

梨膏的流变学特性及其影响因素

李月^{1,2}, 赵江丽¹, 张笑莹^{1,2}, 程玉豆¹, 易岸威^{1,2}, 滑竺青^{1,2}, 王永霞^{2*}, 关军锋^{1*}

(1. 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 石家庄 050051;

2. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 邯郸 056038)

摘要: **目的** 考察人为加糖、加胶后梨膏触变性及黏度的变化。**方法** 以鸭梨为实验材料, 通过真空浓缩方式制备鸭梨膏, 采用 HR-10 型流变仪对其流体类型、黏度、触变性进行测定。**结果** 鸭梨膏属于非牛顿流体, 具体细分为无限接近牛顿流体的假塑性流体, 具有剪切稀化特性和正触变特性; 损耗模量 G'' 总是大于储能模量 G' , 表现出液体黏性性质; 剪切速率与剪切力变化关系符合 Power Law 方程, 拟合效果良好($r^2>0.99$); 温度显著影响梨膏黏度, 黏度随温度升高而降低, 二者关系符合 Arrhenius 方程, 拟合效果良好($r^2>0.99$); 可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC)对黏度的影响符合指数函数关系, 模型拟合效果良好($r^2>0.99$); SSC 以及人为加糖、加胶处理对梨膏触变性、黏度影响显著($P<0.05$), 黏度随 SSC 的升高而增强, 人为加胶、加糖加胶会导致梨膏黏度显著升高($P<0.05$); 触变性随 SSC 的升高而增强, 同时人为加糖、加胶、加糖加胶处理会导致梨膏触变性显著减弱($P<0.05$)。**结论** 人为添加糖、胶会导致梨膏的流变学特性发生改变。本研究可为工业生产中梨膏产品的品质提升、质量控制提供新的思路, 为梨膏的流变学特性研究提供理论基础。

关键词: 梨膏; 流变特性; 可溶性固形物含量

Rheological properties of pear paste and its influencing factors

LI Yue^{1,2}, ZHAO Jiang-Li¹, ZHANG Xiao-Ying^{1,2}, CHENG Yu-Dou¹, YI An-Wei^{1,2},
HUA Zhu-Qing^{1,2}, WANG Yong-Xia^{2*}, GUAN Jun-Feng^{1*}

(1. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 2. College of Life Science and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the thixotropy and viscosity changes of pear paste after artificial addition of sugar and gum. **Methods** Yali pear paste was prepared by vacuum concentration using Yali pear was used as the experimental material, the fluid type, viscosity and thixotropy of it were determined by HR-10 rheometer. **Results** Yali pear paste belonged to non-Newtonian fluid, which was subdivided into pseudoplastic fluid infinitely closed to Newtonian fluid, with shear thinning and normal thixotropy characteristics. The loss modulus G'' was always greater than the storage modulus G' , which showed the viscous property of the liquid. The relation between shear rate and shear force fitted the Power Law equation, and the fitting effect was gorgeous ($r^2>0.99$). Temperatures

基金项目: 河北省国际科技合作基地建设专项、国家财政农业农村部: 现代农业产业(梨)技术体系资助项目(CARS-28-23)

Fund: Supported by the Special Funds for the Construction of Hebei International Science and Technology Cooperation Base, and the National Ministry of Finance, Agriculture and Rural Affairs: Modern Agricultural Industry (Pear) Technology System Support Project (CARS-28-23)

通信作者: 王永霞, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品加工与质量安全控制。E-mail: wyxhd2004@126.com

关军锋, 博士, 研究员, 主要研究方向为果品贮藏加工。E-mail: junfeng-guan@263.net

***Corresponding author:** WANG Ying-Xia, Master, Associate Professor, College of Life Science and Food Engineering, Hebei University of Engineering, No.19 Taiji Road, Economic and Technological Development Zone, Handan 056038, China. E-mail: wyxhd2004@126.com

GUAN Jun-Feng, Ph.D, Professor, Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, No.1 Nongke Road, Xinhua District, Shijiazhuang 050051, China. E-mail: junfeng-guan@263.net

significantly affected the viscosity of pear paste, the viscosity decreased with increasing temperature, which conformed to the Arrhenius equation, and the fitting effect was good ($r^2>0.99$). The effect of soluble solids content (SSC) and viscosity presented exponential function, and good model fitting effect ($r^2>0.99$). The thixotropy and viscosity of pear paste were significantly affected by SSC, artificial addition of sugar and glue ($P<0.05$). The viscosity increased with the increase of SSC, and artificial addition of sugar and glue caused the viscosity of the pear paste to increase significantly ($P<0.05$). Thixotropy of pear paste was enhanced with the increase of SSC, while the thixotropy of pear paste was significantly weakened by artificial addition of sugar, glue and sugar and glue ($P<0.05$).

Conclusion The artificial addition of sugar and glue will change the rheology properties of pear paste. This study can provide a new idea for the quality improvement and quality control of pear paste products in industrial production, and provide a theoretical basis for the research of rheological properties of pear paste.

KEY WORDS: pear paste; rheological properties; soluble solids content

0 引言

梨膏是以鲜榨梨汁为原料,经护色、过滤、浓缩等工序制备得到的微黄色膏状产品,其口感柔和,梨果香味浓郁,富含可溶性糖、多酚类、黄酮类、有机酸类等人体所需的营养物质和功能性物质,具有平喘止咳、抗炎、抗氧化、预防肿瘤等功效^[1-3]。但实际生产中梨膏出膏率低、成本高,因此有些生产商常通过添加糖(白砂糖、葡萄糖、糖浆等)、胶(黄原胶、卡拉胶、琼脂等)、其他廉价的浓缩果汁(苹果汁、桃汁等)等手段压缩成本^[4],导致梨膏产品掺假掺坏事件频发。而人为添加糖、胶及其他浓缩果汁会导致梨膏可溶性糖的含量及种类,以及黏弹性、流动性、触变性等流变特性发生改变,导致口感、营养、保健功效等极大降低。

