

蜂蜜流变性研究现状及发展趋势

陈桂云, 黄玉萍, 陈坤杰*
(南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031)

摘 要: 食品(农产品)物料的流变特性, 是反映食品物料品质和物理特性的重要参数, 在食品品质检测、加工工艺设计和加工设备的开发中起着重要的作用。本文综述了目前国内外在蜂蜜流变模型、蜂蜜黏度计算、蜂蜜微观流变性和蜂蜜黏弹性方面的研究成果和研究现状, 归纳出目前蜂蜜流变研究存在的问题, 指出未来蜂蜜流变性研究, 应以流变成因为核心, 从蜂蜜流变微观机制的理论研究、流变性的归因确证实验研究、实验手段和数据处理方法的优化更新、流变性在蜂蜜品质及真假鉴定上的应用4个维度进行进一步深入研究和探讨。

关键词: 蜂蜜; 流变性; Newton流体; 黏度

Research Status and Development Trend of Honey Rheology

CHEN Gui-yun, HUANG Yu-ping, CHEN Kun-jie*
(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: The rheological properties of food (agropducts) is the key factor to reflect the quality and physical properties of food products and is of great importance in the research of food quality testing, processing design and development of processing machine. This paper reviews the state of the art studies on rheological model for honey, the viscosity calculations, microscopic viscoelastic rheology and honey viscoelasticity. The current issues for honey rheological study was summarized in this paper and the future research to carry on was pointed out that more emphasis should be paid on the cause of honey rheological property as well as the microscopic mechanism of honey rheological theory. Verification experiment and updating of methodology and data processing should be conducted to discover the honey rheological causes so as to monitor the honey quality control.

Key words: honey; rheology; Newtonian; viscosity

中图分类号: TS201.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)19-0376-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201319076

食品加工中, 液态农业物料的流变属性是重要的质量控制参数。未结晶的新鲜蜂蜜在常温常压下一般表现为液态, 是典型的液态农业物料。其流变学性质, 即蜂蜜在外力作用下形变、流动以及时间作用下的表现对蜂蜜的生产、加工、输运、存储都具有重要意义, 深刻影响着蜂蜜的最终品质。由国内外蜂蜜的流变性研究报道可知, 蜂蜜的流变属性比较复杂, 因不同植物源种类、产地、加工方法等的不同可能会有很大的差别。以至于国际食品法典委员会蜂蜜标准和我国GB 14963—2011《食品安全国家标准 蜂蜜》都仅仅规定蜂蜜可以是液体的、黏滞的、部分结晶或完全结晶的^[1-2]。而对蜂蜜的流变学性质未做出任何规定。深入研究蜂蜜的流变属性可以进一步丰富蜂蜜的流变特性基础数据, 推进蜂蜜流变特性的规律性认识和各种蜂蜜质量标准的进一步完善。本文综述了国内外各种蜂

蜜流变性研究结果, 指出其中存在的问题, 展望了未来深入研究蜂蜜流变性的基本趋势。

1 国内外研究进展

1.1 蜂蜜的流变模型

蜂蜜的流变形态是国内外的各种研究焦点之一。围绕着蜂蜜究竟是宾汉体还是Newton流体, 是否具有假塑性、触变性, 是否有剪切变稠和剪切变稀特性, 蜂蜜流变形态的影响因素等问题展开了各种研究。研究结果因地域、时间、蜂蜜种类及研究方法等的不同而各不相同。

我国潘君拯等^[3]学者于1988—1993年对蜂蜜流变性做了连续研究, 并于1998年对中国产蜂蜜流变性质作了系统阐述, 在1988年的首次研究中指出: 蜂蜜的通用流变

收稿日期: 2012-09-24

基金项目: 江苏省优势学科建设项目; 江苏省农机局农机基金项目(GXZ11002)

作者简介: 陈桂云(1971—), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为农产品检测与加工技术。E-mail: chgy93@gmail.com

*通信作者: 陈坤杰(1963—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品检测与加工技术。E-mail: chenkunjie@njau.edu.cn

