

# 果汁型豆酸汤饮料稳定性动力学模型初探

李明<sup>1,2,3</sup>, 赵良忠<sup>1,2,4\*</sup>, 王容<sup>1,2</sup>, 范柳<sup>1,2</sup>

(1. 邵阳学院食品与化学工程学院, 邵阳 422000; 2. 豆制品加工技术湖南省应用基础研究基地, 邵阳 422000; 3. 广州佳明食品科技有限公司, 广州 511458; 4. 湖南省果蔬清洁加工工程技术研究中心, 邵阳 422000)

**摘要:** **目的** 研究果汁型豆酸汤饮料稳定性动力学模型, 建立豆酸汤饮料稳定性快速预测方法。**方法** 基于化学反应动力学和热力学的基本原理, 以果汁型豆酸汤为研究对象, 采用加速实验方式, 对豆酸汤在贮藏期内, 检测离心沉淀率、粒径、吸光度和感官评价等物理指标。**结果** 建立了吉布斯自由能与离心沉淀率之间回归方程( $r^2=0.9743$ ), 感官值与离心沉淀率之间的回归方程( $r^2=0.9846$ ), 以及感官值与离心沉淀率、温度之间的动力学模型。预测模型误差变异系数  $CV$  平均值为 12.40% 小于 15%。**结论** 模型能够精确预测产品的稳定性, 为果汁型豆酸汤饮料稳定性预测提供了科学快速方法。

**关键词:** 果汁型豆酸汤饮料; 加速实验; 动力学; 热力学; 稳定性

## Exploration on stability kinetics model of juice soysour soup beverage

LI Ming<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Liang-Zhong<sup>1,2,4\*</sup>, Wang Rong<sup>1,2</sup>, FAN Liu<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Chemical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China; 2. Soybean Processing Techniques of the Application and Basic Research Base in Hunan Province, Shaoyang 422000 China; 3. Guangzhou Jiaming Food technology Co., Ltd, Guangzhou 511458, China; 4. Hunan Provincial Engineering Research Center for Fruits and Vegetables Cleaning Processing, Shaoyang 422000, China)

**ABSTRACT: Objective** To explore the stability kinetics model of juice soysour soup beverage and establish rapid prediction method on stability for juice soysour soup beverage. **Methods** Based on the basic principles of chemical reaction kinetics and thermodynamics, the juice soysour soup beverage was used as the research object, and the accelerated precipitation method was used to detect the physical index including centrifugal sedimentation rate, particle size, absorbance and sensory evaluation value during the storage period of the juice soysour soup beverage. **Results** Regression equations between the Gibbs free energy and the centrifugal sediment rate ( $r^2=0.9743$ ), the regression equation between the sensory value and the centrifugal sedimentation rate ( $r^2=0.9846$ ), and the kinetic model between the sensory value and the centrifugal sedimentation rate and temperature were established. The average model error coefficient  $CV$  of the prediction model was 12.40%, which was less than 15%. **Conclusion** The model can accurately predict the stability of the product, providing a scientific and rapid method for predicting the

**基金项目:** 邵阳学院豆制品加工技术湖南省应用基础研究基地(2013TP4067)、湖南省果蔬清洁加工工程技术研究中心(2015TP2022)、湖南省研究生科研创新项目(CX2017B792)

**Fund:** Supported by Soybean Processing Techniques of the Application and Basic Research Base in Hunan Province, Shaoyang University (2013TP4067), Hunan Provincial Engineering Research Center for Fruits and Vegetables Cleaning Processing Project (2015TP2022) and Hunan Postgraduate Research Innovation Project (CX2017B792)

\***通讯作者:** 赵良忠, 教授, 主要研究方向为食品科学技术。E-mail: sys169@163.com

\***Corresponding author:** ZHAO Liang-Zhong, Professor, Department of Biological and Chemical Engineering, Shaoyang University, Soybean Processing Techniques of the Application and Basic Research Base in Hunan Province, Shaoyang University, Hunan Provincial Engineering Research Center for Fruits and Vegetables Cleaning Processing, Shaoyang 422000, China. E-mail: sys169@163.com

stability of the juice soysour soup beverage.