流变学是研究流体的变形和流动行为的科学,通过测定流体的剪切力、流动指数、黏弹性等流变特性值,解析流体食品的流变特性及其随温度和浓度的变化关系,对掌握食品内部结构、优化产品配方、控制产品品质等至关重要^[5-7]。关于梨膏的研究,当前多集中于梨膏配方、工艺参数优化及特征组分分析、抗氧化能力测定、药理功效验证等方面,如冯泽等^[8]通过单因素实验和响应面实验对香梨膏的配方进行了系统优化,并对其酚酮含量、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]阳离子自由基清除能力进行测定;李月等^[9]基于 Z-score 综合评价模型对鸭梨膏的护色工艺进行优化,并采用电子感官技术对护色和未护色鸭梨膏的滋味和气味进行对比分析;陆敏等^[10]通过药理学实验证明,与麦根、生地、葛根等药材配伍制备的秋梨膏可有效抑制纳米二氧化硅引起的大鼠肝、肾组织损伤程度。而针对梨膏流变学特性的研究,尤其是针对人为添加糖、胶等外来物质结合不同品质梨膏的流变特性变化的研究尚未见报道。

鉴于此,本研究通过对鸭梨膏的流变学特性进行测定,并运用相应的流变模型对不同流变行为进行拟合;同时考察人为加糖、加胶后不同品质梨膏的黏度、触变性差

异,旨在为鸭梨膏的质量控制、品质提升提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鸭梨[可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC)约为 11.8 Brix°;果肉含水率为 87.21%;可滴定酸含量为 0.06 g/mL; pH 为 4.73],采摘于河北省赵县梨园示范基地,于 2021 年 10 月入 0°C 冷库贮存备用。

偏重亚硫酸钾(分析纯,天津市大茂化学试剂厂);抗坏血酸(食品级,郑州拓洋实业有限公司);黄原胶、柠檬酸、白砂糖(食品级,河北百味生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

HR-10 型流变仪[美国 TA 仪器沃特世科技(上海)有限公司];PAL- α 型折光仪(日本 ATOGO 公司);HU24FR3L 型多功能榨汁机(韩国 HUROM 电子有限公司);RE-52AA 型旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂)。

1.3 实验方法

1.3.1 鸭梨膏制备

参考文献报道^[9,11]和预实验结果,将梨果洗净、切块进行榨汁,梨汁过 200 目筛,收集清汁于预先加入适量护色剂[0.02%抗坏血酸(m/V)、0.05%柠檬酸(m/V)、0.02%偏重亚硫酸钾(m/V)]的玻璃杯中进行护色。在固定真空度 0.9 atm、转速 60 r/min、浓缩温度 65°C 的条件下进行真空浓缩,分别于 SSC 为 30、40、50、60、70 Brix° 时取样。此处制备的为不同 SSC 的纯梨膏样品,用于后续流变学测定。

在相同条件下制备加糖(以白砂糖将清汁调至 SSC 为 20 Brix°)、加胶[添加黄原胶 0.05% (m/V)]、加糖加胶[以白砂糖将清汁调至 SSC 为 20 Brix° 后添加黄原胶 0.05% (m/V)] 3 种处理鸭梨膏(浓缩至 SSC 为 70 Brix°),用于后续流变学测定。

1.3.2 静态流变学测定

参考周莉等^[12]的方法,稍作修改。流动扫描模式下,选用直径为 40 mm 平行板测定系统,设定平行板测定间距为 500 μm ,剪切间距 50 μm ,剪切速率范围为 0~500 s^{-1} ,

分别测定 SSC 为 70 Brix° 鸭梨膏样品在 25、35、45、55 和 65℃ 温度下剪切力(Pa)随剪切速率(s^{-1})的变化, 根据拟合度判断其流体类型。

1.3.3 动态流变学测定

(1) 储能模量 G' 和损耗模量 G'' 的测定

参考周启萍等^[13]的方法, 稍作修改。振荡频率模式下, 选用直径为 40 mm 平行板测定系统, 设定平行板测定间距为 500 μm , 剪切间距 50 μm , 应变力 1.0%, 分别测定 SSC 为 70 Brix° 的鸭梨膏样品在 25、35、45、55、65℃ 下储能模量 G' 和损耗模量 G'' 在频率为 1~20 Hz 扫描范围内的变化。

(2) 温度对梨膏黏度的影响

参考 GAO 等^[14]的方法, 稍作修改。流动温度梯度模式下, 选用直径为 40 mm 平行板测定系统, 设定平行板测定间距为 500 μm , 开始温度 25℃, 斜坡速率 5℃/min, 结束温度 65℃, 浸泡时间 180 s, 剪切速率为 100 s^{-1} , 测定 SSC 为 70 Brix° 的鸭梨膏样品在 25~65℃ 温度梯度下黏度与温度之间的变化关系, 并判断其符合的数学模型。

同时在流峰值保持模式下, 设定剪切速率 100 s^{-1} , 采样间隔 1.0 s/pt, 测定其在 0~60 s 黏度与剪切时间的变化关系。

1.3.4 不同处理下梨膏黏度和触变性测定

(1) SSC、加糖、加胶、加糖加胶对梨膏黏度的影响

参考 SUO 等^[15]的方法, 稍作修改。流动扫描模式下, 选用直径为 40 mm 平行板测定系统, 设定平行板测定间距为 500 μm , 剪切间距 50 μm , 剪切速率 100 s^{-1} , 分别测定 SSC 为 30、40、50、60、70 Brix° 的鸭梨膏样品分别在 25、35、45、55 和 65℃ 不同温度下的黏度与 SSC 的变化关系, 并判断其符合的数学模型。

同时测定 50、60、70 Brix°、加糖、加胶、加糖加胶梨膏样品在 25℃, 0~200 s^{-1} 剪切速率范围内的黏度变化差异。

(2) SSC、加糖、加胶、加糖加胶对梨膏触变性的影响

参考周莉等^[12]的方法, 稍作修改。流动扫描模式下选择对数扫描, 选用直径为 40 mm 平行板测定系统, 设定平行板测定间距为 500 μm , 剪切间距 50 μm , 浸泡时间 180 s, 在 25℃ 温度条件下测定 SSC 为 50、60、70 Brix° 的梨膏以及加糖、加胶、加糖加胶梨膏样品剪切应力(Pa)随剪切速率(s^{-1})的关系, 剪切速率从 1.0 s^{-1} 增大到 200 s^{-1} , 再从 200 s^{-1} 减小到 1.0 s^{-1} , 完成一次循环, 测定其触变性差异。

