

价体系,对开发新产品,降低生产成本,完善生产工艺和开拓市场有重要意义^[7,8]。微生物发酵剂在发酵肉制品生产中发挥着重要作用,不同的微生物发酵剂对产品感官性状的贡献不一样^[9~11]。可以从消费者的角度,通过感官评价进行肉品发酵剂的筛选,这方面的工作有待进一步深入研究。

3.2 微生物数量的预测预报

通过回归方程计算不同工艺条件下,乳酸细菌、菌落总数、微球菌和酵母菌的理论值(cfu/g),并与实验测定数据进行比较,平均误差[(理论值-实测值/理论值)×100%, n=6]范围分别是-1.38%~14.47%, 4.89%~26.12%, 1.88%~20.23%, 4.45%~16.36%。这些数学模型可以作为预报微生物学的重要基础,对食品品质控制和提高发酵食品的安全性有重要意义。

4 结论

环境因子对发酵肉制品的微生物更迭有重要影响,通过响应曲面法试验设计,不仅可以优化发酵工艺,促进有益微生物的生长,抑制有害微生物,提高产品的安全性,改善产品的品质,缩短生产周期,实现发酵过程的数字化控制,而且也是微生物预报预测的重要手段。

参考文献:

- [1] 李宗军.侗族发酵酸肉(Nanx wudl)的微生物菌系及其挥发性风味组分的研究[J].南京农业大学博士学位论文,2002.
- [2] 洪楠,侯军.统计分析系统教程(SAS for windows)[M].电子工业出版社,2001.
- [3] 萧兵,钟俊维.农业多因素试验设计与统计分析[M].湖南科学技术出版社,1985.
- [4] 张全德.农业试验统计模型[M].浙江科学技术出版社,1985.
- [5] Lawless H T 著,王栋,等译.食品感官评价原理与技术[M].北京:中国轻工业出版社,2001.
- [6] 李宗军,江汉湖.侗族发酵酸肉的微生物学特性[J].中国微生物生态学杂志,2002,(1):19-22.
- [7] Matulis R J.Sensory characteristics of Frankfurters as affected by fat, salt and pH[J].J Food Sci,1995,60(1):40-47.
- [8] Matulis R J.Sensory characteristics of Frankfurters as affected by fat, salt and pH[J].J Food Sci,1995,60(1):48-54.
- [9] Hagen H,Nase H.Accelerated production of dry fermented sausages[J].Meat Sci,1996,43:S229-S242.
- [10] Oventry J,Hickey M W.Growth characteristics of meat starter cultures[J].Meat Sci,1991,30:41-48.
- [11] Nase H,Holck A L,Alexsson H J,et al.Accelerated ripening of dry fermented sausage by addition of a Lactobacillus proteinase[J].Int J Food Sci Technol,1995,29:651-659.

食品液体(南瓜汁)蒸发浓缩过程动力学研究

高丽兰,刘振义*,李丁,宋继田,赵鸿汉
(天津科技大学机械工程学院,天津 300222)

摘 要: 本文对蒸发浓缩过程营养损失动力学进行了研究,建立了汽-液-固三相循环流化床蒸发器蒸发浓缩南瓜汁时胡萝卜素损失的动力学模型。实验结果表明:模型预测值与实验值吻合良好,该模型对工业生产有一定的应用价值。

关键词: 南瓜汁;蒸发浓缩;营养损失;动力学

Kinetics Study of Food Liquid(Pumpkin Juice) during Evaporating Concentration Process

GAO Li-lan, LIU Zhen-yi, LI Ding, SONG Ji-tian, ZHAO Hong-han
(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology Tianjin 300222, China)

Abstract: We have studied nutrients degradation kinetics for evaporating concentration process in this paper, and set up the kinetics model of carotene loss during the process of evaporating pumpkin juice with circulating fluidized bed evaporator with

收稿日期:2003-06-19 * 通讯联系人

基金项目:天津市自然科学基金资助项目(003604211)

作者简介:高丽兰(1978-),女,硕士研究生,主要研究食品液体新型蒸发设备及浓缩过程营养损失动力学。

three-phase flow. Our experimental conclusion showed: The predicted values from the model agree very well with the measured values, and this model has definite application values for industrial production.

