

金佛手浓缩汁的流变特性研究

乔叶宁¹, 吕文平^{*1,2}, 王洪新^{1,2,3}

(1.江南大学 食品学院,江苏 无锡 214000;2. 国家功能食品技术研究中心,江苏 无锡 214000;3. 食品科学与技术国家重点实验室,江南大学,江苏 无锡 214000)

摘要: 使用 MCR-301 流变仪探究了金佛手原汁及不同质量分数的真空浓缩汁于一定温度和一定剪切速率范围内的流变特性。结果表明:佛手汁与其他不含果胶的果汁一样,在一定温度、质量分数范围内属于牛顿流体;通过回归分析,发现温度对金佛手汁的黏度影响可用阿伦尼乌斯指数方程表示,质量分数对黏度的影响用指数函数表示较好,并推导出温度和质量分数对黏度综合影响的数据模型,用于指导生产。

关键词: 佛手汁;流变特性;牛顿流体;黏度

中图分类号:TS 255.44 文章编号:1673-1689(2019)08-0142-06 DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.08.020

Rheological Behavior Research of Jinhua Fingered Citron Juice

QIAO Yening¹, LÜ Wenping^{*1,2}, WANG Hongxin^{1,2,3}

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China; 2. National Engineering Research Center for Functional Food, Jiangnan University, Wuxi 214000, China; 3. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China)

Abstract: The present study, the rheological properties of fingered citron juice were detected using MCR-301 Rheometer in original and different concentrated juice with defined temperature and shear rate. In our results, both original and concentrated juice behaved like other non-containing pectin juices which were classified into Newtonian fluid at defined concentration, temperature and shear rate. Through regression analysis, the effect of temperature on juice viscosity were expressed by the Arrhenius equation while the exponential function expressed the effects of concentration on viscosity was better, comparing to power function. In addition, the comprehensive effect of temperature and concentration on viscosity has been deduced with the data model. The results can direct the production.

Keywords: fingered citron juice, rheological properties, newton fluid, viscosity

佛手 (*Citrus medica* L, Var. *Sacodactylis* (Noot) Swingle) 为芸香科柑橘属植物, 俗称五指柑, 具有特

殊的怡人香气^[1]。佛手果可理肝暖胃^[2], 含有挥发油、黄酮类等^[3]活性物质。主要分布在我国南方, 其中浙

收稿日期: 2017-07-31

基金项目: “金华佛手资源综合深度利用开发研究”横向项目。

* 通信作者: 吕文平 (1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事食品营养与功能因子研究。E-mail: lwpxy@163.com

引用本文: 乔叶宁, 吕文平, 王洪新. 金佛手浓缩汁的流变特性研究[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(08): 142-147.

江金华的金佛手以其富含维生素 C、钙,挥发油尤负盛名^[4]。

金佛手果季节性强,耐贮性差,将金佛手加工成果汁以及浓缩汁不仅提升佛手相关产品的品质,增加附加值,而且延长贮藏期,也可以拓展销售市场,让更多的人享受金佛手的风味^[5]。浓缩果汁的可溶性固形物一般是原汁 6~7 倍,高质量分数的浓缩汁不仅降低贮运成本,而且可抑制有害菌的繁殖,也更方便与其他饮料和酒类调配^[6]。

流变特性可为浓缩果汁生产提供参考^[7-9],有助于传热及蒸发等设备的设计和选型,还可通过控制黏度来改善果汁的口感。目前,国内外学者对很多种类果蔬汁的流变特性进行研究,主要包括流体类型,加工方式和添加剂对流变特性的影响^[10-13]。但没有关于金佛手浓缩汁流变性质的研究。本文对金佛手汁流变特性的研究意义在于为品控和设备选型提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

佛手原汁(9°Brix):浙江金佛手有限公司。

1.2 实验主要仪器

LB80 手持糖度仪,广州铭睿公司;BPH-210pH 计,贝尔仪器公司;MCR-301 高级流变仪,奥地利安东帕公司;BC-W501 旋转蒸发仪,上海贝凯化工设备公司。

