行实验验证. 实验测得其乳脂氧化速率为 0.035, 保质期求解公式为

$$t = \ln(A/A_0)/0.035. \quad (8)$$

对比式(7), (8)可知: 用有效温度模拟冷链运输过程, 并对其进行货架寿命求解的方法是能准确地为消费者提供真实的货架寿命.

3 结束语

利用有效温度构建乳制品货架寿命模型, 为求解冷链运输过程中乳制品的真实货架寿命提供了方法. 通过获取冷链运输过程中变动的温度, 能够帮助消费者和商家求解乳制品真实的货架寿命, 从而提高商家的利益, 保证消费者的权益. 为提高乳制品冷链物流质量和效率, 乳制品真实的货架寿命可以作为商家的决策依据并作为制定库存策略, 这是下一步的研究工作.

参考文献:

- [1] 卜梅国. 国内外农产品冷链物流发展比较研究[J]. 物流工程与管理, 2011, 33(11): 33-35.
- [2] 徐宏峰, 张言彩, 郑艳民. 冷链物流研究现状及未来的发展趋势[J]. 生态经济, 2012(5): 141-143.
- [3] 胡毕斯哈拉图, 王宏梅. 延长酸奶保质期的研究进展[J]. 中国酿造, 2015, 34(4): 8-12.
- [4] 余小琴. 食品货架寿命的预测研究[J]. 食品开发与研究, 2007, 28(3): 84-87.
- [5] 李颜丽, 陆佳平. 温度对乳饮料脂氧化特性及其包装保质期的影响[J]. 包装工程, 2009, 30(8): 25-27.
- [6] GOGOU E, KATSAROS G, DERENS E *et al.* Cold chain database development and application as a tool for the cold chain management and food quality evaluation[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 52: 109-121.
- [7] MIRA T. C2 SLDS: A WSN-based perishable food shelf-life prediction and LSFO strategy decision support system in cold chain logistics[J]. Food Control, 2014, 38(7): 19-29.
- [8] 苗君莅, 应杰, 徐致远. 长保质期酸奶保质期末的风味研究[J]. 食品工业, 2015, 36(12): 69-71.
- [9] 李娟, 张丽萍, 张蕾. 动力学理论预测食品包装货架寿命模型研究[J]. 包装工程, 2009, 30(12): 118-120.
- [10] DERMESONLUOGLU E. Kinetic study of quality indices and shelf life modelling of frozen Spinach under dynamic conditions of the cold chain[J]. Journal of Engineering, 2015, 148: 13-23.
- [11] 王强, 陈晓麟. 不同储藏条件对脂肪氧化初期氧化指标的影响[J]. 食品科技, 2010, 35(9): 168-171.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)