Key words: pumpkin juice; evaporating concentration; nutrition loss; kinetics

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2004)01-0046-04

液体食品的浓缩是食品加工的重要单元操作, 目前采用的基本方法有三种: 蒸发浓缩、冷冻浓缩和膜浓缩, 其中以蒸发浓缩的应用最为广泛, 技术最为成熟。液体食品在蒸发浓缩中除固形物含量得到提高, 即通常所说的得到浓缩外, 其目标品质如色素溶液的色价(吸光度)、营养液的有效成分会有不同程度的损害。就液体食品而言, 人们首先应当考虑的是液体浓度的提高和营养成分的损失尽量少, 这两方面具有同等重要的意义, 这也是食品工业的蒸发浓缩与化学工程中的蒸发浓缩的原则区别。目前, 人们研究较多的是恒容热过程中营养损失动力学, 而蒸发浓缩过程中营养损失动力学的研究鲜见报道, 因此, 研究食品蒸发浓缩过程中目标品质的变化与损失具有重要的意义。

本文以食品液体—南瓜汁为原料, 研究了在汽—液—固三相循环流化床蒸发器中蒸发浓缩时胡萝卜素损失的动力学问题, 通过几种动力学模型的比较, 最后给出了南瓜汁在蒸发浓缩过程中胡萝卜素损失动力学模型、实验结果表明: 模型预测值与实验值吻合良好。此模型的给出对于食品液体加工过程中品质损失的研究具有一定的意义。

1 蒸发浓缩过程动力学模型理论研究

食品工程中, 品质损失动力学的研究一直受到很多学者的关注, 与此相关的研究报道较多从动力学模型的角度大致可以分为两大类, 一类是以化学反应动力学为其基本理论; 另一类则不以化学反应动力学为基础。对于热敏性物料, 如维生素、色素、酶等, 在遭受热力破坏的过程中, 多数情况下是符合单分子反应动力学规律^[1], 与化学反应中的单分子反应有同样的趋向。对胡萝卜素的热处理, 本文采用以化学反应动力学为基础的品质损失模型。

化学反应动力学中的反应速率是以参加化学反应的物质在单位时间内变化的量来表示的, 如果一定温度下反应体系体积不变, 物量变化也就比例于浓度变化, 即由浓度表示的反应速率方程其前提是反应体系体积不变或变化可以忽略(在这里称之为恒容)。在食品加工过程中, 加热、冷却、杀菌等是恒容过程, 而浓缩是体积减少、固形物含量提高的变体积过程, 即变容过程, 故动力学不能由浓缩过程直接得出, 需先研究容积没有变化的恒容热过

程, 经过转换才能用于浓缩过程。

1.1 恒容热过程动力学模型

在食品工业中, 描述食品营养成分损失的一般反应速率模型为:

$$-\frac{dA}{dt} = kA^n \quad (1)$$

式中: A —营养成分的浓度;

t —时间;

k —反应速率常数;

n —反应级数。

由于采用此模型回归时, 部分回归结果不是十分理想, 因此, 近年来, 许多研究者对反应速率模型进行了研究, 其中 J.H. SHIN 等人^[2]提出了拟平方根(MRBP)反应速率模型:

$$-\frac{dG}{dW} = rG^m \quad (2)$$

式中: G —营养成分(指标)的浓度;

W —时间的平方根($W^2=t$);

r, m —分别为营养损失反应速率常数和反应级数。

文献[2]中将此模型应用于辣椒红色素的降解研究中, 结果表明其精度高于一般反应速率模型。故本文以拟平方根反应速率模型为基础, 进行了胡萝卜素损失动力学模型的研究。就温度对反应速度常数 r 的影响, 一般常用的有 Arrhenius 模型和 z 值模型, 其具体形式如下:

$$\text{Arrhenius 模型: } k = k_0 \cdot \exp(-E_a/RT) \quad (3)$$

$$z \text{ 值模型: } k = 10^{a_0 + a_1(T-T_0)/z} \quad (4)$$

这两个模型的统一形式为:

$$\ln r = a + bT^n \quad (r \text{ 为反应速率常数}) \quad (5)$$

当 $a=1$ 时, 即为 z 值模型; 当 $a=-1$ 时, 即为 Arrhenius 模型。

考虑到这两种模型使用范围的局限性^[3], 本文提出如下非线性关系式作为反应速率常数模型:

$$\ln r = a_0 + a_1 T + a_2/T \quad (6)$$

式中的系数都可是可溶性固含量 Bx 的函数。一般可回归成如下形式:

$$a_0 = a_1 + a_2 Bx + a_3 Bx^2 + a_4 Bx^3 \quad (7)$$

$$a_1 = \beta_1 + \beta_2 Bx + \beta_3 Bx^2 + \beta_4 Bx^3 \quad (8)$$

$$a_2 = \gamma_1 + \gamma_2 Bx + \gamma_3 Bx^2 + \gamma_4 Bx^3 \quad (9)$$

由向量组中向量间的线性相关性^[4]可证明：此模型对于反应速率常数随温度的变化是适用的，而且扩大了使用范围，提高了回归精度。

1.2 浓缩过程动力学模型

浓缩过程是溶液体积不断减小、浓度随之增加的变容过程，故将浓缩后的溶液浓度折算成原体积时溶液浓度，此时营养损失动力学模型表达式为：

$$-\frac{dG_{\text{折}}}{dW} = rG_{\text{折}}^m \quad (2a)$$

式中： $G_{\text{折}}$ —折算成原体积时的营养成分浓度计算值。根据质量守恒定律得出溶液浓缩过程中的预测值 $G_{\text{折}}$ 为：

$$G_{\text{折}} = G_{\text{折}} \frac{Bx}{Bx_0} \quad (10)$$

物料浓度随时间变化，其回归式如下：

$$Bx = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \quad (11)$$

如果浓缩是一个不等温过程，则还应有：

$$T = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 \quad (12)$$

这样式(10)、(2a)、(6)-(9)、(11)(若浓缩为不等温，还包括(12))组成了蒸发浓缩过程中营养损失动力学模型的一般形式。

2 实验研究

2.1 实验材料

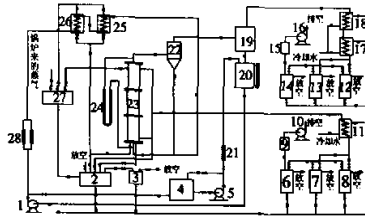
采用市场上常见的南瓜，要求果肉厚，色泽橙黄，无病虫害，且要充分成熟。按照下面的工艺流程制作南瓜汁：

南瓜→挑选→清洗→去瓤、籽→切片→热烫→打浆→过滤→调 pH 值(pH=4.5)→南瓜汁

2.2 实验方法

取不同浓度(3%、5%、8%、11%)的适量南瓜法溶液分别在温度为 70、80、90℃ 下进行恒温加热，并在时间为 0、5、10、20、30、40、50、60min 时分别取样，迅速冷却后测其吸光度，并根据文献[5]中的公式计算出胡萝卜素含量。

由恒容热实验数据获得具体动力学模型后，再在汽-液-固三相循环流化床蒸发器中进行蒸发浓缩动力学实验研究。实验装置的流程图如图 1 所示，主要由进料及循环系统、加热系统、真空系统和二次蒸汽冷凝系统等组成，所采用的惰性粒子为陶瓷和玻璃粒子(直径为 $\Phi 2-\Phi 4$)。



1 循环泵 2、7、8、12、13 冷凝水储罐 3 测量罐 4 料液储罐 5 进料泵 6、14 真空调节罐 9、15 干燥罐 10、16 真空泵 11、17、18 冷凝器 19 汽液分离器 20 进料罐 21、28 流量计 22 液固分离器 23 流化床蒸发器 24 U型管压差计 25、26 预热器 27 汽包

图1 三相循环流化床蒸发器实验流程图

2.3 实验结果

2.3.1 反应级数 m

把胡萝卜素含量 G 、 $\ln G$ 及 $1/G$ 分别对 $W(t^{1/2})$ 标绘，图 2 示出一组 $\ln G$ 对 W 的关系(吴直线关系)。图示说明：在本实验范围内，胡萝卜素损失动力学遵循一级反应， $m = 1$ ，即：

$$-\frac{dG}{dW} = rG \quad (14)$$

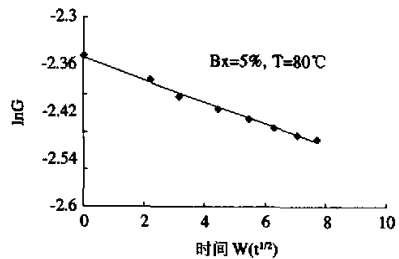


图1 $\ln G$ 与 W 的变化图

2.3.2 反应速率常数 r

一级反应的营养损失速率方程积分式为：

$$\ln G = -rW + \ln G_0 \quad (2b)$$

采用最小二乘法将 $\ln G$ 与 W 的数值进行回归可求得各实验条件下的反应速率常数 r 。

2.3.3 系数 a_0 、 a_1 、 a_2 的确定。

根据上述方程式(6)，将 $\ln r$ 和 T 、 $1/T$ 采用最小二乘法进行回归得对应的各实验条件下的 a_0 、 a_1 、 a_2 的具体值，因为系数 a_0 、 a_1 、 a_2 都是 Bx 的函数，故将 a_0 、 a_1 、 a_2 分别和 Bx 回归，其回归方程式如下：