1.3 实验方法

1)金佛手原汁理化指标测定:质量分数测定选用折光计法。pH 值测定采用 pH 计直接测定。总糖测定选用《GB 5009.7—2016 食品安全国家标准》中的直接滴定法。总黄酮测定选用《GB/T 12143—2008 饮料通用分析方法》中的分光光度法。

2)金佛手浓缩汁制备:选择真空浓缩法,将旋转蒸发仪的温度设置为 50℃,压力设置为-0.01 MPa,转速设置为 50 r/min,对金佛手原汁进行浓缩,得到 20~70°Brix 的浓缩汁,低温保存。

3)流体类型确定:流变仪剪切速率的范围选择为 0.01~1 000 s⁻¹,夹具选用 PP50,用吸管分别吸取不同质量分数的浓缩汁约 1.5 mL 置于不同温度(20、30、40、50、60 和 70℃)的夹板上,每个质量分数平行测定 3 次,得到不同质量分数的浓缩汁在不同温度下的流变特性曲线。

4)温度、质量分数对黏度的影响研究:将旋转流变仪的温度分别设置为 20、30、40、50、60 和 70℃,剪切速率设置为 100 s⁻¹,夹具选用 PP50,用吸管分别吸取不同质量分数的浓缩汁约 1.5 mL 置于夹板上,每个质量分数的浓缩汁平行测定 3 次。

1.4 数据分析方法

采用 EXCEL2007 进行数据分析。

2 材料与方法

2.1 金佛手原汁的理化指标

金佛手原汁的理化指标如表 1 所示。

表 1 金佛手原汁的理化指标

Table 1 Physical and chemical indicators of Jinhua fingered citron original juice

理化指标	含量
质量分数/%	9 ±0.1
pH 值	4.60±0.01
总糖/(g/100 g)	7.07±0.01
总黄酮/(mg/100 g)	18.72±0.01

2.2 金佛手汁的流变特性

2.2.1 金佛手汁流变类型的确定 结合流体的流变学、力学原理^[14-15],若流体的流动曲线拟合方程与方程 $\tau=\eta\dot{\gamma}$ 的拟合度较高,则该流体为牛顿流体,其流动曲线为一条过原点的直线,如水、汽油;若偏离这一曲线,则为非牛顿流体,例如含果胶的浓缩汁^[16]。金佛手汁在不同温度下的流变曲线及线性函数拟合情况,如图 1~3 所示。

