

文章编号: 1673 1689(2011)01-0032-05

# 芒果浓缩汁的流变学特性

许学勤, 朱巧力, 徐莹秋

(江南大学食品学院, 江苏 无锡 214222)

**摘要:** 研究了不同质量分数的芒果浓缩汁在不同温度下的流变学特性。回归分析发现, 在研究的温度和质量分数范围内, 芒果浓缩汁表现为 Herschel-Bulkley 流体, 温度对黏度的影响可用阿伦尼乌兹方程表示, 质量分数对黏度的影响可用幂函数表示, 推导出了温度和质量分数对浓缩芒果汁黏度综合影响的方程。随着芒果浓缩汁质量分数的提高, 体系的静态屈服应力值也增大。

**关键词:** 浓缩芒果汁; 流变学特性; 黏度; 静态屈服应力; 稳定性

中图分类号: TS 205

文献标识码: A

## The Rheological Properties of Mango Concentrates

XU Xue qing, ZHU Qiao li, XU Ying qiu

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The manuscript studied that rheological properties of concentrated mango juice at different temperatures and different concentrations. By regression analysis, within the corresponding range of temperature and concentration, it is found that concentrated mango juice was Herschel-Bulkley fluid. The effect of temperature on concentrated mango juice viscosity could be described by Arrhenius equation. On the other hand, the effect of concentration on concentrated mango juice viscosity could be identified by a Power Index type equation. A combinational equation describing effects of both temperature and concentration on the viscosity of concentrated mango juice was suggested. With the increase in the concentration of mango juice concentrate, the static yield stress value of the juice also increased.

**Key words:** concentrated mango juice, rheological property, viscosity, static yield stress, cloud stability

芒果集热带果品之精华于一身, 汁多味浓, 酸甜适度, 清香可口<sup>[1]</sup>, 被誉为“热带水果之王”。芒果深受人们喜爱, 也是我国南方地区的著名水果。芒果汁是重要的芒果加工产品, 具有巨大的开发潜力。在实际生产中, 为了储藏和运输的需要, 常将

芒果原汁或原浆浓缩成高质量分数的芒果浓缩汁。在浓缩以及后续加工过程中, 均涉及到果汁体系的流变学特性。研究食品流变学特性有助于更好地了解食品的组成、内部结构、分子形态等, 为食品配方、加工工艺设计、设备选型、质量检测等提供

收稿日期: 2010-01-22

基金项目: 广东省产学研研究项目(2007B090100009)。

作者简介: 许学勤(1958-), 男, 浙江海宁人, 工学博士, 副教授, 主要从事食品加工技术研究。

Email: X\_Xueqin@163.com

依据<sup>[2]</sup>。

一些果蔬浓缩汁的流变行为已经受到研究<sup>[3-5]</sup>, 而对于芒果浓缩汁的流变特性目前研究较少, 关于温度和质量分数对浓缩汁流变学模型参数的影响也未见报道。作者拟对芒果浓缩汁的流变行为以及温度和质量分数对流变特性影响进行初步探讨。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品制备

成熟芒果经酶解过滤后, 采用真空旋转蒸发对汁液进行浓缩, 灭菌后 4 °C 保存。

### 1.2 流变性质的测定

采用 AR1000 型流变仪(英国 TA 公司产品), 选择直径为 40 mm、不锈钢平行板测量系统。

**1.2.1 静态流变性质** 流变特性测定: 平行板间距为 1 mm, 剪切速率为 1~200 s<sup>-1</sup>, 测定不同温度和质量分数芒果浓缩汁的剪切应力随剪切速率的关系; 触变性测定: 平行板间距为 1 mm, 20 °C 下测定不同质量分数芒果浓缩汁的剪切应力随剪切速率的变化, 剪切速率从 1 s<sup>-1</sup> 增加到 200 s<sup>-1</sup>, 再从 200 s<sup>-1</sup> 减小到 1 s<sup>-1</sup>, 完成一次循环。

**1.2.2 动态流变性质** 平行板间距为 1 mm, 20 °C 下在线性粘弹区范围内, 固定一振荡应力, 测定芒果浓缩汁的储能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  随振荡频率的变化, 振荡频率的变化范围为 0.1~10 Hz。