模型是Bingham模型,满足本构方程: $\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$, 式中: τ 为剪应力/Pa; τ_0 为屈服应力/Pa; η 为塑性黏度/(Pa·s); $\dot{\gamma}$ 为剪切率/s⁻¹。蜂蜜被归属为塑性流体,或者说是宾汉体。在后续的3篇研究论文^[4-6]中这一论断一直被保持。而1990年,潘君拯等^[7]观点发生改变,认为应该用Newton模型作为蜂蜜的通用流变模型,其本构方程为 $\tau = \eta \dot{\gamma}$ ^[7]。1993年的论文中,潘君拯等^[8]进一步给出了Bingham模型作为蜂蜜流变模型不合理的理由:观察发现蜂蜜的屈服应力一般很低,在剪应力—剪切率线图上截距很小。蜂蜜黏度较高时,屈服应力出现负值。这个负值虽然很小,显然是不合理的。经典方法将剪切率的观测值作为无误差处理。利用上述方法并不能判定蜂蜜屈服应力的最佳值为0,用另一种数据处理方法—*t*检验法证明认为蜂蜜属Newton流体。同年,鲁亚芳等^[9]也指出蜂蜜属Newton流体。潘君拯在文献[5-6]中还研究了蜂蜜触变性,发现新西兰蜜和昆山蜜(黏度较高)触变性很明显,而南京蜜(黏度较低)触变性极不显著。指出含水量高是南京蜜黏度低的原因,但未说明触变性高低与黏度高低是否直接相关。1994年陆则坚等^[10]研究指出:紫云英蜂蜜和白砂糖溶液以及二者的混和液都适用Newton流体模型。同年,唐继国等^[11]又指出槐花蜜并非为简单的牛顿流体,而是一种假塑性流体,符合幂率方程: $\tau = K \dot{\gamma}^n$, 式中: τ 为剪应力/Pa; $\dot{\gamma}$ 为剪切率/s⁻¹; K 为稠度系数/(Pa·s^{*n*}); n 为非牛顿指数,有剪切变稀的特点。曲线有弯向 $\dot{\gamma}$ 轴的趋势,表观黏度随 $\dot{\gamma}$ 增大而减小。并且水分含量越小时非牛顿性越明显。潘君拯等^[12]在1998年对中国产蜂蜜流变性质作系统阐述时,再次指出蜂蜜是Newton流体。曾哲灵^[13]2007年指出:在较低温度和较小剪切力或较小剪切应变下,中国产金银花蜜、枣花蜜、紫云英蜜、枸杞蜜、洋槐蜜和椴树蜜呈现一定程度的触变性或胀塑性。随着温度的升高或剪切力的增大,其触变性或胀塑性程度又逐渐消失。蜂蜜的流变形态不稳定,随温度、水分含量和剪切力的改变,其流变形态由非Newton型转变为Newton型。任振峰^[14]2011年实验显示刺槐蜜是牛顿流体。隋丽敏等^[15]2011年确立了国产紫云英蜂蜜和高果糖浆的Bingham流体模型,指出紫云英蜂蜜和高果糖浆在低剪切速率范围内呈现出一定的假塑性特点,随着剪切速率的增高,其假塑性程度逐渐消失。以往国内研究认为蜂蜜是Newton流体,是因为研究者主要采用恒温变速旋转黏度计的方法测定蜂蜜的黏度,这种方法很难在很低的剪切速率范围内取点研究,研究区间一般是在剪切速率为5s⁻¹以后。但是实验中蜂蜜屈服应力很小,若忽略不计,认为Newton流体也合理。