结合图 1~3 可知,金佛手汁流动曲线的线性拟合方程均为过原点的方程,且 $R^2>0.9$,与牛顿流体的流动曲线拟合较好,故佛手汁为牛顿流体。

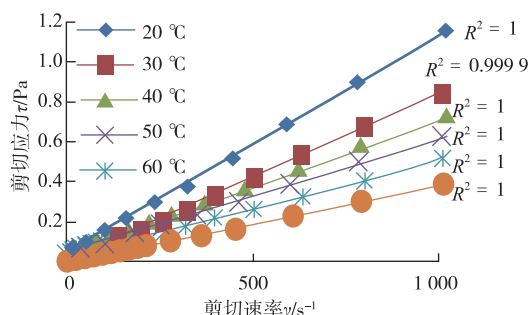


图 1 9°Brix 的金佛手汁的流变曲线

Fig. 1 Rheograms of Jinhua fingered citron juice of 9°Brix

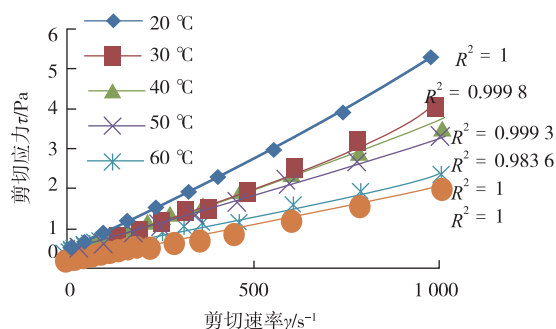


图2 40 °Brix的金佛手汁的流变曲线

Fig. 2 Rheograms of Jinhua fingered citron juice of 40 ° Brix

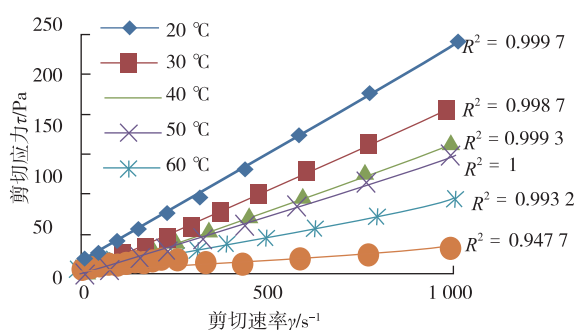


图3 70 °Brix的金佛手汁的流变曲线

Fig. 3 Rheograms of Jinhua fingered citron juice of 70 ° Brix

2.2.2 不同质量分数金佛手汁温度与黏度的关系
在剪切速率固定为 100 s^{-1} 时,得到不同质量分数的金佛手汁的黏度随温度变化的曲线,如图4所示。

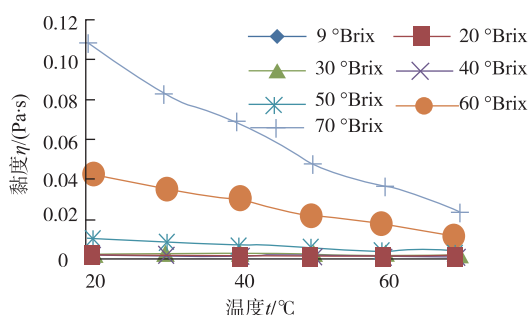


图4 不同温度和质量分数下金佛手汁的黏度

Fig. 4 Viscosity of Jinhua fingered citron juice at different temperature and concentration

由图4可知,在研究的质量分数范围内,温度升高,黏度下降,即温度与黏度呈反向变化。且质量分数越高,反向变化的程度越大;反之亦然。例如,温度由20上升到70 °C,9%金佛手汁黏度值下降了 $2.15 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;30%金佛手汁黏度值下降了 $8.23 \times$

$10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;50%金佛手汁黏度值下降了 $1.088 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。关于这种现象,主要有两种解释:一是温度升高,热胀冷缩使一定体积果汁内分子数量减小,导致黏度减小;二是温度升高,果汁内分子运动会变得剧烈,使间距变大,摩擦变轻,导致黏度下降^[17]。

研究显示,可用阿伦尼乌斯指数方程^[18] (Arrhenius equation)表示温度与黏度的关系

$$\eta = k_0 \exp(Ea/RT) \quad (1)$$

式中: η 为表观黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; k_0 为频率因子(常数); Ea 为流动活化能, J/mol ; R 为气体常数 ($8.315 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$); T 为绝对温度, K ($T = 273.15 + t \text{ } ^\circ\text{C}$)。

式(1)可以转化为 $\ln \eta = Ea/(RT) + \ln k_0$

取用 $\ln \eta$ 与 $1/T$ 的关系,分析线性和拟合情况, $\ln \eta$ 由 y 取代, $1/T$ 由 x 取代,如表2所示。

表2 金佛手汁 $\ln \eta$ 与 $1/T$ 的线性拟合Table 2 Liner fitting of $\ln \eta$ and $1/T$ of Jinhua fingered citron juice

质量分数/%	线性方程	R^2
9	$y = 465.8x - 8.443$	0.990
20	$y = 604.7x - 8.526$	0.961
30	$y = 771.3x - 8.637$	0.966
40	$y = 971.2x - 8.658$	0.962
50	$y = 1287x - 8.747$	0.988
60	$y = 1743x - 9.03$	0.987
70	$y = 2042x - 9.135$	0.989