### 1.3 数据处理

用 SAS 软件对所得数据进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流变特性曲线

温度为 20 °C 下不同质量分数芒果浓缩汁的流变行为曲线如图 1 所示, 可以看出, 它们均呈现典型的屈服—假塑性流体特性行为。因此, 这些曲线可采用 Herschel-Bulkley 模型(H-B 模型)进行拟合。得到的拟合参数见表 1。显然, 除质量分数最低的 32% 以外, 其他实验曲线拟合的相关系数均在 0.98 以上, 说明这 H-B 模型比较适用于描述芒果浓缩汁体系。研究者发现, 一些不含果胶的浓缩果汁表现为牛顿流体, 例如浓缩葡萄汁<sup>[3]</sup>; 而含果胶的果汁表现则表现为假塑性流体<sup>[6]</sup>, 例如浓缩柑橘汁<sup>[4]</sup>和浓缩蓝莓汁<sup>[5]</sup>, 而既含果胶又含果肉颗粒或其他大分子物质的浓缩体系, 会表现出 H-B 体流变行为, 如含有较多淀粉质的香蕉浆料<sup>[7]</sup>以及含有果肉颗粒的番茄浆<sup>[8]</sup>也都属于这种流变体系。

芒果浓缩汁中不仅保留了部分较大分子量的果胶物质, 而且还存在大量果肉颗粒。这些大分子相互聚集形成的网状结构, 使得体系具有屈服应力, 所有这些因素是芒果浓缩汁表现为 H-B 型流体的主要原因。

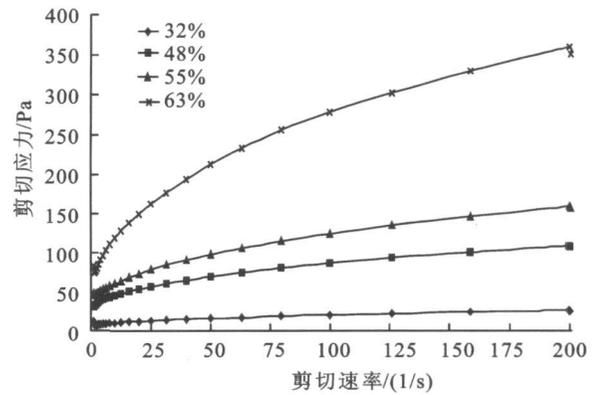


图 1 不同质量分数芒果浓缩汁剪切应力随剪切速率的变化曲线

Fig. 1 Shear stress shear rate curve of mango juice with different concentrations

表 1 不同质量分数芒果浓缩汁 H-B 模型拟合参数  
Tab. 1 H-B model fitting parameters of mango juice with different concentrations

质量分数/ %	屈服应力/ Pa	稠度指数 $K/(Pa \cdot s^n)$	流动习性 指数 $n$	$R^2$
32	7.0	4.10	0.30	0.8253
48	22.3	8.62	0.44	0.9972
55	33.8	9.39	0.48	0.9863
63	39.4	29.60	0.45	0.9853

由表 1 可见, 流动习性指数  $n$  值大致随着质量分数的升高而升高。 $n$  值大小代表了体系剪切变稀的难易程度, 也即假塑性程度的大小,  $n$  值越大, 剪切越不易变稀, 假塑性程度越小; 反之亦然<sup>[9]</sup>。从图 1 和表 1 中还可以看出各曲线均存在屈服应力, 屈服应力大小随质量分数的升高而增大。这证实了芒果浓缩汁中, 大分子和大分子物质相互缠结, 颗粒与颗粒相互聚集, 颗粒和大分子之间相互作用, 形成了一种弱的三维网状结构, 使悬浮体系保持浑浊。破坏这种结构需要克服屈服应力, 而且随着质量分数的增加, 各物质间的相互作用增大, 形成三维网络结构的致密程度增加, 网络结构强度增强, 因此所需克服的屈服应力就越大。屈服应力的存在使芒果浓缩汁在贮藏期间具有良好的浑浊稳定性, 不易分层和沉淀。