1.4 数据处理

每次测定重复 3 次, 所有数据以 Excel 2016 和 Origin 2021 软件进行分析、作图, 以 IBM SPSS Statistics 20 软件进行统计学分析。

2 结果与分析

2.1 梨膏的流体类型

2.1.1 静态流变学测定结果

剪切速率和剪切力是表征流变学特性的两个基本参

数, 它们的关系常用 Power Law 方程 $\tau=K D^n$ (式中: τ 为剪切应力, Pa; K 为黏度系数, Pa·s; D 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流动指数)进行拟合^[16]。当 $n > 1$ 时, 表现为剪切稠化, 其流变曲线斜率减小黏度增加, 曲线向下凹, 为胀塑性流体; 当 $n=1$ 时, 黏度与剪切速率无关, 为牛顿流体; 当 $0 < n < 1$ 时, 表现为剪切稀化, 其流变曲线斜率增加黏度减小, 曲线向上凸, 为假塑性流体^[17]。

在 25、35、45、55、65℃ 温度条件下, 鸭梨膏的剪切力随剪切速率的增大而增大, 且同一剪切速率下, 剪切力随温度的升高而减小(图 1)。不同温度下梨膏剪切速率和剪切力的 Power Law 拟合方程见表 1。各拟合方程的相关系数 r^2 均大于 0.999, 拟合度良好; 黏度系数(K)随测定温度升高而降低, 流变指数(n)整体上随温度的升高逐渐增大, 表明温度越高梨膏黏度越小, 剪切速率对鸭梨膏内部结构的影响越弱; n 值介于 0.9610~0.9992 之间, 均接近于 1, 表明梨膏为无限接近牛顿流体的假塑性流体且剪切稀化; 与宋洪波等^[18]对柚子浓缩汁的研究结果一致。

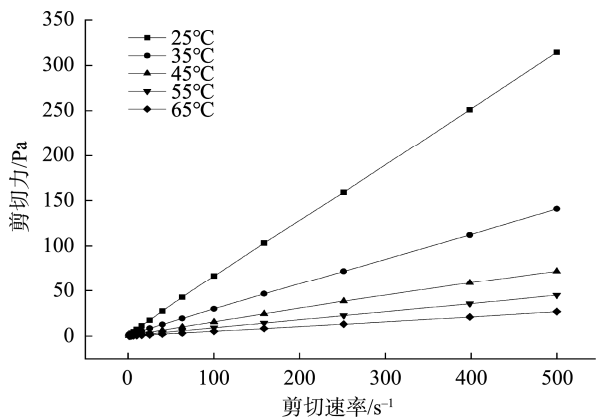


图 1 鸭梨膏流变特性曲线

Fig.1 Rheological characteristic curves of Yali pear paste

表 1 不同温度下鸭梨膏流体曲线的 Power Law 方程回归参数

Table 1 Regression parameters of Power Law equation for fluid curves of Yali pear paste at different temperatures

温度/℃	$K/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	n	r^2
25	0.7566	0.9610	0.9999
35	0.3571	0.9612	0.9999
45	0.2014	0.9470	0.9998
55	0.0907	0.9977	0.9999
65	0.0446	0.9992	0.9998

2.1.2 动态流变学测定结果

储能模量 G' 和损耗模量 G'' 可以反映流体的黏弹性大小, 展现流体所具有的液体(黏性)或固体(弹性)特性^[19]。不同测定温度下, 扫描频率 1~20 Hz 范围内, 鸭梨膏储能模量 G' 和损耗模量 G'' 的变化情况见图 2。可见, 随测定温度