由表2可知,在研究的质量分数范围内, $R^2 > 0.96$,所选择的阿伦尼乌斯方程的对数形式已经较好地反映了温度与黏度的关系。

由斜率 $= Ea/R$,截距 $= \ln k_0$,计算得到 Ea 、 k_0 ,见表3。

由表3可知,金佛手汁质量分数增大, k_0 值在逐渐减小, Ea 值反而逐渐增大,说明流动活化能和频率因子之间存在反向关系。质量分数增大会阻碍流动,加工贮运中可调节温度来改变流动性,例如,低真空负压液体灌装机无法高效灌装黏度较大的果汁,可适当提高温度来降低料液黏度,减小灌装阻力^[19];72%的浓缩橙汁,由于黏度太高而无法使用短时加热蒸发器,可适当提高温度来降低黏度;一般黏性流体,可采用列管换热器或搅拌式换热器,而较高黏度流体则需重新选择^[20]。

表 3 金佛手汁的 k_0 与 Ea

Table 3 k_0 and Ea of Jinhua fingered citron juice

质量分数/%	$Ea/(J/mol)$	$k_0/(mPa \cdot s)$
9	3 873.12	2.154
20	5 028.08	1.982
30	6 413.35	1.774
40	8 075.52	1.737
50	10 701.40	1.589
60	14 493.04	1.192
70	16 979.23	1.078

2.2.3 质量分数对佛手汁黏度的影响 在研究的质量分数范围内,金佛手汁的流变情况,如图 5 所示。

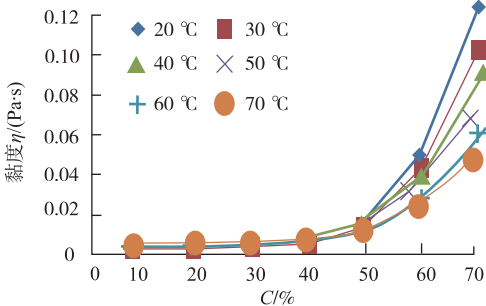


图 5 金佛手汁黏度与质量分数的基本关系

Fig. 5 Master curve of viscosity versus concentration of Jinhua fingered citron juice

由图 5 可知,金佛手汁的黏度与质量分数呈正

向关系。

比较得知,质量分数对表观黏度的影响可选用式(2,3)的函数式进行表示。

幂函数关系形式

$$\eta=k_1(C)A_1(2)$$

指数函数关系形式

$$\eta=k_2\exp(A_2C)(3)$$

式中: A_1 、 A_2 、 k_1 、 k_2 为常数; C 为佛手汁质量分数。

对 η 与 C 的关系进行回归分析,再与以上两种函数关系式拟合,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,拟合为指数函数方程时 $R^2>0.9$,拟合较好;拟合为幂函数方程时 $R^2>0.7$,拟合较差。故选用指数函数反映质量分数对黏度的影响更为合理。

2.2.4 温度和质量分数与金佛手汁黏度的关系 研究温度和质量分数变化,对黏度的影响,建立合理的数学方程,在实际生产中用于改变金佛手汁的黏度具有重要的意义^[21]。金佛手汁的质量分数与频率因子和流动活化能的关系曲线如图 6、7 所示。

由图 6、7 得到综合方程

$$\eta=3 \times 10^{-4} e^{0.0113 C} \exp(3060.575-5 e^{0.0250 C / R T}),$$

即为温度和质量分数对佛手汁黏度综合影响的数据模型。

2.2.5 真空浓缩终点的确定 剪切速率为 $100 s^{-1}$,温度为 $20^{\circ}C$ 时,金佛手汁质量分数与黏度的关系见图 8。

表 4 金佛手汁黏度与质量分数关系的拟合情况

Table 4 Power function and exponential function fitting of viscosity versus concentration of Jinhua fingered citron juice

温度/ $^{\circ}C$	指数函数拟合方程	R^2	幂函数拟合方程	R^2
20	$y=0.0003e^{0.078x}$	0.956	$y=4E-06x^{2.153}$	0.777
30	$y=0.0003e^{0.0765x}$	0.960	$y=4E-06x^{2.105}$	0.783
40	$y=0.0003e^{0.0746x}$	0.956	$y=5E-06x^{2.048}$	0.776
50	$y=0.0003e^{0.0707x}$	0.959	$y=6E-06x^{1.945}$	0.782
60	$y=0.0003e^{0.0686x}$	0.960	$y=6E-06x^{1.889}$	0.783
70	$y=0.0003e^{0.0653x}$	0.955	$y=8E-06x^{1.790}$	0.773