### 2.2 触变性研究

不同质量分数芒果浓缩汁的触变性实验结果

如图2所示。可以看出,除质量分数最低的(32%)浓缩汁以外,其他质量分数样品均表现有触变环存在,并且触变环的面积随试样质量分数升高而增大。质量分数为32%的浓缩汁样品没有出现触变环,说明低质量分数下的芒果浓缩汁黏度(黏度与剪切应力成正比关系)在去除外加应力后可以迅速恢复,是与时间无关的非牛顿流体。触变环的出现说明当外加应力去除后,浓缩汁的黏度不能瞬间恢复,产生了一定的时间依赖性。芒果浓缩汁随着质量分数增加,其流变行为从时间无关转变成与时间相关,且受时间影响的大小与质量分数呈正相关行为的现象,估计与其中所含的大分子果胶物质和果肉颗粒在受力作用下的取向及外力消除后的取向消失能力有关。质量分数越大,取向消失能力越小,从而表现的触变环面积越大。

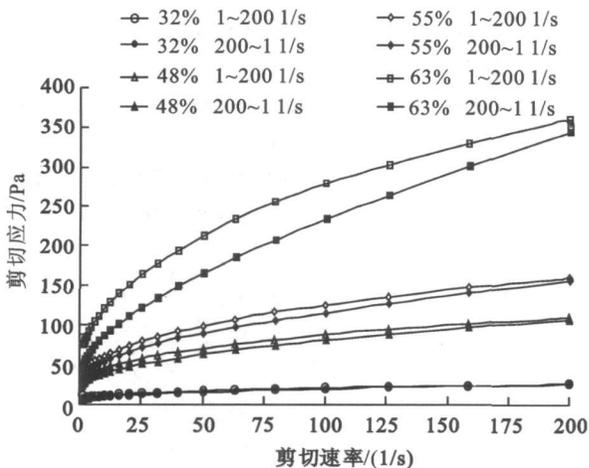


图2 不同质量分数芒果浓缩汁的触变性实验曲线  
Fig. 2 Thixotropy experimental curve of mango juices with different concentration

2.3 动态流变学性质

由图3可见,芒果浓缩汁的贮能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  均随质量分数的升高而增加,而且,体系均表现出  $G' > G''$ ,反映了芒果浓缩汁弱凝胶的特性<sup>[10]</sup>。另外,各样品  $G'$  和  $G''$  的差值虽然也随着质量分数的升高而扩大,但一定频率下它们之间的比值却基本保持不变。大部分食品体系或生物大分子溶液,一般都表现出一定程度的粘弹性行为<sup>[11]</sup>。Sharoba<sup>[12]</sup> 等人在研究转基因草莓汁的流变学性质时认为,  $G' > G''$  的体系说明其中存在着较多有弹性或固体性质的物质,如果胶类物质。Ashkan Madadlou<sup>[13]</sup> 在研究伊朗白奶酪质构时发现,  $G'$  值可以反映出体系的硬度,并且不同化学成分对质构的影响也不同,脂肪和水分合会使得奶酪的质构柔软,而当水分含量降低,蛋白质含量升高时,奶酪则

变得坚硬。由此推断,在芒果浓缩汁体系中,  $G'$  代表的是果胶、蛋白质等物质表现的弹性行为,而  $G''$  代表了糖类等小分子溶质表现的粘性行为。 $G'$  和  $G''$  分别随着质量分数的升高而提高,是这些物质对粘弹性绝对贡献程度增加的反映。而  $G'/G''$  比值不随质量分数变化,则由于小分子物质一般不因浓缩而发生结构变化,从而可以说明代表芒果浓缩汁弹性成分的大分子物质(如果胶和蛋白质等)结构也没有因为浓缩而受到影响。

