

农产品保鲜与食品包装

鲜牛奶品质参数的动力学特性研究及货架期预测

殷献华¹, 殷诚^{2,3}, 钱静^{2,4*}, 王琳², 郭涛²

(1. 宿迁市江南大学产业技术研究院, 江苏 宿迁 223802; 2. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 3. Kochi University of Technology, Kochi 7820003, Japan; 4. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: **目的** 为了研究鲜牛奶的品质参数变化规律, 建立鲜牛奶的货架期模型。**方法** 对鲜牛奶的脂肪、蛋白质、pH 值和酸度在不同贮藏时间和温度内的变化进行分析, 通过食品化学反应动力学方程和阿伦尼乌斯方程对鲜牛奶品质参数进行动力学特性研究。**结果** 鲜牛奶中脂肪、蛋白质、pH 值在贮藏期内呈下降趋势, 酸度呈上升趋势。4 °C 能减缓鲜牛奶 pH 值的下降和酸度的上升。**结论** 酸度能很好地表达鲜牛奶品质的变化过程, 并且通过化学反应动力学特性研究得到了鲜牛奶酸度的活化能和基于酸度的鲜牛奶的货架期模型。

关键词: 鲜牛奶; pH 值; 酸度; 动力学; 货架期

中图分类号: TB48 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)03-0055-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.007

Kinetics and Shelf Life Prediction of Fresh Milk Quality Parameters

YIN Xianhua¹, YIN Cheng^{2,3}, QIAN Jing^{2,4*}, WANG Lin², GUO Tao²

(1. Industrial Technology Research Institute, Jiangnan University, Jiangsu Suqian 223802, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 3. Kochi University of Technology, Kochi 7820003, Japan; 4. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to establish the shelf life model of fresh milk to study the change rules of fresh milk quality parameters. The changes of fat, protein, pH and acidity of fresh milk under conditions of different storage time and temperature were analyzed. The kinetic characteristics of fresh milk quality parameters were studied by food chemical reaction kinetics equation and Arrhenius equation. The fat, protein and pH values of fresh milk showed a decreasing trend during storage, while the acidity showed an increasing trend. 4 °C could slow down the decline of pH value and the rise of acidity of fresh milk. Acidity can express the quality change process of fresh milk well, and the activation energy of fresh milk acidity and the shelf life model of fresh milk based on acidity are obtained by studying the kinetic characteristics of chemical reaction.

KEY WORDS: fresh milk; pH value; acidity; kinetic; shelf life

液态牛奶分为常温奶和低温保鲜奶 2 种, 鲜牛奶也叫纯牛奶, 是呈乳白色或者微黄色的均匀胶态

流体, 无沉淀、无凝块、无杂质、无淀粉感、无异味。鲜牛奶的生产工艺主要包括挤奶、过滤、冷却

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1603300); 宿迁市科技重点研发项目 (现代农业) (L201905); 国家留学基金 (202206790027)

*通信作者

和巴氏杀菌等步骤。鲜牛奶中含有丰富的蛋白质、脂肪、矿物质和维生素等营养成分,同时保留了牛奶中的活性物质,如乳酸菌、免疫球蛋白等^[1]。根据2020年欧睿数据显示,我国目前纯牛奶消费中有四分之三为常温奶,仅有四分之一为鲜牛奶,这个比例远低于发达国家的饮用比例^[2]。尽管如此,鲜牛奶凭借其新鲜、营养丰富、方便食用等特点,被越来越多消费者喜欢,因此国内鲜牛奶的市场份额也逐年增长^[3]。

一般而言,常温奶采用的是超高温瞬时灭菌处理,灭菌温度在130~150℃^[4],这个温度几乎可以杀灭所有的微生物,因此常温奶的保质期更长。相较于常温奶,鲜牛奶采用的是巴氏灭菌,其温度较低,在63~85℃,虽然能够保留住牛奶更多的营养成分,但是一些耐高温的孢子仍可继续存活,并且鲜牛奶中丰富的营养物质能给鲜牛奶中菌种的繁殖生长提供良好的环境,使得鲜牛奶变酸结块,鲜牛奶的保质期会被大大缩短。