在大部分国外研究论文中,蜂蜜被认为是Newton流体,具有无倚时性^[16-21]。但也有研究有不同发现。荞麦蜜、石楠蜜和白苜蓿蜜、新西兰麦卢卡树蜜、印第安卡

位蜜都被指出有触变性。Munro^[22]1943年指出胶质的存在决定着蜂蜜的触变行为。用加热使其凝固的方法从样品中去除胶质(可能是蛋白质)会导致这种触变性的丧失及黏度的永久上升^[16-17,22]。胀流性(触稠性)是又一种非牛顿反应。Rao等^[23]1977年指出尼日利亚蜂蜜和几种桉树蜜具有剪切变稠特性,这一特性被归因于其中右旋糖酐(葡萄糖聚糖)高分子聚合物的存在。桉树蜜的胀流性(触稠性)由其中存在的7.2%的右旋糖酐引起。如果这个右旋糖酐被从蜂蜜中分离出去,系统的胀流性会随着消失。与此类似,如果少量右旋糖酐被放入牛顿流体的蜂蜜中,系统又会表现出胀流性现象^[16-17,23]。Diego等^[24]2006年指出加利西亚蜂蜜在低剪切率下所有情形中都表现出假塑性体行为。Mora-Escobedo等^[25]2006年指出:墨西哥蜂蜜中结晶体的存在改变了流变行为使得蜂蜜从Newton流体变为非Newton流体。Ahmed^[26]、Smanalieva^[27]、Witczak^[28]等分别于2007、2009、2011年指出:来自同样环境和产地的蜂蜜在流变性上因植物源不同而显著不同,部分蜂蜜样品呈现出具有确定屈服应力的非Newton流体行为。

1.2 蜂蜜黏度的影响因素及定量分析

黏度是蜂蜜流变性的核心参数,也是蜂蜜生产、加工、输送、贮存的重要技术参数,影响着蜂蜜的最终品质。因此蜂蜜黏度成因及影响因素研究具有重要意义。黏度研究,是国内外蜂蜜流变性研究焦点之二。其研究方法主要是宏观的实验研究,通过实验数据拟合出对应的经验公式,并据此给出关于黏度影响因素的定性和定量的论断。

1.2.1 蜂蜜黏度的影响因素及相关理论

牛顿在阐述黏性定律时曾指出黏性源于液体本身的内摩擦,由于各种液体分子的大小、质量、形状和化学性质等不同,其黏性也不同^[29]。蜂蜜流变形态大部分研究结论趋向于牛顿流体,因此该解释也大致适用。深入研究指出:蜂蜜的黏度行为是蜂蜜中糖类物质、水分、胶体、和其他组分的共同作用结果^[16],并跟外界温度有较大关系。其中,含水量对黏度影响极为显著。黏度随含水量增加按指数规律下降。蜂蜜中水分含量从13%到29%不等,这是各种蜂蜜黏度差异的最主要因素。温度对蜂蜜黏度具有重要影响,黏度随温度上升而下降。Munro^[22]于1943年指出在低于15℃的低温段,温度对黏度影响最大,而高于30℃的加热几乎没有什么实际影响。影响蜂蜜黏度的其他因素是不同蜂蜜独特的糖分组成和蜂蜜中胶质的数量和类型。黏度属性由蜂蜜中糖类物质的分子链长度所决定。蜂蜜中最主要的糖类是单糖(葡萄糖和果糖),同时有少量的二糖(麦芽糖和蔗糖)。就同等质量而言,在一个溶液中二糖对蜂蜜黏度的贡献要甚于单糖^[16]。陆则坚等^[10]认为蜂蜜黏度会随蔗糖含量升高而下降,可据此鉴别糖溶液掺假。Munro^[22]指出胶质的存在

决定着蜂蜜的触变行为, 去除胶质会导致触变性丧失及黏度的永久上升^[22]。董怡为等^[30,16]认为蜂蜜的流变热力学特性可用过渡状态理论解释, 流动活化能和活化熵是流体流动受热过程中的重要指标, 给出了蜂蜜黏度与温度, 活化能和活化熵的热力学关系。黏度大的蜂蜜, 活化能大。活化能反映黏度对温度变化的灵敏度。活化能高, 意味着该蜂蜜黏度对温度改变, 反应相对更灵敏些。