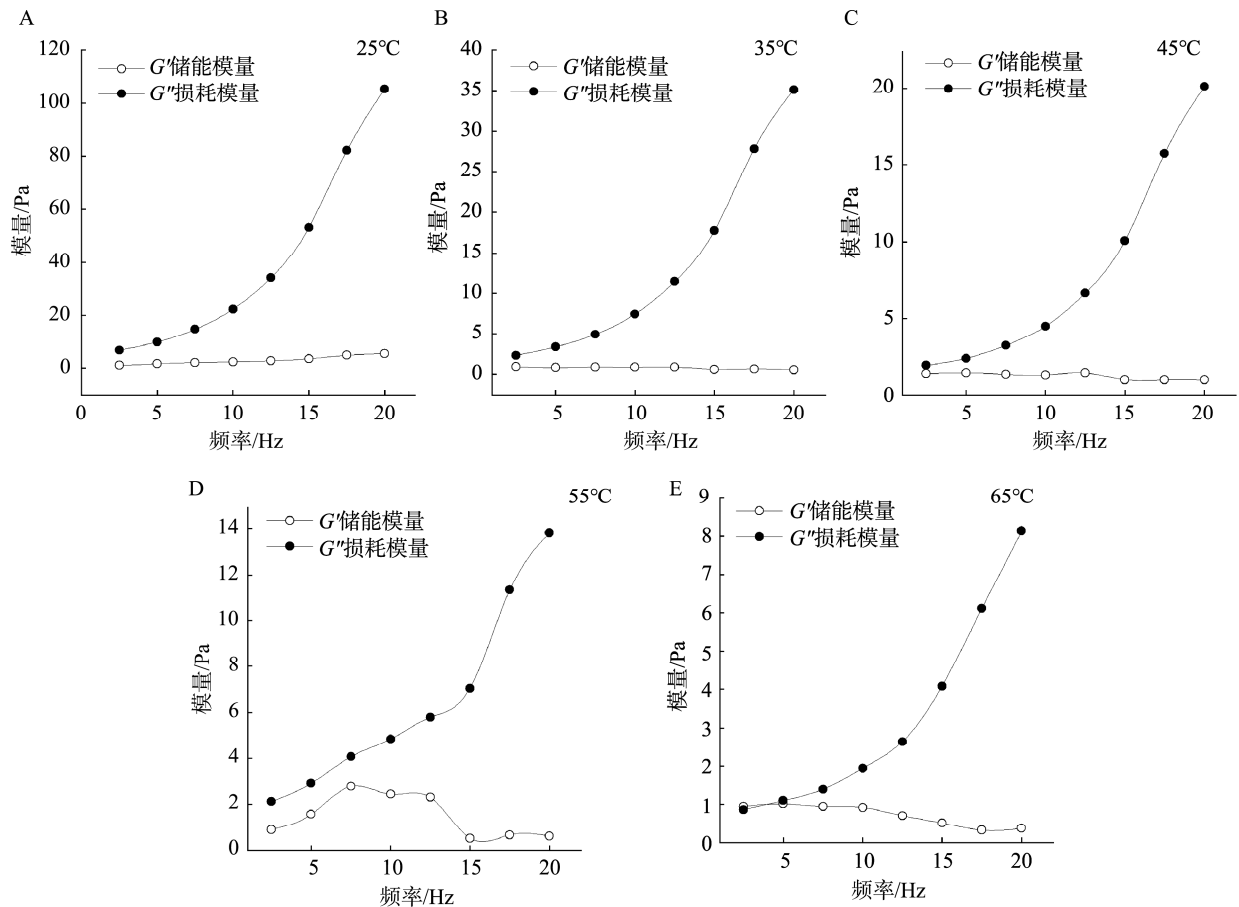


图 2 不同温度下鸭梨膏储能模量 G' 和损耗模量 G''
Fig.2 Storage modulus G' and loss modulus G'' of Yali pear paste at different temperatures

升高, 储能模量 G' 和损耗模量 G'' 均逐渐降低呈下降趋势, 说明梨膏体系的黏性和弹性均降低; 此外, 各测定温度下, 随着扫描频率增加 G'' 均逐渐升高, 且 G'' 总是大于储能模量 G' , 说明梨膏主要发生黏性形变, 表现出液体黏性性质^[19], 符合假塑性流体特性。

2.1.3 温度对梨膏黏度的影响

不同温度下, 鸭梨膏黏度与剪切速率和剪切时间的变化关系见图 3。由图 3A 可知, 在所有测试温度下, 随着剪切速率的逐渐增大, 鸭梨膏的黏度总体表现为下降趋势, 且在相同剪切速率条件下, 温度越高黏度越低, 梨膏黏度从大到小依次为 25、35、45、55、65°C。值得注意的是, 在 0~60 s⁻¹ 剪切速率范围内, 随剪切速率的增大鸭梨膏黏度降低的较为明显, 在 60~500 s⁻¹ 剪切速率范围内, 随剪切速率的增大鸭梨膏黏度略有降低后趋于稳定, 因此选择剪切速率为 100 s⁻¹ 用于后续梨膏黏度测定。

由图 3B 可知在相同剪切速率条件下, 所有测定温度的梨膏的黏度随着剪切时间的延长均保持不变, 且同一剪切时间下, 温度越高梨膏黏度越低, 这与图 3A 结果一致。

由图 4 可知, 温度对鸭梨膏的黏度变化影响显著 ($P<0.05$)。当剪切速率(100 s⁻¹)相同时, 鸭梨膏黏度随温度的

升高总体呈下降趋势; 当温度处于 25~60°C, 梨膏黏度随温度升高而减小且降幅较大; 当温度超过 60°C 时, 梨膏黏度表现为略有降低。一方面, 温度升高流体分子间距增大, 分子间作用力减弱, 导致流体流动时内摩擦减小, 黏度降低;

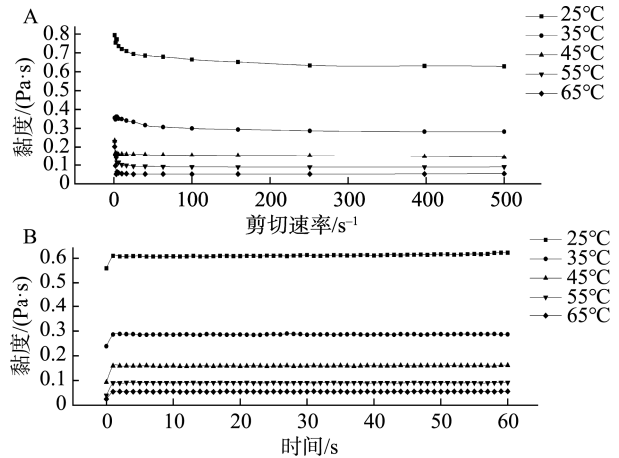


图 3 不同温度条件下鸭梨膏剪切速率、剪切时间与黏度的变化关系
Fig.3 Relationship between shear rate, shear time and viscosity of Yali pear paste at different temperatures

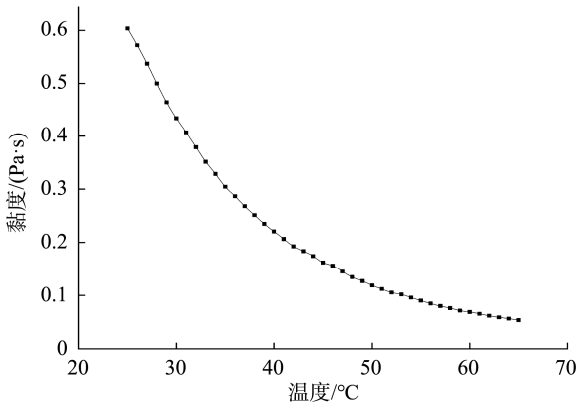


图 4 鸭梨膏黏度和温度的变化关系
Fig.4 Relationship between viscosity and temperatures of Yali pear paste

另一方面, 温度升高流体分子热运动加剧, 分子内摩擦几率增多而导致黏度增大。温度较低时, 前一方面起主要作用, 随着温度的升高, 后一方面起主要作用^[20], 因此温度升高时鸭梨膏黏度变幅越来越小。

在实际生产中, 应充分注意浓缩温度对梨膏质量的影响, 本研究结果表明 60~65℃浓缩温度范围内梨膏黏度较小, 同时黏度变化也较小, 可为鸭梨膏生产的温度选择提供指导。

研究表明^[21], 流体温度与黏度的关系常用阿累尼乌斯(Arrhenius)方程来描述, 即 $\eta = Ke^{-E_a/RT}$ [式中: η 为黏度, Pa·s; E_a 为活化能, kJ/mol; T 为热力学温度, K; R 为摩尔气体常量, 8.314 J/(mol·K), K 为常数]。等式两边取对数, 即 $\ln\eta = E_a/RT + \ln K$ (式中 E_a/R 为斜率; $\ln K$ 为截距), 以 $\ln\eta$ 对 $1/T \times 1000$ 作图, 结果如图 5 所示。