**KEY WORDS:** juice soysour soup beverage; fast test; kinetics; thermodynamics; stability

## 1 引言

贵州酸汤历史悠久, 蕴含中华传统的养生文化, 是贵州民族特色调味品。且酸汤是发酵产品, 含有丰富的有机酸和微量元素<sup>[1]</sup>。随着酸汤的热销, 酸汤饮料研究也随之兴起<sup>[2,3]</sup>。果汁型酸汤饮料以豆清液经乳酸菌发酵, 再添加白砂糖、葡萄糖和苹果汁, 配制而成的饮料, 其主要成分碳水化合物、蛋白质、脂肪、有机酸和大豆异黄酮等<sup>[4-8]</sup>, 属于蛋白质悬浊液体系。蛋白质体系的不稳定严重影响产品的外观和货架期, 是饮料工业中经常遇到的问题, 其主要表现为大分子物质沉淀、脂肪上浮等。如何快速准确预测果汁型豆酸汤饮料稳定性和货架期是果汁型豆酸汤饮料产品的关键技术。

目前, 液体饮料的货架期基本依据企业的经验或行业相关产品的参考值。Narayanan 等<sup>[9]</sup>研究了超高温灭菌豆奶储存期品质变化和货架期的关系; Rustom 等<sup>[10]</sup>研究了超高温灭菌花生奶储存期品质变化和货架期的关系。Al-Kadmany 等<sup>[11]</sup>采用危害分析法确定 Labneh 浓缩酸奶的货架期, 把浓缩酸奶贮存在 5、15、25 °C 温度下, 分析产品感观指标。在国内, 饮料的稳定性预测研究也逐渐成为热点, 研究调配型乳酸饮料、植物蛋白饮料、茶饮料和果汁饮料的稳定性预测模型<sup>[12-16]</sup>。但对于豆酸汤饮料的稳定性及货架期研究较少。

本文以果汁型豆酸汤饮料为研究对象, 采用储存期加速实验的方法, 研究果汁型豆酸汤饮料在恒温过程中的物理化学和感官指标的变化, 获得其化学反应动力学和热力学参数, 并建立化学动力学和热力学模型快速预测产品的稳定时间, 为果汁型豆清液饮料稳定性快速预测提供科学依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料、试剂与仪器

豆清发酵液(总酸含量: 5.5±0.3 g/L, 实验室自制);

60 °Brix 浓缩苹果汁(食品级, 烟台北方安德利果汁股份有限公司); 白砂糖(食品级, 南宁糖业股份有限公司); 葡萄糖(食品级, 西王药业股份有限公司); 去离子水(食品级, 实验室自制)。

GL-20G-2 数显糖度计(上海安宁科学仪器厂); GI54DWS 立式自动压力蒸汽灭菌器(致微(厦门)仪器有限公司); 6227001 VELOCITY14R 高速冷冻离心机(Dynamica); WJL-628 激光粒度仪(上海仪电物理光学仪器有限公司); HPX-9272 MBE 电热恒温培养箱(上海博迅实业有限公司医疗器械厂); UV-1780 紫外分光光度计(岛津仪器(苏州)有限公司)。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 果汁型豆酸汤饮料制备

##### (1) 配方

取豆清液发酵液 15000 mL, 白砂糖 6.5%, 浓缩苹果汁 4.5%。

##### (2) 工艺流程

豆酸汤→添加白砂糖、葡萄糖、果汁→过滤(100 目)→灌装(150 mL/瓶)→杀菌(85 °C/12 min)。

#### 2.2.2 快速贮藏实验

果汁型豆清液饮料的数量为 100 瓶, 除了 5 瓶用于初始指标检测, 其余样品按照表 1 要求储存。

### 2.3 测试

测试内容包括离心沉淀率、粒径分布、吸光度、感官评价。25、35、45、55 °C 恒温箱中样品的检测时间间隔分别为 10、20、30、40、50、60、90、120 d。检测时每个温度处理随机取 3 瓶平行样进行检测。

#### 2.3.1 离心沉淀率

称量约 20 g 样品放入离心管中, 设定温度: 25 °C, 设定转速: 4000 r/min, 设定离心时间: 20 min。然后取出离心管, 并除去上清液, 再将离心管倒立静置 5 min 沥干后称量, 除去管底部的沉淀量再次称量。每个样品进行次平行测定, 离心沉淀率取次平行测定的平均值。离心沉淀率的计算公式如下:

表 1 储存快速实验存放条件及检测项目

Table 1 Storage of fast test for storage conditions and test items

储存温度/°C	储存时间 /d	样品数量 /瓶	检测项目
25	10、20、30、40、50、60、90、120	24	感观值、离心沉淀率、吸光度、粒径分布
35	10、20、30、40、50、60、90、120	24	感观值、离心沉淀率、吸光度、粒径分布
45	10、20、30、40、50、60、90、120	24	感观值、离心沉淀率、吸光度、粒径分布
55	10、20、30、40、50、60、90、120	24	感观值、离心沉淀率、吸光度、粒径分布

$$\text{离心沉淀率} = \frac{\text{沉淀物质量}}{\text{离心饮料质量}} \times 100\% \quad (1)$$

### 2.3.2 感官值

选择 20 个感官评价员进行培训和考核, 使之具备相应的资质。按照实验时间要求, 让感官评价员使用数据化记录。依据感官平均值是否低于 2.5, 判定产品在外观的稳定性结果评分是否可以接受<sup>[11]</sup>。感官值评价标准参见表 2。

表 2 果汁型豆酸汤饮料储存期间感官值评价标准  
Table 2 Standard for evaluation of sensory value during storage of juice soysour soup beverage

评价标准	分值
没有差别	0
非常细微的差别	1
细微的差别	2
中等的差别	3
中等偏大的差别	4
很大的差别	5
非常大的差别	6

### 2.3.3 粒 径

激光粒度仪测试产品的粒径分布情况, 该仪器基于米氏光散射理论设计, 以波长为 633 nm 的激光器为主光源, 波长为 466 nm 的蓝光固体光源为辅光源。样品测定前在恒温培养箱恒温至(25±0.5) °C并充分摇匀, 粒径测试的结果通过该仪器附带的软件进行分析输出。

### 2.3.4 吸光度

本实验使用岛津 UV-1780 型紫外分光光度计检测样品的吸光度以观察理化参数在储存期间的变化。测量时, 每次样品瓶中的中间, 即距离瓶底 60 mm 处的液体放入 50 μL, 去离子水为空白样。波长设定: 540 nm, 然后测定稀释液的吸光度。

## 2.4 储存期间理化参数动力学与热力学

食品储存期间质量物理化学参数的变化可以用式表示<sup>[17]</sup>

$$\frac{dC}{dt} = \pm kC^n \quad (2)$$

其中  $C$  为  $t$  时的物理化学参数浓度数值,  $k$  为反应速率常数,  $n$  为反应级数。

若为零级反应, 则可用(3)式计算其反应速率常数

$$C_0 - C = kt \quad (3)$$

若为一级反应, 则可用(4)式计算其反应速率常数

$$\ln \frac{C_0}{C} = kt \quad (4)$$

其中,  $C_0$  为物理化学参数浓度数值最初值。

反应温度决定反应速率常数, Labuan<sup>[18]</sup>应用阿仑尼乌斯方程式研究了食品的品质变化速率。可以用方程(5)式表示

$$k = A_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

其中  $A_0$  为阿仑尼乌斯常数,  $E_a$  为活化能,  $R$  为绝对气体常数 8.314(J/mol·K),  $T$  为绝对温度(°K),  $k_0$  和  $E_a$  都是经验常数, 与反应系统物质本性有关。取对数:

$$\ln k = -\frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + B \quad (6)$$

在求得不同温度下的反应速度常数后, 取温度自然对数对热力学温度的倒数(1/T)作图, 可获得斜率为  $-E_a/R$  的直线。

在  $T_1$  和  $T_2$  2 个不同温度之间相比, 可得:

$$\ln \frac{k_1}{k_2} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (7)$$

$Q_{10}$  表示反应温度增加 10 °C 时, 反应速率的增加的比值

$$Q_{10} = \frac{k_{T+10}}{k_T} = \frac{k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+10)}\right)}{k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} = \exp\left(\frac{10E_a}{RT(T+10)}\right) \quad (8)$$

为了更进一步了解反应机理, 根据绝对对反应速率理论<sup>[19]</sup>可以计算反应热力学参数:  $\Delta H^*$ 、 $\Delta S^*$ 、 $\Delta G^*$ 。