1.2.2 蜂蜜黏度的定量分析——黏度计算的方程

关于蜂蜜黏度的实验研究主要围绕着黏度与含水量和温度之间的关系, 研究成果集中表现为几个经验公式。

1.2.2.1 黏度与含水量关系式

潘君拯等^[7]通过实验研究, 归纳出黏度随含水量关系的经验公式: $\eta = Ce^{-Dw}$, 式中: w 为含水量/%; C 、 D 为系数。该经验公式表明, 蜂蜜黏度随含水量增加按指数规律下降。

唐继国等^[11]总结出在剪切率 $\dot{\gamma}=100$ 时水分含量 w 对槐花蜜的表观黏度 η_a 影响的经验公式: $\eta_a = aw^b$, 式中: w 为含水量/%; a 、 b 为系数, 其中 b 是负数, 随温度不同, 取值在 $-2.6 \sim -3.4$ 之间。表明蜂蜜黏度随含水量增加而下降, 其中 $\ln \eta_a$ 与 $\ln w$ 具有线性关系。

1.2.2.2 黏度与温度关系式

研究中被验证或引用较多也很有名的黏温公式是Arrhenius公式(多用于 0°C 以上温度)^[11,16-17,19-20,31]和Williams-Landel-Ferry公式(一般用于 0°C 以下温度, 需要知道蜂蜜的玻璃化温度及玻璃化温度下的蜂蜜黏度)^[17,19,32-33]。

1) Arrhenius公式

Arrhenius公式为: $\mu = \mu_0 \exp(E_a/RT)$, 式中: μ 为黏度/(Pa·s); μ_0 为常数; E_a 为活化能/(J/(g·mol)); R 为普适气体常数/(8.314 J/(kg·K)); T 为热力学温度/K。常数 μ_0 和活化能 E_a 可以根据 $\ln \mu$ 和 $(1/T)$ 之间的线性关系作图求得。

Arrhenius公式本是瑞典化学家Arrhenius根据实验结果, 总结出的化学反应的速率常数与温度之间的关系式, 后被研究者引入到富糖液态食品, 譬如: 果汁、糖浆和蜂蜜中, 用于说明黏温关系。在蜂蜜的黏温关系研究中, 它不断地被验证是个很好的经验公式。唐继国等^[11]、Ren Zhenfeng等^[34]指出温度对中国槐花蜜黏度的影响符合Arrhenius公式, Bhesh^[16]、Brenda^[17]、Schellart^[31]等指出澳大利亚蜂蜜和葡萄糖浆都遵循Arrhenius公式。Lesław等^[19]指出7种波兰蜂蜜, Cohen等^[20]指出以色列天然蜂蜜和低卡路里蜂蜜, 也遵从Arrhenius公式。

2) Williams-Landel-Ferry公式^[32,17,19]

$$\text{WLF Equation为: } \ln\left(\frac{\eta}{\eta_g}\right) = \frac{C_1 \times (T - T_g)}{C_2 + (T - T_g)}$$

式中: η 为黏度/(Pa·s); η_g 为玻璃化温度下的黏度/(Pa·s); T 为绝对温度/K; T_g 玻璃化温度/K; C_1 、 C_2 为普适常数($C_1 = -40.16$, $C_2 = -51.60$)^[19]。将玻璃化温度及对应黏度数据代入该公式, 可以求得温度 T 时的某种蜂蜜黏度。

Sopade等^[33]2002年比较了4个模型(WLF, Arrhenius, Vogel-Tammann-Fulcher (VTF), Power-Law) 对蜂蜜黏温关系的描述, 发现WLF模型最适合, 但是用WLF常数的“通用”值去预测黏度的温度依赖性, 结果很差。研究从实验的非线性回归分析, 获得了不同于通用值的蜂蜜WLF模型的常数。研究还用差热扫描量热仪测得蜂蜜的玻璃化转变温度范围是: -40°C 到 -46°C 。Lazaridou等^[32]2004年发现对于不同样品的黏度数据, WLF方程非常符合。他用差热扫描量热仪测得蜂蜜的玻璃化转变温度(根据其组成在 -34°C 和 -47°C 之间变动)。