食品的主要构成部分是有机物质,它们通常表现出不稳定的性质,在贮藏过程中极易发生化学反应,从而导致食品的变质。食品品质的变化程度取决于这些反应的速度和持续时间,而这些反应的速率受温度的限制。因此,研究食品品质变化的动力学问题,以及食品品质与贮藏温度和贮存时间之间的关系,无论在理论上还是实际应用中,都具有重要的意义^[5]。蔡超^[6]以酸奶的酸度、黏度、pH值、乳酸菌数和感官评价值为研究对象,对酸奶在不同温度下的质量参数变化进行了探究,并以酸度和感官评价值建立了相关货架期预测模型。目前,关于鲜牛奶的品质变化及牛奶品质参数动力学研究仍然较少,并且研究的质量参数存在局限性,不够全面。因此本文分别选取鲜牛奶的蛋白质、脂肪、酸度及pH值,作为主要的品质参数。其次,选取适当的鲜牛奶品质参数,用以开展动力学特性。最后根据研究结果,得到可以表示鲜牛奶变质的品质参数指标,建立鲜牛奶的货架期模型。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:酚酞、甲醛、盐酸、氢氧化钠标准溶液、草酸钾、乙醇、乙醚、石油醚,以上试剂纯度均为AR,均采购于国药集团化学试剂有限公司;鲜牛奶购于无锡欧尚超市,品牌为光明优倍,保质期15d,贮藏条件为冷藏2~6℃,购买后于实验室中4℃贮藏。

主要仪器:HW.SY1-P3S恒温水浴锅,常州恒隆仪器有限公司;DHG恒温干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;S40-K pH计,瑞士METTLER TOLEDO公司。

1.2 方法

1.2.1 脂肪的测定

鲜牛奶中脂肪的测定参考赵蓉^[7]的方法。首先称取鲜牛奶10g与10mL盐酸混合,随后将混合物置于80℃的水浴锅内,搅拌至鲜牛奶完全消化,鲜牛奶完全消化后再向混合物中加入10mL乙醇,再次混合均匀后将混合物冷却至室温。随后将混合物移入具塞量筒中,用25mL乙醚分5次洗涤盛放混合液的试管,洗涤液全部倒入量筒中,洗涤完后摇匀量筒内混合物,然后打开量筒塞子释放出气体,再塞好后静置12min。静置完后用与量筒内混合物等体积的石油醚-乙醚混合液冲洗量筒,静置15min后,混合物出现分层现象。吸取上部清液于锥形瓶内,再将5mL乙醚加入到量筒内,摇匀后静置,再次吸取上层清液于锥形瓶中,将锥形瓶置于100℃的烘箱内干燥2h,在干燥器内冷却0.5h后称量。称量后的锥形瓶质量减去锥形瓶的初始质量即为测得的脂肪的含量。本研究主要测定贮藏于20℃条件下的鲜牛奶中的脂肪,每隔4h测定,直至52h。

1.2.2 蛋白质的测定

鲜牛奶样品中蛋白质的测定参考GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》^[8]及田志梅等^[9]的研究:取10mL牛奶于三角瓶中,加入0.5mL饱和草酸钾溶液和0.5mL酚酞指示液,2min后用0.1mol/L氢氧化钠溶液将混合溶液滴定至粉红色。然后加入2mL中性甲醛溶液,再用0.05mol/L氢氧化钠溶液滴定至粉红色,记录消耗的0.05mol/L氢氧化钠溶液氢氧化钠标准滴定溶液的毫升数。本研究主要测定贮藏于20℃条件下的鲜牛奶中的蛋白质,每隔4h测定,直至52h。

牛奶中的蛋白质含量计算如下:

$$A = \frac{C \times V_1 \times 0.014 \times F \times 19.98}{V} \times 100 \quad (1)$$

式中:A为牛奶的蛋白质含量,g/100mL;C为氢氧化钠滴定溶液的浓度,mol/L;V₁为加入中性甲醛溶液后,滴定消耗的氢氧化钠溶液的体积,mL;0.014为1mol/L氢氧化钠溶液相当于氮的质量;F为氮换算为蛋白质的系数,参考标准取值为6.38;19.98为经验常数;V为牛奶的体积,mL。