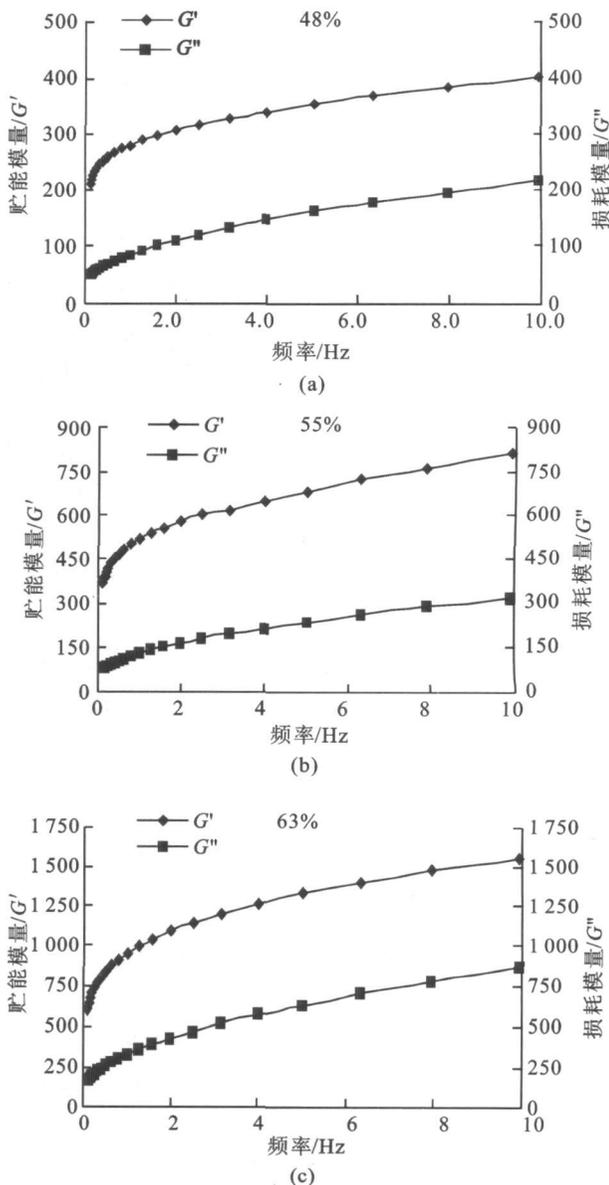


图3 不同质量分数对芒果浓缩汁  $G'$  和  $G''$  的影响  
Fig. 3 Effects of Mango juice with different concentrations on  $G'$  and  $G''$

2.4 温度、质量分数对芒果浓缩汁黏度的影响

2.4.1 温度对芒果浓缩汁黏度的影响 图4为芒果浓缩汁在不同质量分数下黏度随温度的变化规律。图中可以看出,随着温度的上升,黏度逐渐下

降。出现这种现象的主要原因是, 由于浓缩汁温度的升高, 使得果汁体系的分子热运动加剧, 分子间距离增大, 分子间作用力减弱, 从而导致流动时摩擦减小, 黏度降低<sup>[2]</sup>。并且其下降速度与质量分数及温度的大小有关。

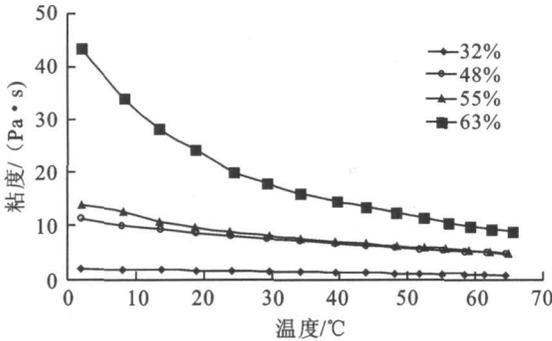


图 4 不同质量分数芒果浓缩汁其黏度随温度的变化  
Fig. 4 Viscosity of mango juice with different concentrations changes with temperature

黏度随温度变化可以用阿伦尼乌斯方程描述。

$$\eta = \eta_0 \exp(Ea/RT) \quad (1)$$

式中,  $\eta_0$  为黏度常数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),  $Ea$  为活化能 ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $R$  为摩尔气体常数 ( $8.3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $T$  为绝对温度 ( $\text{K}$ )。对图 4 所示曲线用阿伦尼乌斯方程进行回归, 得到的表示不同质量分数芒果浓缩汁黏度-温度关系的  $\eta_0$  和  $Ea$  值如表 2 所示。表中的相关系数  $R^2$  均大于 0.95, 说明理论与实测值具有较好的一致性, 因而所求得各回归方程可用于预测芒果浓缩汁在相应条件下的黏度随温度的变化。

表 2 不同质量分数芒果浓缩汁阿伦尼乌斯方程参数值  
Tab. 2 Arrhenius equation parameters of mango juice with different concentrations