由图 8 可知:金佛手汁的黏度随质量分数的增长主要分为 3 个阶段:第一阶段,质量分数由 9% 上升为 40%,黏度上升幅度较缓;第二阶段,质量分数由 40% 上升为 60%,黏度上升幅度较陡;第三阶

段,质量分数由 60% 上升为 70%,黏度上升幅度最陡。因此,60% 为不同可溶性固形物含量的佛手浓缩汁黏度大小的突增跃变点,可选定 60% 作为生产的浓缩点。

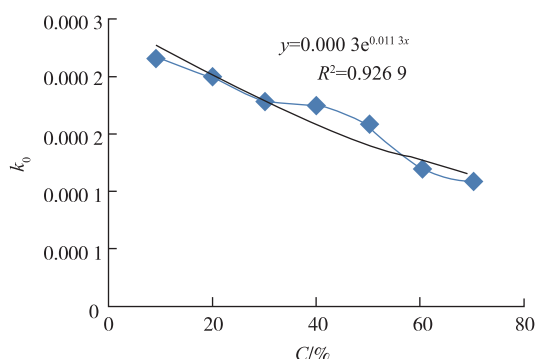
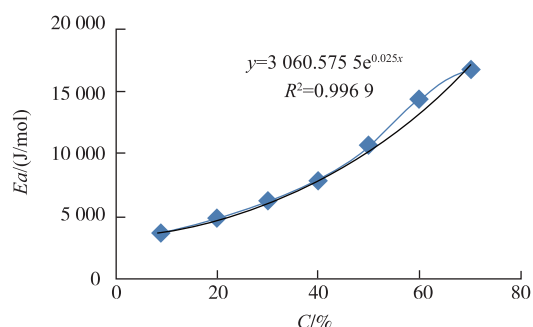
图6 金佛手汁的质量分数与频率因子 k_0 的关系Fig. 6 Curve and exponential function fitting of k_0 versus concentration of Jinhua fingered citron juice

图7 金佛手汁的质量分数与流动活化能的关系

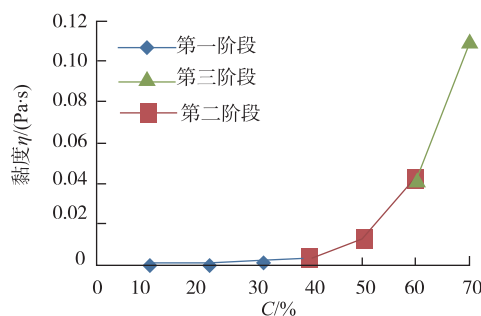
Fig. 7 Curve and power function of E_a versus concentration of Jinhua fingered citron juice

图8 黏度随质量分数的变化曲线

Fig. 8 Master curve of viscosity versus concentration

3 结 语

本实验关于金佛手汁流变特性的研究中,得出金佛手汁为牛顿流体。根据函数分析可看出,温度与黏度的关系选用阿仑尼乌斯指数方程可较好表示。温度和质量分数对金佛手汁黏度的综合影响的方程为: $\eta = 3 \times 10^{-4} e^{0.0113C} \exp(3060.5755e^{0.0250C}/RT)$ 。最后,真空浓缩金佛手汁的浓缩终点确定为60%。

参考文献:

- [1] XIA Yu, WANG Yansheng, ZHANG Yanjie, et al. Research on nutrition, active ingredients and hypolipide-mic effect of bergamot fruit[J]. *Food Science and Technology*, 2016(2): 70-73. (in Chinese)
- [2] YIN Feng, CHENG Liang, LOU Fengchang. Research on chemical constituents of bergamot [J]. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 2004(3): 24-26. (in Chinese)
- [3] ZHAO Xiuling. Research progress on physiologically active components of bergamot [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012(21): 393-399. (in Chinese)
- [4] JIN Xiaoling. Analysis of Jinhua bergamot nutrition ingredient[J]. *Journal of Zhejiang Normal University Natural Sciences*, 1998(4): 86-88. (in Chinese)
- [5] FANG Aili, LI Dandan, ZHANG Mingyu. Research progress of fruit juice storage technology [J]. *Farm Products Processing*, 2015(4): 76-77. (in Chinese)
- [6] BAI Xiaoming, WANG Xiaohua, ZENG Xiaofeng, et al. Juice concentration technology overview [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2014(7): 131-135. (in Chinese)
- [7] BAO Jianhua, XU Yunsheng. Research on energy consumption in concentrated fruit juice production [J]. *Science & Technology Information*, 2007(29): 36-37. (in Chinese)
- [8] XU Xueqin, ZHU Qiaoli, XU Yingqiu. Rheological properties of mango juice concentrate [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2011(1): 32-36. (in Chinese)
- [9] CHEN Guiyun, HUANG Yuping, CHEN Kunjie. Research status and development trend of honey rheology [J]. *Food Science*,

- 2013(19):376-380.(in Chinese)
- [10] HE Qiang,JIANG Bo. Effect of xanthan gum and guar gum compound stabilizer on the quality and rheology of ice cream[J]. **Journal of Wuxi University of Light Industry**,2004(3):46-50.(in Chinese)
- [11] QUEK M C,CHINhin N L,YUSOF Y A. Modelling of rheological behaviour of soursop juice concentrates using shear rate-temperature-concentration superposition[J]. **Journal of Food Engineering**,2013,118(4):380-386.
- [12] ASTOLFI-FILHO Z,TELIS V R N,OLIVEIRA E B,et al. Rheology and fluid dynamics properties of sugarcane juice [J]. **Biochemical Engineering Journal**,2011,53(3):260-265.
- [13] CHIN N L,CHAN S M,YUSOF Y A,et al. Modelling of rheological behaviour of pummelo juice concentrates using master-curve[J]. **Journal of Food Engineering**,2009,93(2):134-140.
- [14] 邹高万,贺征,顾璇. 粘性流体力学[M]. 北京:国防工业出版社,2013:55-57.
- [15] LUO Changrong,MA Jianguo,XU Shiyong. Rheological properties of tomato paste [J]. **Journal of Wuxi University of Light Industry**,2001(5):471-475.(in Chinese)
- [16] LI Dandan,JIN Zhengyu,XU Xueming,et al. Flow behaviour of inulin- κ -carrageenan-milk beverages [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2009(2):172-176.(in Chinese)
- [17] ZHOU L Y,GUAN Y J,BI J F,et al. Change of the rheological properties of mango juice by high pressure homogenization[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2017,82:121-130.
- [18] MARINA M,BARBARA P. Bioactive constituents in liposomes incorporated in orange juice as new functional food:thermal stability,rheological and organoleptic properties[J]. **Journal of Food Science and Technology**,2015,52(12):7828-7838.
- [19] WU Jiachun. Using low viscosity vacuum liquid filling machine to fill large viscosity juice[J]. **Packaging and Food Machinery**,2002(2):44-45.(in Chinese)
- [20] LI Yumei,LU Rongrong,Xu Shiyong. The Rheological properties of whey protein [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2006,25(2):79-82.(in Chinese)
- [21] LIAO Jin,ZHANG Yayuan,HONG Yan,et al. Effect of ar-abie gum on pasting and rheological properties of potato starch[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2006,25(2):79-82.(in Chinese)

科技信息

欧盟重新评估氯化物作为食品添加剂的安全性

据欧盟食品安全局(EFSA)消息,欧盟食品添加剂和调味剂小组(FAF)重新评估了氯化物(e507-509,E 511)作为食品添加剂的安全性。

评估的氯化物包括盐酸(hydrochloric acid)(E 507)、氯化钾(potassium chloride)(E 508)、氯化钙(calcium chloride)(E 509)和氯化镁(magnesium chlor)(E 511)。通过评估,欧盟专家小组得出结论认为,以上氯化物在目前的授权使用水平中不存在安全问题。

[信息来源]食品伙伴网. 欧盟重新评估氯化物作为食品添加剂的安全性 [EB/OL]. (2019-7-9). <http://news.foodmate.net/2019/07/525621.html>