1.2.3 pH值的测定

使用S40-K pH计分别对贮藏于4、20和37℃条件下鲜牛奶的pH值进行测定^[10],每个鲜牛奶样品重复测定3次,鲜牛奶的pH值取3次测定值的平均值。4℃贮藏条件下的鲜牛奶每隔24h测定,直至336h;20℃贮藏条件下的鲜牛奶每隔16h测定,直至104h;37℃贮藏条件下的鲜牛奶每隔4h测定,直至36h。

1.2.4 酸度的测定

在测定鲜牛奶中的酸度时,其贮藏条件和测定周期与测定鲜牛奶 pH 值时的贮藏条件和测定周期一致。鲜牛奶酸度的测定参考 GB 5009.239—2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》^[11]。在测定鲜牛奶样品酸度时,每次取 10 g 鲜牛奶样品、20 mL 蒸馏水和 2 mL 酚酞指示剂充分混合。随后对鲜牛奶进行滴定,在滴定过程中,观察样品的颜色变化,当样品变成微红色,并保持 30 s 不褪色时,记录所使用的氢氧化钠标准溶液的体积。将记录的氢氧化钠体积代入式(2),鲜牛奶的酸度取 2 次测定结果的平均值。

$$A = \frac{c \times V \times 100}{m \times 0.1} \quad (2)$$

式中: A 为鲜牛奶的酸度, °T (以 100 g 样品所消耗 0.1 mol/L 氢氧化钠毫升数计); c 为氢氧化钠标准溶液的浓度, mol/L; V 为滴定时消耗的氢氧化钠标准溶液体积, mL; m 为试样的质量, g; 0.1 为酸度理论定义氢氧化钠的浓度, mol/L。

1.2.5 鲜牛奶质量参数的动力学特性研究

目前,食品的化学动力学方程可以描述大多数食品品质参数变化的情况,并且还被广泛用于确定食品的化学反应速率^[12],主要有零级反应动力学方程(3)和一级反应动力学方程(4)。

$$A_h = A_0 + kt \quad (3)$$

$$A_h = A_0 e^{kt} \quad (4)$$

式中: A_h 为食品贮藏第 h 小时的品质; A_0 为食品质量参数的初始值; k 为食品质量参数变化速率常数; t 为食品的贮藏时间, h。

阿伦尼乌斯方程(5)又被经常用于表达食品的化学反应速率和温度之间的关系,其与食品化学反应动力学方程结合后,能很好地描述不同温度下食品品质参数的变化情况,还能获得食品不同品质参数对应的活化能,建立对应的食品货架期预测模型^[13-14]。

$$k = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (5)$$

式中: k_0 为指前因子; E_a 为食品品质参数的活化能, J/mol; R 为摩尔气体常数, $R=8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; T 为热力学温度, K。

对式(5)两边取对数后得到方程(6)。

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (6)$$

将化学反应动力学中得到的化学反应速率 k 和温度 T ,以 $\ln k$ 为纵坐标, $1/T$ 为横坐标画出对应的点,并且进行线性拟合。根据式(6),即可得到对应的食品品质参数的活化能和指前因子。

在建立食品的货架期模型时,如果食品品质参数动力学方程为零级反应动力学方程,则关联阿伦尼乌斯方程得到食品的货架期模型为:

$$t = \frac{A - A_0}{k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}} \quad (7)$$

如果食品品质参数动力学方程为一级反应动力学方程,则关联阿伦尼乌斯方程得到食品的货架期模型为:

$$t = \frac{\ln \frac{A}{A_0}}{k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}} \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 脂肪和蛋白质的变化情况

鲜牛奶中含有丰富的蛋白质、氨基酸、脂肪和矿物质等,为人体提供了丰富的营养物质和能量^[15]。图 1 是 20 °C 贮藏温度下鲜牛奶中脂肪和蛋白质的变化情况。一般而言,牛奶的变质过程被分为 4 个阶段:细菌减数阶段、发酵产酸阶段、中和阶段和腐败分解阶段。在这 4 个阶段中,牛奶中的营养物质会逐渐地被分解^[16]。如图 1a、b 所示,鲜牛奶中的脂肪和蛋白质随着贮藏时间的延长,其整体趋势是下降的,这与黄友鹰等^[17]对牛奶在贮藏期间营养成分的分析得到的