质量分数/%	$\eta_0 / \text{Pa}$	$Ea / (\text{kJ}/\text{k}^* \cdot \text{mol})$	$R^2$
32	0.01	11.69	0.955 4
48	0.08	11.89	0.998 2
55	0.05	12.62	0.995 9
63	0.01	18.74	0.992 7

从表 2 中可以看出, 随着样品质量分数的升高, 流体的活化能增加, 这是导致温度对黏度影响增大的主要原因。流动活化能  $Ea$  随质量分数的升高而增大, 说明随芒果浓缩汁的质量分数增大, 温度对黏度影响越强烈。

2.4.2 质量分数对芒果浓缩汁黏度的影响 质量分数对黏度的影响可有两种数学模型描述, 即幂函数模型:

$$\eta = K(C^A) \quad (2)$$

以及指数函数:

$$\eta = K \exp(AC) \quad (3)$$

式中  $\eta$  为黏度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),  $C$  为质量分数 / %,  $K, A$  均为常数。

分别用两式对芒果浓缩汁的黏度值回归分析, 结果如表 3 所示。由表 3 可见, 除温度 20 °C 外, 两种模型在各温度下均有较高的回归相关系数, 说明这两种模型都可用来描述质量分数对芒果浓缩汁黏度的影响。比较各  $R^2$  还可以发现, 尽管两种模型的回归相关系数较接近, 但幂函数模型的  $R^2$  值均大于指数模型的  $R^2$ , 因而推测幂函数会更适合于用来描述芒果浓缩汁黏度与质量分数的关系。

表 3 不同温度下质量分数与黏度的两种模型参数

Tab. 3 Two model parameters of Concentration and viscosity at different temperatures

温度/°C	模型	$K$	$A$	$R^2$
20	(2)	0.08	0.85	0.926 9
	(3)	1.20	0.04	0.913 5
30	(2)	0.07	0.89	0.960 9
	(3)	1.13	0.04	0.951 0
40	(2)	0.03	1.05	0.988 6
	(3)	0.87	0.04	0.981 6
50	(2)	0.02	1.23	0.994 4
	(3)	0.70	0.04	0.991 0
60	(2)	0.01	1.34	0.989 5
	(3)	0.63	0.04	0.987 2

2.4.3 温度与质量分数对芒果浓缩汁黏度的综合影响 在分别分析温度和质量分数对芒果浓缩汁黏度影响的基础上, 建立温度和质量分数对芒果浓缩汁综合影响数学模型, 将允许人们根据某一温度和质量分数来预测对应的芒果浓缩汁的黏度值。这种综合影响模型也可有两种型式, 一种由式(1)与(2)结合得到:

$$\eta = K_1 \exp(Ea/RT) \cdot C^A \quad (4)$$

另一种由式(1)与(3)结合得到:

$$\eta = K_2 \exp[Ea/(RT) + AC] \quad (5)$$

利用数据处理软件, 分别利用上二式对测定的黏度数据进行回归, 结果如表 4 所示。

由表 4 可见, 模型(4)、(5)的相关系数均达到 0.9 以上, 说明两方程均可较好地反映温度、质量分数对芒果浓缩汁黏度的综合影响。

表4 温度、质量分数对芒果浓缩汁黏度影响的综合模型拟合结果

Tab. 4 The results of a comprehensive model fitting including Temperature, concentration, viscosity of the mango juice concentrate

模型	$K$	$Ea$	$A$	$R^2$
(4)	1.6E-06	13.04	2.63	0.9138
(5)	4.2E-03	13.09	0.05	0.9311

表面上看,这一结论与前面得出的幂函数较适合描述质量分数对浓缩芒果汁黏度影响的结论有出入,但考虑(2)和(3)式的回归相关系数之间的差异实际上很小(见表3),再加上与温度效应综合起来进行拟合,这两种描述质量分数效应的模型所表现出现的结果,应该可以理解。