$\Delta H^*$ (kJ/mol)可以通过(7)式计算

$$\Delta H^* = E_a - RT \quad (9)$$

$\Delta S^*$ (J/mol·K)可以通过(8)式计算

$$K = \frac{K_b}{h} \exp\left(\frac{\Delta S^*}{R}\right) \exp\left(\frac{-\Delta H^*}{RT}\right) \quad (10)$$

其中  $K_b$  为玻尔兹曼常数(1.38×10<sup>-23</sup> J/K),  $h$  为普朗克常数(6.626×10<sup>-34</sup> Js)。

$\Delta G^*$ (kJ/mol)可以通过(9)式计算

$$\Delta G^* = \Delta H^* - T\Delta S^* \quad (11)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 储存期间理化参数的变化

#### 3.1.1 离心沉淀率

果汁型豆酸汤饮料在不同的贮藏温度下 25、35、45、55 °C 离心沉淀率的变化曲线参见图 1, 由图可知, 在同一温度下, 样品的离心沉淀率随时间延长而增加, 不同温度储存条件下, 温度越高, 样品的离心沉淀率的斜率越大, 由于温度高, 分子运动越剧烈, 样品中大分子物质在布朗运动时, 碰撞的机会越高, 从而导致实验所看到的情形。

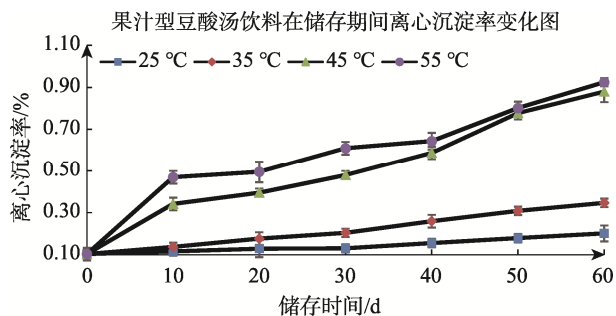


图 1 果汁型豆酸汤饮料在储存期间产品离心沉淀率(n=3)  
Fig.1 Centrifugal sediment rate of juice soysour soup beverage during storage (n=3)

### 3.1.2 吸光值变化

从图 2 可以看出: 在不同的储存温度条件下, 果汁型豆酸汤饮料的吸光度随储存时间的增加而递增; 在储存时间相同, 果汁型豆酸汤饮料吸光度值随温度上升而增加。表明果汁型豆酸汤饮料储存过程中的样品蛋白质或氨基酸与葡萄糖之间发生羰氨缩合的 Maillard 反应, 产生黄酮类物质, 导致样品颜色变深, 温度越高, 时间越长, 反应的产物浓度越高, 样品的颜色越深, 进而导致样品的吸光度增加。

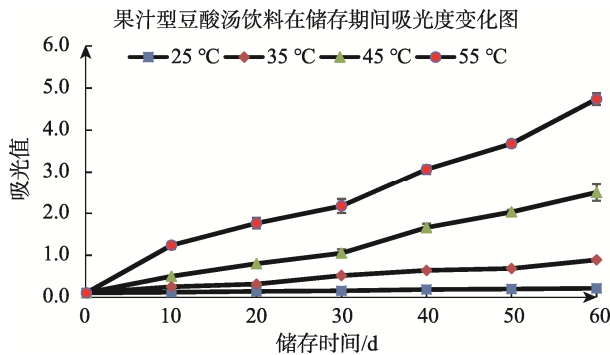


图 2 果汁型豆酸汤饮料在储存期间产品吸光度( $n=3$ )

Fig.2 Absorbance of juice soysour soup beverage during storage( $n=3$ )

### 3.1.3 粒径变化

从图 3 可以看出: 在不同的储存温度条件下, 果汁型豆酸汤饮料产品的粒径分布随温度和时间变化而变化, 产品的粒径分布在 1.2~2.4  $\mu\text{m}$  之间, 在同一温度下, 随贮藏时间延长而增大, 说明果汁型豆酸汤饮料贮藏过程中的样品离子发生聚合或聚集现象, 从而改变原有离子的粒径大小, 其原因是果汁型豆酸汤饮料中大分子物质为蛋白质、脂肪和碳水化合物, 在贮藏期间分子间的电荷及其势能发生变化而聚集<sup>[20]</sup>; 同理, 在相同的贮藏时间内, 样品的粒径随温度增加而增大。