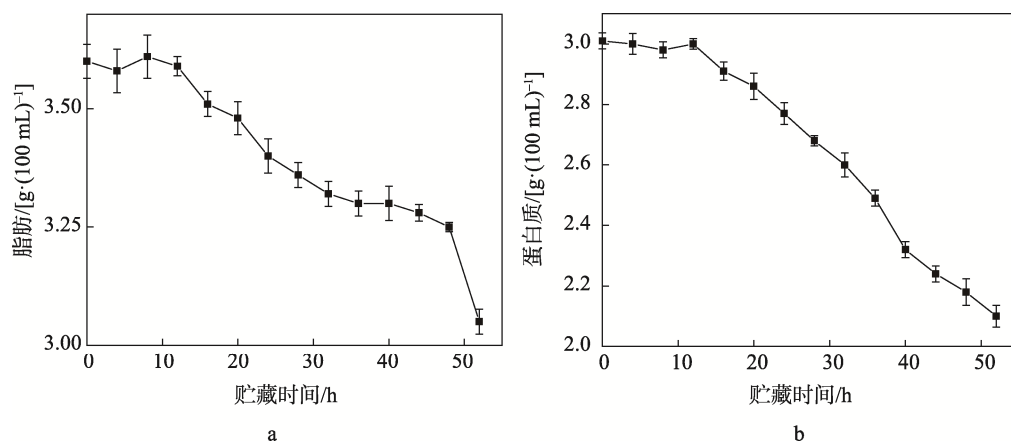


图 1 20 °C 贮藏温度下鲜牛奶中脂肪 (a) 和蛋白质 (b) 的变化情况
Fig.1 Changes of fat (a) and protein (b) in fresh milk at 20 °C storage temperature

结果是一致的,其研究表明,随着时间的延长,牛奶中的蛋白质、脂肪和乳糖含量会明显下降。此外,鲜牛奶中的脂肪和蛋白质的下降速率是逐渐加快的,这可能主要是由于一方面牛奶中乳酸的积累使得牛奶的pH也降低了,进而影响了蛋白质的结构,使蛋白质发生凝结,这与后面pH的变化趋势是一致的;另一方面牛奶中杂菌的繁殖会产生各种酶,这些酶会分解牛奶中的脂肪和蛋白质^[18-19]。从品质参数的动力学特性角度来看,这2种品质参数的变化趋势与微生物的生长活动趋势不相符。质量参数变化速率常数 k 都是负值,且进行零级和一级反应动力学拟合时,其 R^2 均较低,故不适合作为鲜牛奶动力学特性研究的目标品质参数。

2.2 pH值的变化情况

为了确保鲜牛奶的品质,在鲜牛奶的生产过程中,定期测定鲜牛奶的pH值是必要的^[20]。如图2所示,不同贮藏温度下的鲜牛奶的pH值均出现了整体下降的趋势。其中,37℃下鲜牛奶的pH值下降得最快,这可能是由于贮藏温度的升高加快了鲜牛奶中乳酸菌的繁殖,乳酸生成速率加快,导致鲜牛奶的pH值下降很快^[21]。除此以外,4℃下鲜牛奶的pH值下降得最慢,这可能是由于低温降低了乳酸菌的代谢速率,鲜牛奶中抑菌期也被延长^[22]。后期将会对鲜牛奶的pH值进行动力学分析。

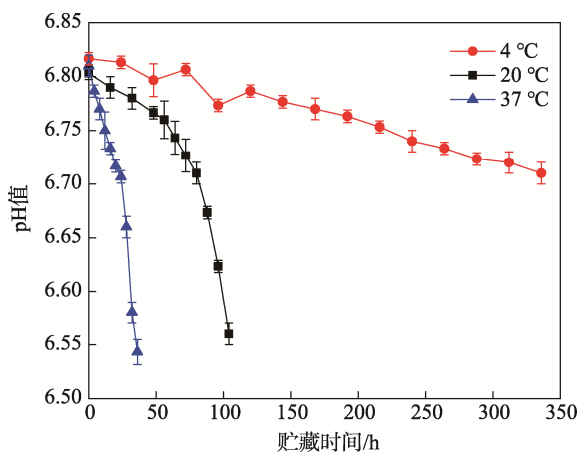


图2 鲜牛奶中pH值在不同温度和贮藏时间下的变化情况

Fig.2 Changes of pH value in fresh milk under conditions of different temperature and storage time