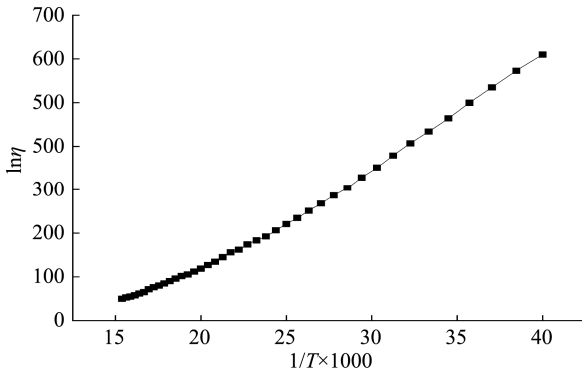


图 5 鸭梨膏黏度的 Arrhenius 曲线
Fig.5 Arrhenius curve of viscosity of Yali pear paste

对图 5 曲线数据进行回归分析, 结果如表 2 所示。鸭梨膏 Arrhenius 方程拟合相关系数 r^2 为 0.9901, 说明该方程可以很好的反应其黏度与温度的关系, 可用于实际生产中较好的预测不同温度下的梨膏黏度。同时, 本研究中鸭梨

膏活化能较大为 188.49 kJ/mol, 表明其黏度对温度变化越来越敏感, 即较小的温度变化, 可以引起梨膏体系较大的黏度变化^[22]。

表 2 鸭梨膏 Arrhenius 回归方程参数
Table 2 Parameters of Arrhenius regression equation for Yali pear paste

浓度/°Brix	(E_a/R)/K	E_a /(kJ/mol)	$\ln K$	r^2
70	22.67	188.49	-326.45	0.9901

2.2 SSC 和人为添加糖、胶对鸭梨膏流变学特性的影响

2.2.1 函数拟合

纯梨膏 SSC 和黏度的变化关系如图 6 所示。可知, 所有测定温度下的梨膏黏度随 SSC 的增大而增大; 且在同一 SSC 下, 温度越高, 黏度越小。由此表明, 鸭梨膏 SSC 对其黏度影响较大, 且 SSC 越大对黏度影响越显著($P < 0.05$)。

研究表明^[23], 流体浓度(本研究中为梨膏 SSC)与黏度之间可用幂函数和指数函数两种数学模型进行拟合, 即 $\eta = K_1 C^{A_1}$ 和 $\eta = K_2 \exp^{A_2 C}$ (式中: η 为黏度, Pa·s; A_1 、 K 为常数; C 为 SSC, Brix°)。分别利用两式对鸭梨膏的 SSC 和黏度关系进行拟合分析, 不同温度下回归方程参数见表 3。

由表 3 可知, 所有测定温度下两种数学模型的相关系数 r^2 均在 0.94 以上, 表明本研究中指数函数和幂函数均可以较好的反应鸭梨膏 SSC 与黏度的变化关系, 但相比之下, 指数函数模型的相关系数 r^2 值(0.997 ± 0.003)均大于幂函数模型的 r^2 值(0.968 ± 0.019), 因此选择指数函数模型可以更好地拟合鸭梨膏 SSC 与黏度之间的变化。同时指数函数的 A_2 随温度的升高而逐渐减小, 说明随着温度逐渐降低, 鸭梨膏黏度随 SSC 增长的速率减小, 浓度越大, 黏度受 SSC 的影响越不显著($P > 0.05$)。周莉等^[12]研究结果表明, 指数函数更适合对浓缩慈姑浓缩汁的浓度与黏度关系进行拟合, 与本研究结果一致。

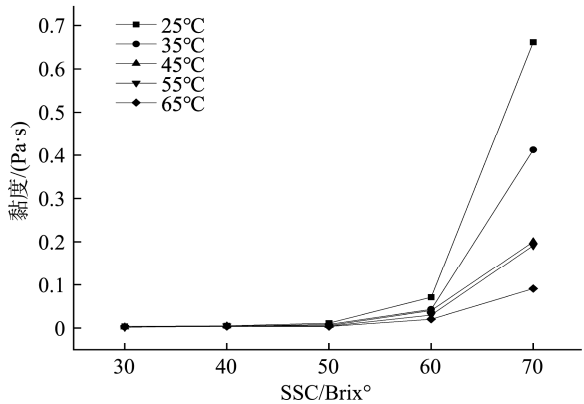


图 6 鸭梨膏 SSC 和黏度的变化关系
Fig.6 Relationship between SSC and viscosity of Yali pear paste

表 3 鸭梨膏指数函数和幂函数拟合方程参数

Table 3 Parameters of fitting equation of exponential function and power function of Yali pear paste

温度/℃	指数函数拟合		幂函数拟合	
	曲线方程	r^2	曲线方程	r^2
25	$Y=0.0014e^{2.0307X}$	0.9968	$Y=0.0096X^{3.5833}$	0.9580
35	$Y=0.0011e^{1.9407X}$	0.9912	$Y=0.007X^{3.4048}$	0.9416
45	$Y=0.0011e^{1.7543X}$	0.9974	$Y=0.0042X^{3.3693}$	0.9731
55	$Y=0.0007e^{1.8976X}$	0.9998	$Y=0.0039X^{3.3849}$	0.9818
65	$Y=0.0008e^{1.6018X}$	0.9986	$Y=0.0034X^{2.8673}$	0.9875

2.2.2 不同 SSC、加糖、加胶、加糖加胶时的梨膏黏度

本研究中黄原胶添加量为 0.05% (m/V), 而稀胶溶液的流动特性近似于牛顿流体, 这与梨膏无限接近牛顿流体一致, 因此黄原胶的添加不会改变梨膏的流体类型^[24-25]。

SSC、加糖、加胶均会影响梨膏的黏度(图 7、8), 在 0~200 s^{-1} 剪切速率范围内, 50、60、70 Brix° 纯梨膏黏度均基本保持不变, 黏度随 SSC 的增大而增大, 且 70 Brix° 的梨膏黏度显著大于 50、60 Brix° 的梨膏黏度($P<0.05$)。