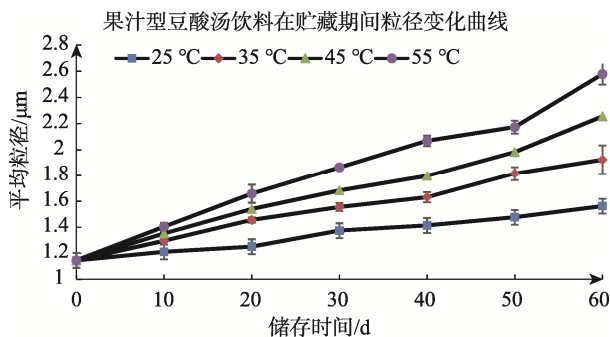


图 3 果汁型豆酸汤饮料在储存期间产品粒径( $n=3$ )

Fig.3 Particle size of juice soysour soup beverage during storage( $n=3$ )

### 3.1.4 感官值变化

从图 4 可以看出: 在不同的储存温度条件下, 果汁型

豆酸汤饮料的感官值随贮藏时间的增加而递增; 而在贮藏时间相同, 感官评价价值随贮藏温度升高而上升。表明果汁型豆酸汤饮料贮藏过程中的样品蛋白质或氨基酸与葡萄糖之间发生羰氨缩合的 Maillard 反应<sup>[21]</sup>, 产生黄酮类物质, 导致样品感官评价价值越高, 温度越高, 时间越长, 反应的产物浓度越高, 样品的感官影响越大, 进而导致样品的越大, 感官值越大, 样品的稳定性越差。

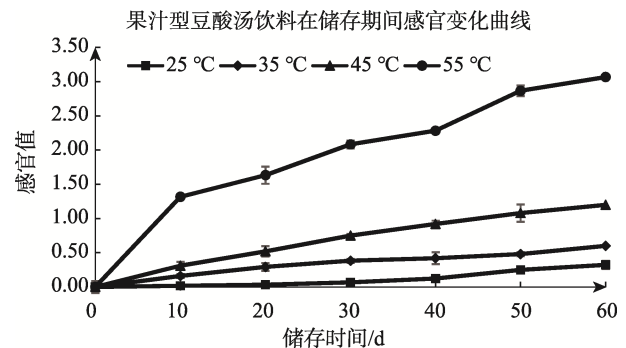


图 4 果汁型豆酸汤饮料在储存期间产品感官值( $n=3$ )

Fig.4 Sensory value of the juice soysour soup beverage during storage( $n=3$ )

## 3.2 在储存期间果汁型豆酸汤饮料理化参数变化的热力学和动力学

按照化学动力学反应级数的计算方法<sup>[22]</sup>, 计算果汁型豆酸汤饮料储存期间离心沉淀率、粒径、吸光度的反应级数, 符合一级反应化学动力学。用对不同温度下的离心沉淀率、粒径、吸光度的数据进行回归分析, 其指数方程拟和指数反应拟合程度, 指数越高, 拟合程度越好, 该拟合指数均大于 0.9, 反应拟合程度良好。对指数方程求导, 确定离心沉淀率、吸光度的反应速率常数, 见表 1。从表可以看出, 反应速率常数也随着温度的上升而加速。根据(7)式求出反应活化能。根据式(9)、(10)、(11)可计算反应的热力学参数 $\Delta H^*$ 、 $\Delta S^*$ 、 $\Delta G^*$ , 见表 3。

活化能 $E_a$ 表明化学反应需要的能量, 活化能越低, 化学反应越容易发生, 从表 3 可以看出, 离心沉淀率的活化能低, 体系中络合物容易产生, 从而导致沉淀发生, 离心沉淀率受温度影响较为明显; 焓变值( $\Delta H$ )为大于零, 表明反应为吸热过程, 温度越高, 越能促进络合物的形成, 体系的稳定性越差<sup>[22]</sup>。Gibbs 自由能表示反应物的能量和活化状态之间的变化, 在化学热力学中为判断过程进行的方向,  $\Delta G^*$ 随温度变化影响较小(78.44~82.36 kJ/mol), 故反应为非自发反应<sup>[23]</sup>。Gibbs 自由能 $\Delta G^*$ 随温度增加而递增, 所以将建立 Gibbs 自由能 $\Delta G^*$ 与温度回归函数, 表明化学反应与宏观物理变化之间的相关性关系。离心沉淀率的 Gibbs 自能与温度之间的回归方程, 其相关系数为 0.9743, 相关性良好, 参见表 4。