### 3 结 语

在一定的温度和质量分数范围内,浓缩芒果汁

### 参考文献(References):

- [1] 宋淑运. 热带水果之王- 芒果[J]. 美食, 2006, (1): 22.  
SONG Chur yun. The king of tropical fruits- Mango[J]. **Mango**, 2006, (1): 22.
- [2] 陈克复. 食品流变学及其测量[M]. 北京: 轻工业出版社, 1989. 12.
- [3] 包海蓉, 陈必文, 邬瀛洲. 浓缩葡萄汁流变特性研究[J]. 食品科学, 2004, 25(10): 70- 72.  
BAO Hai rong, CHEN Bi wen, WU Yir zhou. Study on the rheological properties of concentrated grape juice[J]. **Food Science**, 2004, 25(10): 70- 72.
- [4] 王昭, 李云康, 潘思秩. 浓缩柑橘汁流变特性研究[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 99- 102.  
WANG Zhao, LI Yun kang, PAN Si zhi. Rheological property of concentrated orange juice[J]. **Food Science**, 2006, 27(12): 99- 102.
- [5] Cepeda E, Hermosa M, Llorens. Rheological behaviour of blueberry cloudy juice (*Vaccinium corymbosum* L.) [J]. **J of Food Science and Technology**, 2002, 37, 271- 276.
- [6] 路福绥. 果汁的流变特性研究[J]. 食品工业科技. 1999. 20(2): 12- 13.  
LU fu sui. Study on the rheological properties of fruit juice[J]. **Science and technology of food industry**, 1999. 20(2): 12- 13.
- [7] 段翰英, 李爱军, 李远志. 香蕉浆料流变学性质的研究[J]. 食品科学. 2004, 25(4): 62- 64.  
DUAN Han ying, LI Ai jun, LI Yuan zhi. The study of rheology properties of banana jam[J]. **Food Science**, 2004, 25(4): 62- 64.
- [8] Sharma S K, LeMaguer M. Effect of composition on the rheological properties of tomato thin pulp[J]. **Food Research International**, 1996. 29(2): 175- 179.
- [9] 罗昌荣, 麻建国, 许时婴. 番茄浆料流变特性研究. [J]. 食品科学, 2001, 22(7): 28- 32.  
LUO Chang rong, MA Jian guo, XU Shi ying. Study on rheological properties of tomato purees[J]. **Food Science**, 2001, 22(7): 28- 32.
- [10] Tonon R V, Alexandre D, Hubinger M D. Steady and dynamic shear rheological properties of acai pulp (*Euterpe oleracea* Mart.) [J]. **J of Food Engineering**, 2009. 1- 7.
- [11] 罗昌荣, 麻建国, 许时婴. 破碎温度对番茄浆流变性质与果胶分子结构的影响[J]. 无锡轻工大学学报(食品与生物技术学报), 2001, 20(4): 363- 367.  
LUO Chang rong, MA Jian guo, XU Shi ying. Effect of breaking temperature on the rheological properties and pectin molecular structure of tomato pulp[J]. **Journal of Wuxi University of Light Industry (Journal of Food Science and Biotechnology)**, 2001, 20(4): 363- 367.
- [12] Sesmero R, Mitchell J R, Mercado J A. Rheological characterisation of juices obtained from transgenic pectate lyase- silenced strawberry fruits[J]. **J of Food Chemistry**, 2009, 116: 426- 432.
- [13] Ashkan Madadlou, Asghar Khosrow shahi. The influence of brine concentration on chemical composition and texture of Iranian White cheese[J]. **Journal of Food Engineering**, 2007, 81: 330- 335.

表现为 Herschel-Bulkley 流体, 并且具有触变性。由于存在屈服应力, 使芒果浓缩汁在贮藏期间具有良好的浑浊稳定性, 不会分层和沉淀。

随着质量分数的升高, 浓缩芒果汁的黏度降低, 随着其质量分数的增大, 其黏度也逐渐增加, 在质量分数一定的条件下, 温度对其黏度的影响可用阿伦尼乌兹方程表示; 在温度一定的条件下, 质量分数对其黏度的影响可用幂函数表示。

在温度 20~ 60 °C 和质量分数为 32% ~ 65% 范围, 温度和质量分数对浓缩芒果汁黏度的综合影响可用  $\eta = K^{-1} \exp(Ea/RT) \cdot C^A$  或  $\eta = K \exp(Ea/RT + AC)$  式描述。所建立的方程模型可用于预测浓缩芒果汁的黏度, 为芒果汁的加工和运输提供理论参考。