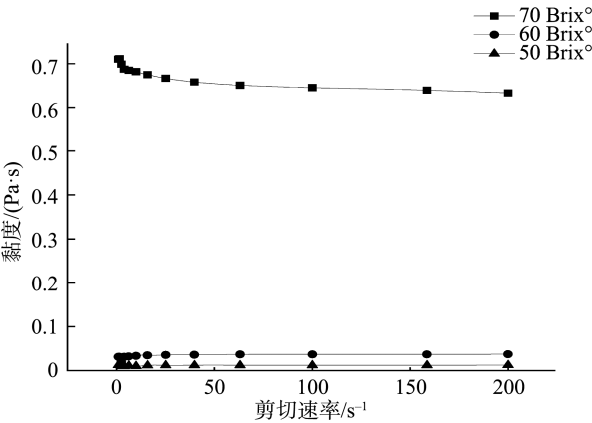


图 7 不同 SSC 对鸭梨膏黏度影响

Fig.7 Effects of different SSC on viscosity of Yali pear paste

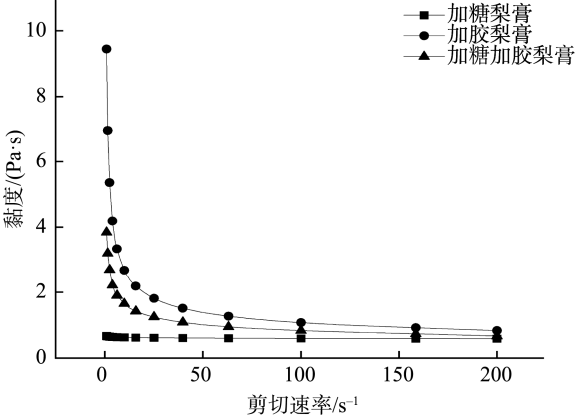


图 8 加糖、加胶、加糖加胶对梨膏黏度影响

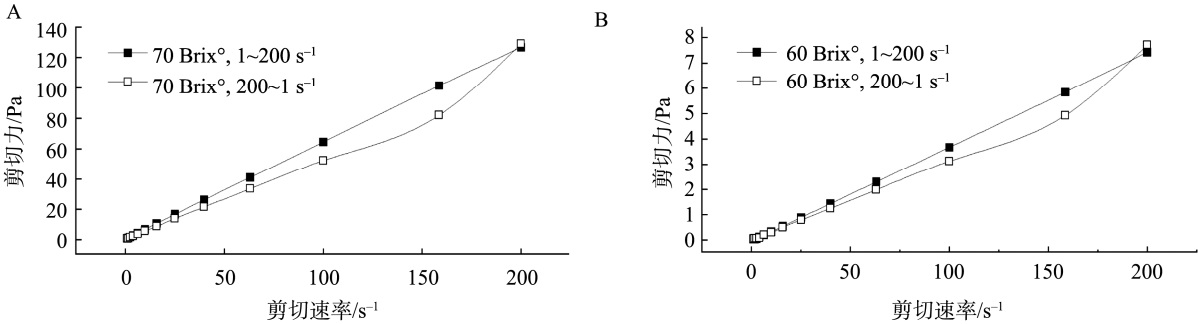
Fig.8 Effects of adding sugar, gum and sugar on the viscosity of Yali pear paste

与 70 Brix° 纯梨膏相比, 加糖处理会导致梨膏黏度略微减小, 但黏度随剪切速率的增加仍然基本保持不变; 加胶、加糖加胶处理均会显著增大梨膏的初始黏度(剪切速率为 0 s^{-1} 时的黏度)($P<0.05$), 且在 0~25 s^{-1} 剪切速率范围内梨膏黏度减幅较大, 在 25~200 s^{-1} 剪切速率范围内黏度变化较小, 但加胶梨膏、加糖加胶梨膏的最终黏度(剪切速率为 200 s^{-1} 时的黏度)仍高于 70、60、50 Brix° 纯梨膏和加糖梨膏的初始黏度, 同时加胶梨膏和加糖加胶梨膏的黏度变化趋势呈现较大的一致性。

2.2.3 不同 SSC、加糖、加胶、加糖加胶时的梨膏触变性

触变性可以反映产品经搅拌、旋转之后的流体稳定性^[26-27]。在触变性测定过程中, 当触变速率在逐渐增大和减小两个过程中所对应的曲线不重合时, 便会形成一个滞后环, 此现象称为滞后现象。滞后环的出现表明样本体系内部结构的破坏速率大于其恢复速率, 滞后环面积大小反映了流体去除作用力后体系结构恢复速率的快慢, 即流体黏度的恢复具有一定的时间依赖性^[28-29]。

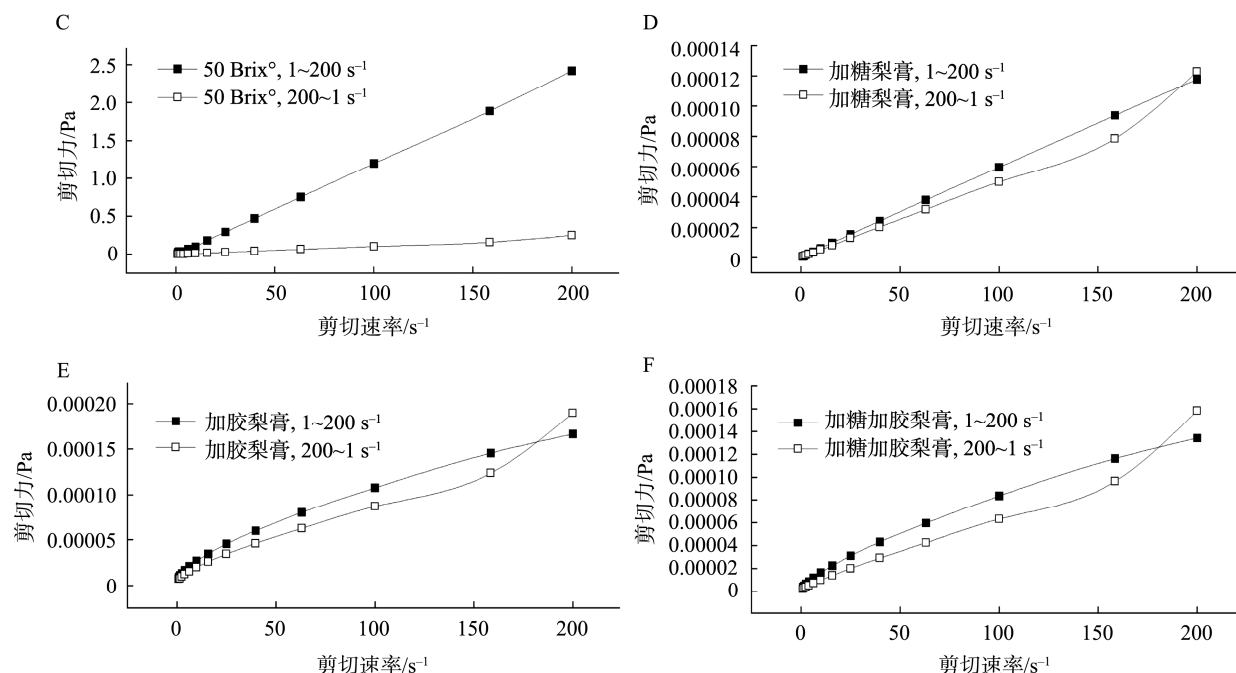
SSC 对梨膏的触变性影响显著($P<0.05$)(图 9A~C)。60、70 Brix° 的纯梨膏体系在剪切速率从 1 s^{-1} 增大到 200 s^{-1} , 再