表 3 果汁型豆酸汤饮料动力学与热力学参数  
Table 3 Kinetics and thermodynamics parameters for juice soysour soup beverage during storage

理化参数	温度/°K	K/d <sup>-1</sup>	E <sub>a</sub> /(KJ/mol)	ΔH <sup>‡</sup> /(KJ/mol)	ΔS <sup>‡</sup> /(J/mol <sup>0</sup> K)	ΔG <sup>‡</sup> /(KJ/mol)
离心沉淀率	298.15	0.1124	22.73	20.26	-195.14	78.44
	308.15	0.1872	22.73	20.17	-193.65	79.85
	318.15	0.1992	22.73	20.09	-195.72	82.36
OD 值	298.15	0.1167	40.44	37.96	-135.45	78.34
	308.15	0.2560	40.44	37.87	-133.60	79.04
	318.15	0.3238	40.44	37.79	-136.04	81.07
粒径	298.15	0.0515	24.85	22.37	-194.54	80.37
	308.15	0.0767	24.85	22.29	-194.21	82.13
	318.15	0.0966	24.85	22.20	-195.09	84.27

表 4 果汁型豆酸汤饮料理化参数吉布斯自由能与温度的回归方程

Table 4 Regression equation of Gibbs free energy and temperature for physicochemical parameters for juice soysour soup beverage

理化参数	回归方程Δ G <sup>*</sup> (kJ/mol)=f(T)	r <sup>2</sup>	公式序号
离心沉淀率	Y = 0.196X + 19.821	0.9743	12
吸光度	Y = 0.1364X + 37.459	0.9267	13
粒径	Y = 0.195X + 22.179	0.9968	14

### 3.3 果汁型豆酸汤饮料物理化学指标和感官指标的关系

在储存期间, 果汁型豆酸汤饮料物理化学参数和感官值的相关性与回归方程, 见表 5。

### 3.4 果汁型豆酸汤饮料稳定性动力学模型

#### 3.4.1 预测果汁型豆酸汤饮料稳定性的动力学和热力学模型

通常判断饮料稳定性的标准是消费者的感官接受程度, 因此, 将感官评价作为果汁型豆酸汤饮料的稳定性变化标准。感官评价相关程度较高的理化参数—离心沉淀率、粒径、吸光度都可作为建立果汁型豆酸汤饮料稳定性动力学的模型指标。相关系数越高, 模型就越精确, 预测的结果接近实际值。从表 5 的数据可知, 果汁型豆酸汤饮料的离心沉淀率和感官评价的相关系数为 0.9846, 相关性最强, 所以, 将离心沉淀率作为样品的动力学和热力学模型指示值, 可获得果汁型豆酸汤饮料的动力学和热力学的稳定性模型如下:

$$SS = 0.2388 \left\{ CSR_0 \exp \left[ t \frac{k_b T}{h} \exp \frac{-(196 \times T + 19821)}{RT} \right] \right\} + 0.0985 \quad (18)$$

所以, 倘若初始的沉淀率, 就可用(18)式推测在温度下的稳定性时间, 由于储存温度超过 55 °C 时, 果汁型豆酸汤饮料发生迈拉德反应较为剧烈, 严重褐变现象, 说明超出

了上述模型的范围。所以模型适应温度范围 25~45 °C 之间。

#### 3.4.2 豆酸汤饮料稳定性预测模型的精确度评价

豆酸汤饮料的稳定性预测模型是否精确度, 或者模型是否可以预测产品的稳定性, 可通过模型的预测值和实际值之间的标准误差 ε 来检验。可用公式(19)来表示。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (19)$$

式中 ε—预测标准误差,  $\hat{y}_i$ —模型预测值,  $y_i$ —模型实测值, n—样本大小。

预测模型的残差变异系数 CV 表示预测模型标准差 ε 与平均实测值( $\bar{y}$ )的百分比值, 可用方程(20)来计算

$$CV = \frac{\varepsilon}{\bar{y}} \times 100\% \quad (20)$$

预测模型其残差变异系数 CV 小于 15%<sup>[77]</sup>, 则表明预测模型精确性符合要求。基于实验的实际值和模型预测值, 计算豆酸汤饮料的稳定性预测模型的残差变异系数 CV 详见表 6。