2.3 酸度的变化情况

酸度是牛奶重要的理化性质指标之一,在牛奶的变质过程中,牛奶的酸度也会明显上升。如图3所示,不同贮藏温度下的鲜牛奶的酸度均随着贮藏时间的增加而不断升高。这主要是一方面由于随着贮藏时间的增加,牛奶中的乳糖在细菌的作用下逐渐转化为乳酸,乳酸的积累会导致牛奶pH值的降低,这与pH值的测定

结果是一致的;另一方面由于蛋白质等物质也会逐渐被分解为有机酸、醛类和醇类等物质,这也会导致酸奶酸度的上升^[23]。此外,当牛奶酸度超过18°T时,将不适宜饮用^[24]。从图3中可以看出,在4℃贮藏温度下,牛奶在贮藏312h时才会超过此限度,在20℃贮藏温度下,贮藏80h时会超过此限度,在37℃贮藏温度下,牛奶在贮藏24h时会超过此限度,说明低温贮藏能够大大减缓牛奶酸度的上升,维持住鲜牛奶的品质。基于酸度在不同贮藏温度和时间下的变化趋势,后面也会对其进行化学反应动力学特性研究。

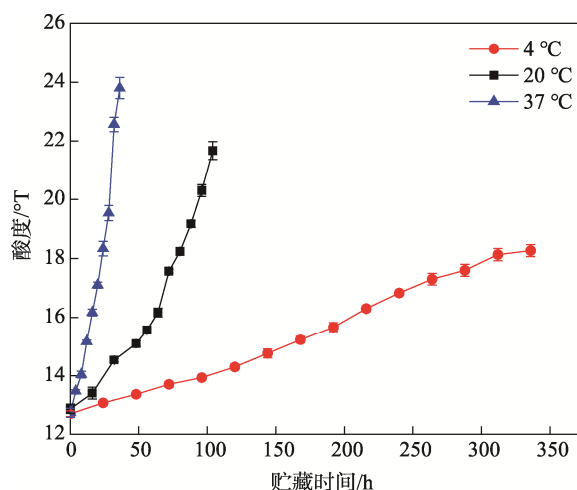


图3 鲜牛奶中酸度值在不同温度和贮藏时间下的变化情况

Fig.3 Changes of acidity in fresh milk under conditions of different temperature and storage time

2.4 鲜牛奶品质参数的动力学特性研究和货架期预测

根据1.2.5节中提及的食品品质参数的化学反应动力学方程,首先分别对鲜牛奶的pH值和酸度进行零级和一级反应动力学方程的拟合。从表1可以看出,对鲜牛奶的pH值来说,相较于一级反应动力学方程的拟合结果,零级反应动力学方程更适合描述鲜牛奶pH值的反应动力学,其 R^2 整体略大于一级反应动力学方程拟合的结果。但是在20℃贮藏条件下,不论是零级还是一级动力学方程,似乎都不适合用来描述鲜牛奶的pH值的动力学特性。而且不管是零级还是一级反应动力学方程,其质量参数变化速率常数 k 值都是负值,说明pH值不适合进行动力学特性研究。对鲜牛奶的酸度值来说,除了20℃贮藏条件下零级反应动力学方程的 R^2 为0.935,其余所有贮藏温度下的零级或一级反应动力学方程的 R^2 均大于0.95,且质量参数变化速率常数 k 为正值。说明在本研究中鲜牛奶的酸度值能很好地用来描述鲜牛奶的品质变化情况,并且能够进行动力学特性研究。

表 1 不同贮藏温度下鲜牛奶 pH 值和酸度变化的动力学方程拟合结果
Tab.1 Fitting results of kinetic models for pH and acidity changes of fresh milk at different storage temperature

质量参数	温度/°C	零级反应动力学方程	R_1^2	一级反应动力学方程	R_2^2
pH	4	$y=-0.000\ 3x+6.819\ 2$	0.969	$y=6.819\ 3e^{-4.7206E-5t}$	0.968
	20	$y=-0.002\ 0x+6.842\ 0$	0.791	$y=6.842\ 0e^{-0.000\ 3t}$	0.788
	37	$y=-0.006\ 9x+6.829\ 6$	0.911	$y=6.829\ 9e^{-0.001\ 0t}$	0.908
酸度	4	$y=0.017\ 6x+12.447\ 8$	0.991	$y=12.618\ 8e^{0.001\ 2t}$	0.994
	20	$y=0.082\ 9x+11.837\ 0$	0.935	$y=12.070\ 6e^{0.005\ 3t}$	0.967
	37	$y=0.304\ 9x+11.801\ 8$	0.958	$y=12.206\ 9e^{0.018\ 1t}$	0.983