注: A、B、C、分别是 SSC 为 70、60、50 Brix° 的纯梨膏; D、E、F 分别是 SSC 为 70 Brix° 经加糖、加胶、加糖加胶处理的梨膏。

图 9 不同 SSC 及加糖、加胶、加糖加胶对鸭梨膏触变性的影响

Fig.9 Effects of different SSC, sugar, gum, sugar and gum on the thixotropy of Yali pear paste



注: A、B、C、分别是 SSC 为 70、60、50 Brix° 的纯梨膏; D、E、F 分别是 SSC 为 70 Brix° 经加糖、加胶、加糖加胶处理的梨膏。

图 9(续) 不同 SSC 及加糖、加胶、加糖加胶对鸭梨膏触变性的影响

Fig.9 Effects of different SSC, sugar, gum, sugar and gum on the thixotropy of Yali pear paste

从 200 s^{-1} 减小到 1 s^{-1} 过程中均形成了完整的滞后环, 均具有正触变性; 50 Brix° 的纯鸭梨膏虽具有一定的触变性, 但并未形成完整的滞后环; 触变性随 SSC 的增大而增大, 且 70 Brix° 的纯梨膏触变性显著大于 50、60 Brix° 的纯梨膏触变性 ($P < 0.05$); 这与 IGUAL 等^[30]利用滞后环的大小对葡萄柚果酱触变性的测定结果吻合。

加糖、加胶处理对梨膏的触变性影响显著 ($P < 0.05$) (图 9D~F)。与 70 Brix° 纯梨膏相比, 加糖、加胶、加糖加胶处理梨膏均形成了完整的触变环, 但导致其触变环面积显著减小 ($P < 0.05$), 触变特性显著减弱 ($P < 0.05$); 而加糖、加胶、加糖加胶 3 种处理的梨膏之间触变环面积并未展现出明显差异 ($P > 0.05$), 但在测定范围内, 剪切力随剪切速率的变化趋势一致。

3 结 论

静态流变学测定结果表明, 鸭梨膏属于非牛顿假塑性流体, 具有剪切稀化特性, 剪切速率与剪切力变化关系符合 Power Law 方程 $\tau = K\dot{\gamma}^n$, 拟合效果良好。动态流变学测定结果表明, 鸭梨膏具有正触变特性和液体黏性性质; 测定温度对梨膏黏度的影响可用 Arrhenius 方程准确表达。SSC 越高鸭梨膏的黏度就越大, 黏度对 SSC 表现出依赖关系, 且二者变化关系符合 $\eta = K_2 \exp^{A_2 C}$ 方程。SSC、加糖、加胶处理会导致梨膏的流变特性发生显著变化, 且与纯梨

膏相比, 人为添加糖、胶后梨膏的触变性和黏度发生明显变化。本研究可对鸭梨膏的生产加工、黏度预测、质量控制等提供研究基础。

参考文献

- [1] BORCHANI M, MASMOUDI M, AMIRA AB, *et al.* Effect of enzymatic treatment and concentration method on chemical, rheological, microstructure and thermal properties of prickly pear syrup [J]. LWT, 2019, 113: 108314.
- [2] 赵鹏广, 刘伟, 尚俊杰, 等. 护色与浓缩工艺对梨膏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 138-144.
ZHAO PG, LIU W, SHANG JJ, *et al.* Effect of color protection and concentration technology on the quality of pear paste [J]. Food Res Dev, 2019, 40(13): 138-144.
- [3] 孟然. 南果梨膏加工工艺及其镇咳功效的初步研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
MENG R. Preliminary study on the processing technology and antitussive effect of 'Nanguo' pear paste [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [4] 赵玲, 张娟, 苏健裕. 分子生物技术在果汁鉴别中的应用的研究现状[J]. 中国酿造, 2020, 39(11): 16-20.