从表 6 数据可知, 样品的稳定性时间的观察为 60、90、120 d, 预测模型的残差变异系数 CV 平均值为 12.4% 小于 15%, 表明预测模型的精确度良好, 可以满足预测豆酸汤饮料的稳定性要求。

表 5 果汁型豆酸汤饮料物理化学参数和感官评价的相关性与回归方程

Table 5 Regression equation and correlativity on physicochemical parameters and sensory evaluation for juice soysour soup beverage

果汁型豆酸汤饮料	回归方程	相关系数 $r$	公式序号
感官值与离心沉淀率之间的关系	$SS = 0.2388CSR + 0.0985$	0.9846	15
感官值与 OD 值之间的关系	$SS = 0.2708A + 0.1052$	0.949	16
感官值与粒径之间的关系	$SS = 1.0032d + 1.1539$	0.9521	17

注: SS 表示感官值; CSR<sub>0</sub> 表示离心沉淀率; d 表示粒径; A 表示吸光度

表 6 果汁型豆酸汤饮料的稳定性预测模型的残差变异系数

Table 6 Residual coefficient of variation on stability prediction model for juice soysour soup beverage

模型	温度/ $^{\circ}K$	稳定时间观察值/d	稳定时间预测值/d	预测标准差	模型误差
豆酸汤饮料	298.15	120	135.27	11.1609	12.40%
	308.15	90	90.91		
	318.15	60	63.89		

## 4 结 论

通过果汁型豆酸汤饮料的动力学和热力学分析, 获得反应的活化能  $E_a$ 、焓  $\Delta H^*$ 、熵  $\Delta S^*$ 、吉布斯自由能  $\Delta G^*$ 。可知, 离心沉淀率的活化能  $E_a$  较低, 离心沉淀率受温度影响较大; 焓变值 ( $\Delta H$ ) 为大于零, 表明反应为吸热过程, 温度越高, 越能促进络合物的形成, 体系的稳定性越差; Gibbs 自由能  $\Delta G^*$  随温度变化影响较小, 表明反应为非自发反应。建立吉布斯自由能与理化参数之间回归方程, 且相关性系数超过 0.9743, 相关性良好; 感官值与离心沉淀率之间的回归方程, 且相关性系数超过 0.9846, 相关性良好。基于上述回归方程, 建立果汁型豆酸汤饮料的感官值与离心沉淀率、储存温度、储存时间之间的动力学和热力学数学模型, 以预测该产品的稳定性。经验证, 预测模型的残差变异系数  $CV$  平均值为 12.4% 小于 15%, 表明预测模型的精确度良好。