3) 其他黏度与温度关系经验公式

潘君拯等^[7]指出黏度随温度关系可用下列方程表示: $\eta = Be^{-AT}$, 式中: T 为温度/ $^\circ\text{C}$; A 、 B 为系数。该经验公式表明, 蜂蜜黏度随温度增加按指数规律下降。还有上述提及的Vogel-Tammann-Fulcher (VTF)、Power-Law模型^[33]等, 在此不再赘述。

1.2.2.3 黏度与含水量及温度总关系式

潘君拯等^[8,35]指出中国产蜂蜜黏度随水分和温度变化的规律可表示为 $\ln \eta = 95.6 - 0.310w - 0.085t$, 式中: w 为含水量/%; t 为温度/ $^\circ\text{C}$ 。据此可作国产蜂蜜的水分-温度-黏度图。

唐继国等^[11]指出可用下式来描述温度和水分对槐花蜜表观黏度的影响: $\eta_{a,100} = 2.84952 \times 10^{-10} \times e^{\frac{4976.43}{T}} \times w^{-3.02172}$, 式中: $\eta_{a,100}$ 指 $\dot{\gamma}=100$ 时的表观黏度; T 为绝对温度/K; w 为水分含量/%。

鲁亚芳等^[35]指出蜂蜜黏度与含水量和温度之间存在关系如下: $\eta = 1.42 \times 10^4 e^{-31.0w - 0.085t}$, 式中: w 为含水量/%; t 为温度/ $^\circ\text{C}$ 。同时还给出了糖蜜黏度与其成分(含水量、还原糖量、蔗糖量)及温度的经验关系式。

1.3 蜂蜜微观流变性

Cohen等^[20]2010年利用热涨落追踪微观粒子方法研究了几种以色列天然蜂蜜和低卡路里蜂蜜的微观流变性并与传统流变性结论进行了比较。粒子追踪微观流变学在过去十多年中已成功地应用于复杂流体的研究中。在粒子追踪中, 黏度在亚微米的尺度上被测量。研究认为天然蜂蜜和低卡路里的蜂蜜都是Newton流体, 黏度对温度和成分具有依赖性, 提供了蜂蜜不同组分对其流变性的贡献情况。认为蜂蜜的黏温性遵从Arrhenius公式, 黏度随温度按指数规律下降。Arrhenius公式中的活化能和黏度都与蜂蜜含水量有关。研究表明微观流变性和传统流变性一致, 蜂蜜在宏观微观两种尺度上都是Newton流体。高黏度样品能够使用粒子追踪的微观流变学来准确界定特征, 对流变学提供了进一步的资料。

1.4 蜂蜜的黏弹性

对于黏弹性物料除了可以进行蠕变和应力松弛这类静力测试外, 还可对物料施加一定频谱范围内的正弦振

动作用,研究材料的动态流变属性。通过这种测试可以求得3个物理量:反映固体行为的储能模量 G' 、反映液体行为的耗能模量 G'' 、度量对流动全面抵制的复数黏度 η^* 。它可以测量能量耗散和频率的关系,进一步与静力测试比较来建立相关模型^[29]。

Kulmyrzaev等^[36]2000年用超声光谱方法测出了蜂蜜动态剪切模量和动态黏度,指出该法可无损测量蜂蜜的高频动态流变性,来应用于蜂蜜质量控制。Yoo等^[37]2004测试了韩国蜂蜜在动态剪切作用下随温度变化的流变行为。指出蜂蜜样品表现出液体特性,耗能模量 G'' 远大于储能模量 G' ,都随着作用的频率增加而增加,表现出对频率的高依赖性。复数黏度的数值与作用频率无关,表现出牛顿流体的稳定性。这种行为是大分子溶液液体的典型行为。在整个0~30℃的温度范围,表观活化能 ΔH 随温度和水分上升而下降。Kim等^[38]2010年指出动态流变参数与玻璃化温度比,更相关于含水量,0℃以下的动态流变测试是评估蜂蜜质量的更好的物理参数。