$$a_0 = -243073Bx^3 + 53055Bx^2 - 3436.3Bx + 61.626 \quad (6a)$$

$$a_1 = 1387.7Bx^3 - 302.7Bx^2 + 19.587Bx - 0.36872 \quad (7a)$$

$$a_2 = 1E+07Bx^3 - 2E+06Bx^2 + 14160Bx - 2668.9 \quad (8a)$$

可溶性固含量 Bx 和时间 t 的关系式如下，图 3 示出了 Bx 和 t 的关系。

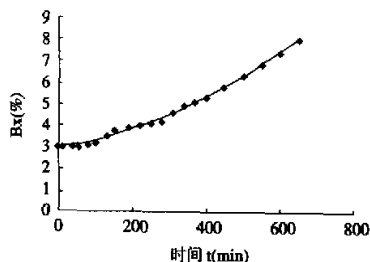


图3 可溶性固含量随时间变化的曲线图

$$Bx = 7E-06t^2 + 0.0032t + 2.9147 \quad (12a)$$

2.3.4 动力学模型

汽-液-固三相循环流化床蒸发器浓缩过程胡萝卜素损失动力学模型:

$$G_{\text{残}} = G_{\text{初}} \frac{Bx}{Bx_0} \quad (11)$$

$$G_{\text{初}} = -G_0 \exp(rW) \quad (12c)$$

$$\ln r = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 \quad (6)$$

$$a_0 = -243073B^3x + 53055B^2x - 3436.3Bx + 61.626 \quad (7a)$$

$$a_1 = 1387.7B^3x - 302.7B^2x + 19.587Bx - 0.3672 \quad (8a)$$

$$a_2 = 10085292.75B^3x - 2188466.11B^2x + 140160.36Bx - 2668.91 \quad (9a)$$

$$Bx = 7E-06t^2 + 0.0032t + 2.9147 \quad (12a)$$

图4示出了在一定实验条件下,蒸发浓缩过程中胡萝卜素含量实测值与模型预测值之间的关系。

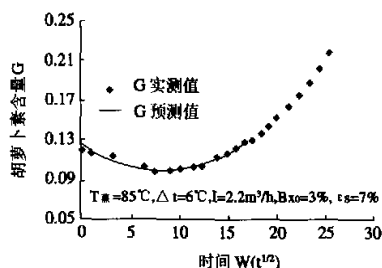


图4 胡萝卜素含量实测值与预测值比较

由图可见:胡萝卜素含量实测值 $G_{\text{实}}$ 与理论模型预测值 $G_{\text{预}}$ 吻合良好。

2.4 几种模型的比较

将浓缩过程实验数据再分别用 Arrhenius 模型和 z 值模型进行回归,得出对应的具体动力学模型,并计算出各实验条件下的预测值。

分别将 Arrhenius 模型和 z 值模型和本文提出的新模型的预测值与实测值的比较示图 5。

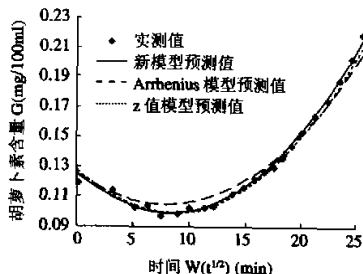


图5 几种模型的比较图

由图5可见:本文提出的新模型所得预测值更加接近于实验值。

3 结论

本文研究了南瓜汁溶液在恒容热过程和蒸发浓缩过程中胡萝卜素损失动力学,建立了汽-液-固三相循环流化床蒸发器浓缩过程中胡萝卜素损失动力学模型:

$$G_{\text{残}} = G_{\text{初}} \frac{Bx}{Bx_0}$$

$$G_{\text{初}} = -G_0 \exp(rW)$$

$$\ln r = a_0 + a_1 T + a_2 T^2$$

$$a_0 = -243073B^3x + 53055B^2x - 3436.3Bx + 61.626$$

$$a_1 = 1387.7B^3x - 302.7B^2x + 19.587Bx - 0.3672$$

$$a_2 = 10085292.75B^3x - 2188466.11B^2x + 140160.36Bx - 2668.91$$

$$Bx = 7E-06t^2 + 0.0032t + 2.9147$$

在本实验范围内,通过与 z 值模型和 Arrhenius 模型比较得出,新模型的预测值与实验值吻合更为良好,提高了预测精度,并且本文建立的蒸发浓缩动力学模型在结构上具有普遍性,可用于指导工业生产。

参考文献:

- [1] 芝崎勋[日].新编食品杀菌工艺学[M].许有成,译.农业出版社,1990.
- [2] H Shin, H L Chung, et al. Degradation kinetics of Capsanthin in Paprika (*Capsicum annum* L.) as affected by heating [J]. Journal of Food Science, 2001, 66: 15-18.
- [3] U Jonsson, B G Snygg, et al. Testing two models for the temperature dependence of the heat inactivation rate of *Bacillus stearothermophilus* spore [J]. Journal of Food science, 1997, 42: 1251-1252, 1263.
- [4] 同济大学数学教研室编.线性代数[M].高等教育出版社,1991.
- [5] 黄伟坤,等.食品检验与分析[M].中国轻工业出版社,1997.