## 参考文献

- [1] 邹大维. 凯里红酸汤营养成分分析与研究[J]. 中国调味品, 2015, 40(5): 129-132.  
Zou DW. Analysis and research on nutrients in kaili red sour soup [J]. China Cond, 2105, 40(5): 129-132.
- [2] 石敏, 王美, 袁玮, 等. 凯里米酸汤饮料工艺研究[J]. 凯里学院学报, 2016, 34(3): 119-122.  
Shi M, Wang M, Yuan W, et al. Study on processing technique of kaili rice sour soup [J]. J Kaili Univ, 2016, 34(3): 119-122.
- [3] 曹旭鸿. 苗族白酸汤饮料的开发[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.  
Cao XH. Study on the drink of miao nationality white sour soup [D]. Ya'an: Sichuan Agriculture University, 2014.
- [4] 李健, 吕博, 刘宁, 等. HPLC 法测定豆腐黄浆水中有机酸质量浓度[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2014, 30(1): 29-32, 40.  
Li J, Lv B, Liu N, et al. Determination of organic acids in wastewater of tofu by RP-HPLC [J]. J Harbin Univ Commer (Nat Sci Ed), 2014, 30(1): 29-32, 40.
- [5] Ounis WB, Champagne CP, Makhoul J, et al. Utilization of tofu whey pre-treated by electromembrane process as a growth medium for Lactobacillus plantarum LB17 [J]. Desalination, 2008, 229(1-3): 192-203.
- [6] 王欣欣. 利用黄浆水制备富含昔元型大豆异黄酮发酵乳的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
Wang XX. Study on production of soybean whey-yogurt rich with isoflavone aglycones [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [7] 李丽梅, 刘霞, 李喜宏, 等. 黄浆水红枣复合饮料的研制及其稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(2): 74-77.  
Li LM, Liu X, Li XH, et al. The development of yellow slurry water and red jujube compound beverage and its stability study [J]. Food Res Dev, 2017, 38(2): 74-77.
- [8] Tripathi MK, Mangaraj S, Giri SK, et al. Process development for utilization of fermented tofu whey as a source of tofu coagulant and antioxidants [J]. Int J Agric Eng, 2012, (2012): 296-303.
- [9] Narayanan KRA, Kumar A, Patil GR. Kinetics of various deteriorative changes during storage of uht soy beverage and development of a shelf-life prediction model [J]. LWT-Food Sci Technol, 1993, 26(3): 190-197.
- [10] Rustom IYS, López-Leiva MM, Nair BM. UH-sterilized peanut beverages: Kinetics of physicochemical changes during storage and shelf-life prediction modeling [J]. J Food Sci, 2006, 61(1): 198-203.
- [11] Al-Kadamany E, Toufeili I, Khattar M, et al. Determination of shelf life of concentrated yogurt (labneh) produced by in-bag straining of set yogurt using hazard analysis [J]. J Dairy Sci, 2002, 85(5): 1030-1030.
- [12] 丁保森, 覃瑞, 熊海容, 等. 植物蛋白饮料及其稳定性的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(1): 152-157.  
Ding BM, Qin R, Xiong HY, et al. Research progress on plant protein beverages and their stability [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(1): 152-157.

- [13] 胡爱华. 酥油茶饮料的开发及其货架期研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.  
Hu AH. Research on the preparation and shelf life of Yak butter-tea [D]. Ya'an: Sichuan Agriculture University, 2016.
- [14] 郑秀丽. 青梅汁饮料的研制及其稳定性研究[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(3): 60-63.  
Zheng XL. Research on the processing technology and its stability of green plum beverage [J]. Food Ferment Technol, 2015, 51(3): 60-63.
- [15] 张立永, 生庆海, 陈平, 等. 酸乳饮料稳定性预测模型的研究[J]. 核农学报, 2008, 22(4): 464-468.  
Zhang LY, Sheng QH, Chen P, *et al.* Research on the stability prediction model of acidified milk drinks [J]. J Nucl Agric Sci, 2008, 22(4): 464-468.
- [16] 王晓焯. 植物蛋白饮料稳定性及稳定性预测模型的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2009.  
Wang XH. Study on the stability and the stability prediction model of vegetable protein beverage [D]. Tianjin: Tianjin University Science and Technology, 2009.
- [17] Fennema. 食品化学: 第三版[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.  
Fennema. Food chemical: third edition [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003.
- [18] Labuza TP. Enthalpy/entropy compensation in food reactions [J]. Food Technol, 1980, 34(2): 67-77.
- [19] Atkins PW. Molecular reaction dynamics, in physical chemistry [M]. England: Oxford University Press, 1986.
- [20] 傅献彩. 物理化学(第四版)上册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.  
Fu XC. Physical chemical(forth edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [21] 吴周山, 陆利霞, 熊晓辉, 等. 糖基化反应改善植物蛋白乳浊液稳定性的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(14): 336-341.  
Wu ZS, Lu LX, Xiong XH, *et al.* Research progress of glycosylation reaction to improve plant protein emulsion stability [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(14): 336-341.
- [22] Peron DV, Fraga S, Antelo F. Thermal degradation kinetics of anthocyanins extracted from juçara (*Euterpe edulis Martius*) and "Italia" grapes (*Vitis vinifera* L.), and the effect of heating on the antioxidant capacity [J]. Food Chemistry, 2017, 237: 1237
- [23] Mercali GD, Jaeschke, Débora P, *et al.* Degradation kinetics of anthocyanins in acerola pulp: Comparison between ohmic and conventional heat treatment [J]. Food Chem, 2013, 136(2): 853-857

(责任编辑: 韩晓红)

### 作者简介



李明, 硕士, 主要研究方向为果蔬清洁加工。  
E-mail: richardlipqc2@126.com



赵良忠, 教授, 主要研究方向为食品科学技术。  
E-mail: sys169@163.com