注: R_1^2 为零级反应动力学方程的相关系数, R_2^2 为一级反应动力学方程的相关系数。

根据表 1 可以看出, 对鲜牛奶的酸度来说, 其零级和一级化学反应动力学方程均能较好地描述鲜牛奶酸度在不同贮藏温度下的变化情况。因此将 2 种化学反应动力学方程同时进行基于阿伦尼乌斯方程的拟合运算。以质量参数变化速率常数 k 的对数值为纵坐标, 以 $1/T$ 为横坐标进行画图、拟合, 结果如图 4 所示。零级和一级化学动力学方程得到的参数均能很好地进行阿伦尼乌斯方程拟合, 其中零级化学反应动力学方程对应的阿伦尼乌斯方程的 R^2 为 0.998 8, 一级化学反应动力学方程对应的阿伦尼乌斯方程的 R^2 为 0.998 4, 从结果来看, 两者都能很好地进行阿伦尼乌斯方程拟合。

进一步地, 通过式 (6) 可以计算得到鲜牛奶酸度的活化能和指前因子。如表 2 所示, 若以零级化学反应动力学方程为准, 则计算得到的鲜牛奶酸度的活化能为 61.801 kJ/mol, 对应的指前因子为 8.04×10^9 ; 若以一级化学反应动力学方程为准, 则计算得到的鲜牛奶酸度的活化能为 58.804 kJ/mol, 对应的指前因子为 1.5×10^8 。

进一步地, 当鲜牛奶酸度的动力学方程为零级反应动力学方程, 则关联阿伦尼乌斯方程得到鲜牛奶的货架期模型为:

$$t = \frac{A - A_0}{8.04 \times 10^9 \times e^{-\frac{7\ 432.986\ 4}{T}}} \quad (9)$$

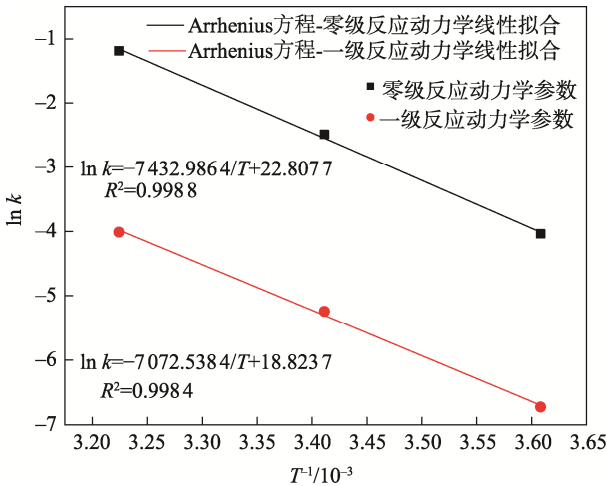


图 4 基于鲜牛奶酸度的阿伦尼乌斯方程-
化学反应动力学拟合结果
Fig.4 Arrhenius equation-kinetics fitting
results based on acidity of fresh milk

当鲜牛奶酸度的动力学方程为一级反应动力学方程, 则关联阿伦尼乌斯方程得到鲜牛奶的货架期模型为:

$$t = \frac{\ln \frac{A}{A_0}}{1.5 \times 10^8 \times e^{-\frac{7\ 072.538\ 4}{T}}} \quad (10)$$

表 2 基于阿伦尼乌斯方程的鲜牛奶酸度值的温度依参数
Tab.2 Temperature dependence parameters of acidity of fresh milk based on Arrhenius equation

温度/°C	化学反应动力学方程	k	R_1^2	阿伦尼乌斯方程	E_a	k_0	R_2^2
4	$y=0.017\ 6x+12.447\ 8$	0.018	0.991				
20	$y=0.082\ 9x+11.837\ 0$	0.083	0.935	$\ln k=-7\ 432.986\ 4/T+22.807\ 7$	61.801	8.04×10^9	0.998\ 8
37	$y=0.304\ 9x+11.801\ 8$	0.305	0.958				
4	$y=12.618\ 8e^{0.0012t}$	0.001	0.994				
20	$y=12.070\ 6e^{0.0053t}$	0.005	0.967	$\ln k=-7\ 072.538\ 4/T+18.823\ 7$	58.804	1.5×10^8	0.998\ 4
37	$y=12.206\ 9e^{0.0181t}$	0.018	0.983				