- ZHAO L, ZHANG J, SU JY. Research status of molecular biotechnology in fruit juice identification [J]. *China Brew*, 2020, 39(11): 16–20.
- [5] SALEHI F. Physicochemical characteristics and rheological behaviour of some fruit juices and their concentrates [J]. *J Food Meas Characteriz*, 2020, 14(5): 2472–2488.
- [6] DIAMANTE L, UMEMOTO M. Rheological properties of fruits and vegetables: A review [J]. *Int J Food Propert*, 2015, 18(6): 1191–1210.
- [7] BORCHANI M, MASMOUDI M, AMIRA AB, *et al.* Effect of enzymatic treatment and concentration method on chemical, rheological, microstructure and thermal properties of prickly pear syrup [J]. *LWT*, 2019, 113: 108314.
- [8] 冯泽, 茹先古丽·买买提依明, 潘红军, 等. 响应面法优化复合梨膏配方及其抗氧化性活性[J]. *食品工业*, 2022, 43(6): 111–115.
- FENG Z, GUXIANGULI MMTYM, PAN HJ, *et al.* Optimization of compound pear paste formula and its antioxidant activity by response surface methodology [J]. *Food Ind*, 2022, 43(6): 111–115.
- [9] 李月, 赵江丽, 张笑莹, 等. 基于 Z-score 评价模型优化梨膏护色工艺[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(23): 210–217.
- LI Y, ZHAO JL, ZHANG XY, *et al.* Optimization of color protection process of pear paste based on Z-score evaluation model [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(23): 210–217.
- [10] 陆敏, 孙湖泊, 李妍, 等. 秋梨膏对纳米二氧化硅引起大鼠肝、肾毒性的防护作用[J]. *中国老年学杂志*, 2018, 38(7): 1684–1686.
- LU M, SUN HB, LI Y, *et al.* Protective effect of Qiuli paste on hepatotoxicity and nephrotoxicity induced by nano silica in rats [J]. *Chin J Gerontol*, 2018, 38(7): 1684–1686.
- [11] 尚琪, 赵保堂, 杨富民, 等. 黄原胶与瓜尔豆胶复配对藜麦汁流变学特性的影响[J]. *食品与发酵科技*, 2022, 58(3): 64–73.
- SHANG Q, ZHAO BT, YANG FM, *et al.* Effect of xanthan gum and guar gum on rheological properties of quinoa wort [J]. *Food Ferment Technol*, 2022, 58(3): 64–73.
- [12] 周莉, 陈梦, 段玉清, 等. 慈姑浓缩汁流变学特性研究[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(14): 34–38.
- ZHOU L, CHEN M, DUAN YQ, *et al.* Study on rheological properties of Cigu concentrated juice [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(14): 34–38.
- [13] 周启萍, 张兆云, 袁翔, 等. 啤特果果汁流变学特性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(8): 76–81.
- ZHOU QP, ZHANG ZY, YUAN X, *et al.* Study on rheological properties of Pitot fruit juice [J]. *Food and Ferment Ind*, 2021, 47(8): 76–81.
- [14] GAO R, WU Z, MA Q, *et al.* Effects of breaking methods on the viscosity, rheological properties and nutritional value of tomato paste [J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2395.
- [15] SUO G, ZHOU C, SU W, *et al.* Effects of ultrasonic treatment on color, carotenoid content, enzyme activity, rheological properties, and microstructure of pumpkin juice during storage [J]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 84: 105974.
- [16] GABSI K, TRIGUI M, BARRINGTON S, *et al.* Evaluation of rheological properties of date syrup [J]. *J Food Eng*, 2013, 117(1): 165–172.
- [17] 侯燕杰, 郭玉蓉, 牛鹏飞. 仙人掌果汁的流变学特性[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(12): 92–96.
- HOU YJ, GUO YR, NIU PF. Rheological properties of cactus fruit juice [J]. *Food Ferment Ind*, 2018, 44(12): 92–96.
- [18] 宋洪波, 杜吉涛, 安凤平, 等. 柚子浓缩汁及清汁的流变学特性[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2007, (4): 422–426.
- SONG HB, DU JT, AN FP, *et al.* Rheological properties of concentrated and clear grapefruit juice [J]. *J Fujian Agric Forest Univ (Nat Sci Ed)*, 2007, (4): 422–426.
- [19] SONAWANE A, PATHAK S, PRADHAN RC. Effect of processing temperature on dynamic rheological properties and color degradation kinetics of bael fruit pulp [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(15): 5596–5602.
- [20] LUÍS Â, SOUSA S, DUARTE AP, *et al.* Phytochemical characterization, and evaluation of rheological and antioxidant properties of commercially available juices of berries [J]. *J Berry Res*, 2018, 8(1): 11–23.
- [21] SWAMI HNR, PRTRUNI K, RAO PS. Rheological properties of aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) juice concentrates [J]. *J Food Process Eng*, 2014, 37(4): 375–386.
- [22] DAK M, VERMA RC, JAAFFREY SNA. Effect of temperature and concentration on rheological properties of “Kesar” mango juice [J]. *J Food Eng*, 2007, 80(4): 1011–1015.
- [23] FU K, WANG H, ZHANG YX, *et al.* Rheological and energy absorption characteristics of a concentrated shear thickening fluid at various temperatures [J]. *Int J Impact Eng*, 2020, 139: 103525.
- [24] 谢明勇, 李精, 聂少平. 果胶研究与应用进展[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(8): 1–14.
- XIE MY, LI J, NIE SP. Research and application progress of pectin [J]. *Chin J Food*, 2013, 13(8): 1–14.
- [25] 吴伟郡, 姜建, 徐玲玲, 等. 魔芋胶溶液浓度对其流变学特性的影响研

- 究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7403–7409.
- WU WD, JIANG J, XU LL, *et al.* Study on the effect of konjac gel solution concentration on its rheological properties [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(18): 7403–7409.
- [26] 杨颖, 单杨, 丁胜华, 等. 高能球磨处理对赣南脐橙全果原浆粒径和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 109–115.
- YANG Y, SHAN Y, DING SH, *et al.* Effects of high-energy ball milling on particle size and rheological properties of Gannan navel orange pulp [J]. *Food Sci*, 2019, 40(11): 109–115.
- [27] 戴丽媛, 付雪侠, 季香青, 等. 香豆胶与玉米淀粉混合物流变特性的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(24): 9221–9225.
- DAI LY, FU XX, JI XQ, *et al.* Study on the characteristics of coumarin gum and corn starch mixture [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(24): 9221–9225.
- [28] 王楠. 不同加热方式对三种葡萄浓缩汁品质变化的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2019.
- WANG N. Effects of different heating methods on the quality changes of three kinds of grape juice concentrate [D]. Alear: Tarim University, 2019.
- [29] 王勇, 裴晶莹, 许敏, 等. 魔芋胶和玉米淀粉混合物黏弹特性的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(20): 6788–6792.
- WANG Y, PEI JY, XU M, *et al.* Study on viscoelastic properties of konjac gum and cornstarch mixture [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(20): 6788–6792.
- [30] IGUAL M, CONTRERAS C, MARTÍNEZ-NAVARRETE N. Colour and rheological properties of non-conventional grapefruit jams: Instrumental and sensory measurement [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 56(1): 200–206.
- (责任编辑: 韩晓红 郑 丽)

作者简介



李 月, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全、功能性食品研发及功能评价。
E-mail: 15531313962@qq.com

王永霞, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品加工与质量安全控制。
E-mail: wyxhd2004@126.com

关军锋, 博士, 研究员, 主要研究方向为果品贮藏加工。
E-mail: junfeng-guan@263.net