Ahmed等^[26]指出,振动流变数据显示蜂蜜耗能模量 G'' 胜过储能模量 G' ,部分蜂蜜样品呈现出具有确定屈服应力的非Newton流体行为。来自同样环境和产地的蜂蜜因植物源不同而在流变属性上显著不同,植物源在蜂蜜品质参数上起重要作用。Witczak等^[28]2011年指出石南蜜呈现出非Newton流体的,随趋向屈服应力而剪切变稀行为,同时还具有触变性。耗能模量 G'' 同样压倒储能模量 G' ,复数黏度对角频率具有显著依赖性。OH等^[39]评估了具有不同含水量(16.2%~20.1%)的27个韩国蜂蜜在不同温度(-5、0、5、10、20℃)条件下的动态流变属性,并将其与含水量进行相关。指出低于0℃的 G'' 与含水量之间有很好的相关性,可应用于蜂蜜质量评估。

1.5 蜂蜜流变性的应用

Wei Zhenbo等^[40]2010年用流变仪来给5种不同品种、5种不同产地的洋槐蜜分类来研究基于流变属性的蜂蜜品种和产地鉴别。用了4种模式识别技术:主成分分析(PCA)、簇类分析(CA)、偏最小二乘(PLS)和支持向量机(SVM)。研究发现这4种模式识别技术基本上都能够很好地鉴别蜂蜜品种和产地,具有径向基函数内核的最小二乘支持向量机(LS—SVR)分析法工作最有效。

Schellart等^[31]2011年测试了3种品牌蜂蜜和3种葡萄糖浆的剪切应力、剪切率和温度对动态黏度作用效果的流变学属性以及它们的密度,以确定它们是否适合使用于地质过程的模拟和流体动力学模型中。研究发现所有葡萄糖浆和蜂蜜的黏度都独立于剪切应力(没有应变硬化和软化),葡萄糖浆的应力指数几乎等于1,而蜂蜜应力指数在1.007~1.026之间。结果说明葡萄糖浆和蜂蜜(较小程度)很适合使用在模拟和流体动力实验中,可用来建模地质过程。

Yoo等^[41]2012年发现冷却过程中动态流变性测试可以检测蜂蜜转化糖掺假。测试了冷却过程(0到-14℃的动态模量,评估了用不同比例转化糖(0、10%、20%、30%、40%)加入蜂蜜后的动态流变属性。结果表明转化糖的存在降低了损耗模量,这种降低可以看做蜂蜜转化糖掺假的一个很好标记。

2 蜂蜜流变性研究尚存的主要问题

第一,现有蜂蜜流变性的定性定量结论皆来自实验结果的分析,缺乏对流变性质成因的理论解释,蜂蜜流变成因的微观机制尚不清楚;第二,蜂蜜流变形态非常复杂,大多数蜂蜜为Newton流体,但也有部分研究报道认为蜂蜜表现出非Newton流体特征。究竟是哪些因素在影响蜂蜜的流变行为?蜂蜜流变形态的改变与哪些因素有关尚未有深入的研究报道,也未见蜂蜜的流变属性在蜂蜜加工贮运中的相关研究报道;第三,虽然已有相关的研究报道,但不同植物源和产地对蜂蜜流变属性有着怎样影响?能否利用蜂蜜的流变特征来鉴别蜂蜜品种和产地?目前还处于初步研究状态,需要进一步加强;第四,关于糖类物质对蜂蜜黏度的影响,现有的研究文献经常给出矛盾的结论。另外,单糖和多糖对蜂蜜黏度的不同影响和作用,现有研究还缺乏实验数据的有力支持,需要更多的实验证明。