注: R_1^2 为化学反应动力学方程的相关系数, R_2^2 为阿伦尼乌斯方程的相关系数。

将鲜牛奶中酸度的阈值 18°T 和本研究中酸度的初始值 12.7°T 分别代入到模型 (9) 和 (10) 中, 得到的货架期的预测值分别为 297.05 h 和 285.19 h, 与实际值 312 h 的误差分别为 5.03% 和 9.40%。说明 2 个货架期模型均能很好地预测鲜牛奶的货架期, 且模型 (9) 的预测误差更小, 更为精确。

3 结语

本研究首先对在不同贮藏温度下的鲜牛奶的脂肪、蛋白质、pH 值和酸度等品质参数的变化进行了研究分析。结果表明, 4°C 的贮藏温度能够减缓鲜牛奶 pH 值的下降和酸度的上升趋势。对鲜牛奶的 pH 值和酸度进行化学反应动力学分析后结果表明零级和一级化学反应动力学方程均能很好地表达鲜牛奶酸度的变化情况。进一步地, 阿伦尼乌斯方程-化学反应动力学的拟合表明, 阿伦尼乌斯方程-零级化学反应动力学和阿伦尼乌斯方程-一级化学反应动力学拟合得到的拟合精度都较高, 且较为接近, 并且得到了鲜牛奶酸度的活化能和指前因子。基于对鲜牛奶酸度的化学动力学特性研究, 得到了基于鲜牛奶酸度的鲜牛奶货架期模型。将鲜牛奶酸度的值代入货架期模型中得到的预测值和实际值的误差均较小。本研究为乳制品的品质变化监控和预测提供了很好的方法和思路。

参考文献:

- [1] BASPINAR B, GÜLDAŞ M. Traditional Plain Yogurt: A Therapeutic Food for Metabolic Syndrome?[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2021, 61(18): 3129-3143.
- [2] 付翠霞, 董振玲, 李艳娟, 等. 不同塑料软包膜对鲜牛奶风味性能的影响[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(12): 55-58.
FU C X, DONG Z L, LI Y J, et al. Influence of Different Soft Package of Liquid Plastic Film on the Flavor of Fresh Milk[J]. China Dairy Industry, 2022, 50(12): 55-58.
- [3] 海琳. 低温奶, 正悄悄走近你和我[J]. 消费指南, 2020(11): 24-25.
HAI L. Cold Milk, Creeping up on You and Me[J]. Consumption Guide, 2020(11): 24-25.
- [4] 吴贞贞. 超高压射流杀菌奶的工艺优化及其理论性质研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010: 8-17.
WU Z Z. Process Optimization and Theoretical Properties of Ultra-High Pressure Jet Sterilization of Milk[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010: 8-17.
- [5] 杨昌举. 动力学在食品质量变化研究中的若干应用[J]. 食品科学, 1986(1): 1-8.
YANG C J. Some Applications of Kinetics in the Study of Food Quality Change[J]. Food Science, 1986(1): 1-8.
- [6] 蔡超. 酸奶在贮存期间参数的变化和对货架寿命预测模型的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 65-66.
CAI C. Study on the Change of Parameters of Yogurt during Storage and the Prediction Model of Shelf Life[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012: 65-66.
- [7] 赵蓉. 食品中酸水解法测定脂肪的细节优化[J]. 价值工程, 2017, 36(33): 166-167.
ZHAO R. Detail Optimization of the Determination of Fat in Food by Acid Hydrolysis[J]. Value Engineering, 2017, 36(33): 166-167.
- [8] 国家食品药品监督管理总局. 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 5.
State Food and Drug Administration. Determination of Protein in Food: GB 5009.5-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 5.
- [9] 田志梅. 甲醛值滴定法快速测定牛奶中蛋白质含量[J]. 中国食品卫生杂志, 2008, 20(3): 244-245.
TIAN Z M. Determination of Protein Content in Milk by Formaldehyde Value Titration[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2008, 20(3): 244-245.
- [10] 刘玲馨, 王阳, 朱毅. 自制与市售酸奶贮藏过程品质变化对比研究[J]. 中国乳业, 2023(1): 70-76.
LIU L X, WANG Y, ZHU Y. A Comparative Study of the Quality Changes in the Storage Process of Homemade and Commercially Available Yogurt[J]. China Dairy, 2023(1): 70-76.
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品酸度的测定: GB 5009.239—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 5.
National Health and Family Planning Commission, People's Republic of China. Determination of Food Acidity: GB 5009.239-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 5.
- [12] LEE D S, ROBERTSON G. Interactive Influence of Decision Criteria, Packaging Film, Storage Temperature and Humidity on Shelf Life of Packaged Dried Vegetables[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28(5): 100674.
- [13] XIE H K, ZHOU D Y, HU X P, et al. Changes in Lipid Profiles of Dried Clams (*Macra Chinensis Philippi* and *Ruditapes Philippinarum*) during Accelerated Storage and Prediction of Shelf Life[J]. Journal of Agricultural