3 蜂蜜流变性研究的发展趋势及展望

未来蜂蜜流变性研究将以流变成因为核心,从理论、实验、方法、应用4个维度做进一步深入研究,具体表现为以下几个研究趋势:第一,蜂蜜流变成因的理论研究。从物理等基础学科原理出发,对蜂蜜类的大分子溶液微观建模,进行各种流变性的归因研究,给出流变成因的微观机制,对宏观流变表现给出更深入的理论解释;第二,更深入的蜂蜜流变成因的实验研究。譬如每种流变性的归因确证研究,包括流变形态归因、触变性归因、胀流性归因、黏度归因等。还有黏度高低是否确实影响触变性表现,如何影响?相同温度下相同含水量的蜂蜜和糖溶液是否确实存在规律性的黏度差异,且这种差异是否是由蔗糖含量所引起?这些都需要更深入的实验探究;第三,引进更先进的实验手段和数据处理方法来研究蜂蜜流变性。如前所述,微观流变性实验方法、动态流变性测试引进蜂蜜流变性研究带来了蜂蜜流变性新的实验支撑。实验仪器及方法的升级,数据处理方法的优化,影响着蜂蜜流变性研究结论。未来这种影响必将继续出现;第四,蜂蜜流变性的应用研究。如蜂蜜流变特性在加工贮运中的应用,蜂蜜品质与流变特性

的关系, 掺假对流变性的影响等。如何利用流变性的改变来鉴别蜂蜜真假, 不同植物源及不同产地对蜂蜜流变性影响等的各种应用研究, 将会随着蜂蜜掺假的日益严重而成为蜂蜜流变性研究未来的主要发展方向。

参考文献:

- [1] 国家质检总局. GB/T 14963—2011 食品安全国家标准 蜂蜜[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] Codex Alimentarius Committee on Sugars. Codex standard 12, Revised Codex Standard for Honey[S]. 2001.
- [3] 潘君拯, 谭群. 南京市售蜂蜜的流变特性(第1报): 蜂蜜的流变模型[J]. 农业工程学报, 1988(4): 84-88.
- [4] 潘君拯, 谭群. 南京市售蜂蜜的流变特性(第2报): 蜂蜜表观黏度与温度的关系[J]. 农业工程学报, 1988(4): 89-94.
- [5] 潘君拯, 谭群. 南京市售蜂蜜的流变特性(第3报): 蜂蜜的触变性[J]. 农业工程学报, 1988(4): 96-102.
- [6] 潘君拯, 谭群. 新西兰蜂蜜、崑山洋槐蜜与南京市售蜂蜜流变特性比较[J]. 农业工程学报, 1989, 5(4): 54-63.
- [7] 潘君拯, 谭群. 蜂蜜的流变特性[J]. 自然杂志, 1991, 14(6): 476-477.
- [8] 潘君拯, 陈青春, 鲁亚芳. 蜂蜜流变模型及水分-温度-黏度图[J]. 食品科学, 1993, 14(5): 9-13.
- [9] 鲁亚芳, 董怡为. 蜂蜜品质的流变学检验法探讨[J]. 食品科学, 1993, 14(12): 51-54.
- [10] 陆则坚, 郑宝东, 陈丽娇. 蜂蜜流变特性及其质量鉴定[J]. 农业工程学报, 1994, 10(2): 114-117.
- [11] 唐继国, 武玉斌, 王淑兰. 槐花蜂蜜的流变性能[J]. 青岛化工学院学报, 1994, 15(4): 311-317.
- [12] PAN Junzheng, JI Changying. General rheological model for natural honeys in China[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(2): 165-168.
- [13] 曾哲灵. 蜂蜜的热稳定性及流变和真空脱水特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [14] 任振锋. 糖类熔体的脆性研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [15] 隋丽敏, 李爽, 俞冬, 等. 植物糖浆对紫云英蜂蜜流变特性影响的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 164-166.
- [16] BHESH B, BRUCE D, SAMUEL C. Rheology of selected Australian honeys[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 41: 65-68.
- [17] BRENDA M, BHESH B, BRUCE D, et al. Use of an Arrhenius model to predict rheological behaviour in some Australian honeys[J]. Lebensm-Wiss u-Technol, 2000, 33: 545-552.
- [18] BASIM A J, ABD A M G, KAMAL I M A M, et al. Heat effect on rheology of light- and dark-colored honey[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 51: 33-38.
- [19] LESLAW J, TERESA F. Rheology of selected Polish honeys[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75: 43-49.
- [20] COHEN I, WEIHS D. Rheology and microrheology of natural and reduced-calorie Israeli honeys as a model for high-viscosity Newtonian liquids[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100: 366-371.
- [21] YANNIOTIS S, SKALTSI S, KARABUMIOTI S. Effect of moisture content on the viscosity of honey at different temperatures[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72: 372-377.
- [22] MUNRO J A. The viscosity and thixotropy of honey[J]. Journal of Entomology, 1943, 36: 769-777.
- [23] RAO M A. Rheology of liquid foods: a review[J]. Journal of Texture Studies, 1977, 8: 135-168.
- [24] DIEGO G D, NAVAZA J M, LOURDES C. Quintans-riveiro rheological behaviour of galician honeys[J]. Eur Food Res Technol, 2006, 222: 439-442.
- [25] MORA-ESCOBEDO R, MOGUEL-ORDONEZ Y, JARAMILLO-FLORES M E, et al. The composition, rheological and thermal properties of Tajonal (*Viguiera dentata*) Mexican honey[J]. International Journal of Food Propertie, 2006, 9(2): 299-316.
- [26] AHMED J, PRABHU S T, RAGHAVAN G S V, et al. Physico-chemical, rheological, calorimetric and dielectric behavior of selected Indian honey[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79: 1207-1213.
- [27] SMANALIEVA J, SENGE B. Analytical and rheological investigations into selected unifloral German honey[J]. Eur Food Res Technol, 2009, 229: 107-113.
- [28] WITCZAK M, JUSZCZAK L, GAIKOWSKA D. Non-Newtonian behaviour of heather honey[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104: 532-537.
- [29] 李瀚如, 潘君拯. 农业流变性导论[M]. 北京: 中国农业出版社, 1990: 19.
- [30] 董怡为, 鲁亚芳. 蜂蜜的流变热力学特性研究[J]. 食品科学, 1996, 17(1): 9-12.
- [31] SCHELLART W P. Rheology and density of glucose syrup and honey: Determining their suitability for usage in analogue and fluid dynamic models of geological processes[J]. Journal of Structural Geology, 2011, 33: 1079-1088.
- [32] LAZARIDOU A, BILIADERIS C G, BACANDRITSOS N, et al. Composition, thermal and rheological behaviour of selected Greek honeys[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64: 9-21.
- [33] SOPADE P A, HALLEY P, BHANDARI B, et al. Application of the Williams-Landel-Ferry model to the viscosity-temperature relationship of Australian honeys[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 56: 67-75.
- [34] REN Zhenfeng, BIAN Xiufang, LIN Lejia. Viscosity and melt fragility in honey-water mixtures[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(4): 705-710.
- [35] 鲁亚芳, 董怡为. 温度对蜂蜜品质流变学检验法的影响[J]. 食品科学, 1993, 14(12): 3-5.
- [36] KULMYRZAEV A, MCCLEMENTS D J. High frequency dynamic shear rheology of honey[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45: 219-224.
- [37] YOO B. Effect of temperature on dynamic rheology of Korean honeys[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65: 459-463.
- [38] KIM M J, OH J H, YOO B S. Relationships between moisture content and physical properties of Korean honeys[J]. International Journal of Food Engineering, 2010, 6(6): 1556-3758.
- [39] OH J H, YOO B. Effect of temperature on the relationship between moisture content and dynamic rheological properties of Korean honey[J]. Food Sci Biotechnol, 2011, 20(1): 261-265.
- [40] WEI Zhenbo, WANG Jun, WANG Yongwei. Classification of monofloral honeys from different floral origins and geographical origins based on rheometer[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96: 469-479.
- [41] YOO B. Measurement of dynamic rheology during cooling of honey-invert sugar mixtures by small-deformation oscillatory rheometry[J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(4): 1217-1220.