- and Food Chemistry, 2018, 66(29): 7764-7774.
- [14] MARIANI E, MALACARNE M, CIPOLAT-GOTET C, et al. Prediction of Fresh and Ripened Cheese Yield Using Detailed Milk Composition and Udder Health Indicators from Individual Brown Swiss Cows[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2022, 9: 1012251.
- [15] MA F T, WEI J Y, HAO L Y, et al. Bioactive Proteins and Their Physiological Functions in Milk[J]. *Current Protein & Peptide Science*, 2019, 20(7): 759-765.
- [16] 徐楚璇. 牛奶的变质与新鲜度检测探讨[J]. *现代商贸工业*, 2019, 40(10): 176-178.
- XU C X. Discussion on Deterioration and Freshness Detection of Milk[J]. *Modern Business Trade Industry*, 2019, 40(10): 176-178.
- [17] 黄友鹰, 马毓锦. 消毒牛奶在冰箱内保存期及其营养成分的变化[J]. *农牧产品开发*, 1996(9): 37-38.
- [18] 侣博学, 张养东, 郑楠, 等. 生乳新鲜度评价指标研究进展[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(6): 3499-3507.
- SI B X, ZHANG Y D, ZHENG N, et al. Research Progress on Freshness Evaluation Indices of Raw Milk[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(6): 3499-3507.
- [19] 梁秀婷, 周卉, 王琤韡. 贮藏温度及时间对不同类型商品乳酸度的影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(3): 149-151.
- LIANG X T, ZHOU H, WANG C W. The Effect of Storage Temperature and Time on Lactate Degree of Different Commodities[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(3): 149-151.
- [20] KOMARU S, MATSUO S, IWAMATSU T, et al. Monitoring the Yogurt Fermentation Process and Analysis of Flavor Compounds Using a Novel Ion Mobility Spectrometer[J]. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 2021, 68(11): 421-429.
- [21] 贾庆超, 孔欣欣. 市售酸奶在贮藏过程中品质的变化[J]. *中国乳品工业*, 2020, 48(6): 26-30.
- JIA Q C, KONG X X. Study on the Quality Changes of Commercial Yogurt during Storage[J]. *China Dairy Industry*, 2020, 48(6): 26-30.
- [22] 张微微, 王强, 吴明明, 等. 基于温度对酸奶储藏期品质影响的研究[J]. *文山学院学报*, 2023, 36(2): 20-23.
- ZHANG W W, WANG Q, WU M M, et al. A Study on the Quality of Yogurt during Storage at Different Temperatures[J]. *Journal of Wenshan University*, 2023, 36(2): 20-23.
- [23] 雷子玉. 便携式近红外仪现场评价生鲜乳主要营养指标[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022: 38-45.
- LEI Z Y. Field Evaluation of Main Nutritional Indexes of Fresh Milk by Portable Near Infrared Analyzer[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2022: 38-45.
- [24] ABREU A S, FISCHER V, STUMPF M T, et al. Natural Tree Shade Increases Milk Stability of Lactating Dairy Cows during the Summer in the Subtropics[J]. *The Journal of Dairy Research*, 2020, 87(4): 444-447.