DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250419003
引用格式: 曹潇, 陈箱宇, 李福香, 等. 流变仪在乳制品口感研究中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(1): 161–168.
CAO X, CHEN XY, LI FX, *et al*. Advances in the application of rheometers in mouthfeel study of dairy products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 161–168. (in Chinese with English abstract).

流变仪在乳制品口感研究中的应用进展

曹 潇[1,2], 陈箱宇[1,2], 李福香[1,2], 程文雪[1], 熊舟翼[2*], 陈思谦[1*]

(1. 东莞理工学院分析测试中心, 东莞 523808; 2. 东莞理工学院生命健康技术学院, 中国轻工业健康食品开发与营养调控重点实验室, 东莞 523808)

摘 要: 口感是决定乳制品品质与消费者偏好的核心感官属性。对口感进行准确的评估对产品开发和质量控制至关重要。传统感官评价方法依赖人工主观评分, 存在可重复性差、标准化程度低等局限。而基于流变仪的流变和摩擦表征技术, 通过量化乳制品的流动性、黏弹性以及润滑性等物理属性, 为提升口感评估的精准度与客观性提供了方法。本文系统综述了通过配备摩擦模块的流变仪, 测量流变学参数和摩擦学参数, 协同表征乳制品口感属性的工作机制和测量方法, 探讨了该技术在常见乳制品如液态乳、酸乳、冰淇淋以及奶酪中的典型应用, 并针对该领域目前存在的问题提出了未来改进和发展方向。本文旨在为流变仪在乳制品感官评价中的深入应用以及健康化、功能化产品的精准设计提供思路。

关键词: 乳制品; 流变仪; 口感; 摩擦特性; 流变特性

Advances in the application of rheometers in mouthfeel study of dairy products

CAO Xiao[1,2], CHEN Xiang-Yu[1,2], LI Fu-Xiang[1,2], CHENG Wen-Xue[1], XIONG Zhou-Yi[2*], CHEN Si-Qian[2*]

(1. *Analytical and Testing Center*, *Dongguan University of Technology*, *Dongguan* 523808, *China*; 2. *China National Light Industry Key Laboratory of Healthy Food Development and Nutrition Regulation*, *School of Life and Health Technology*, *Dongguan University of Technology*, *Dongguan* 523808, *China*)

ABSTRACT: Mouthfeel is the core sensory attribute determining the quality of dairy products and consumer preferences. Accurate mouthfeel evaluation is crucial for product development and quality control. Conventional sensory evaluation methods, which rely on subjective manual scoring, have limitations including poor reproducibility and low standardization. In contrast, rheological and tribological characterization techniques based on rheometers, which quantify physical properties such as fluidity, viscoelasticity and lubricity, provide methods for improving the accuracy and objectivity of mouthfeel evaluation. This article systematically reviewed the working mechanisms and measurement methodologies for synergistic characterization of mouthfeel attributes through combined rheological

收稿日期: 2025-04-19
基金项目: 国家自然科学基金委青年项目(32201961); 2023 年东莞市社会发展科技面上项目(20231800938572)
第一作者: 曹潇(1992—), 女, 硕士, 实验师, 主要研究方向为多糖与食品流变学。E-mail: 1920331908@qq.com
***通信作者:** 熊舟翼(1990—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品品质形成与调控机理。E-mail: xzy646590@163.com
陈思谦(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为多糖与食品流变学。E-mail: chensq@dgut.edu.cn

and tribological parameters using rheometers equipped with tribological modules, and discussed representative applications in common dairy products such as liquid milk, yogurt, ice cream and cheese. Furthermore, this article proposed future improvement strategies and development directions to address the existing challenges in this field, aimed to offer valuable insights for in-depth applications of rheometers in sensory evaluation, as well as for precise design of healthy and functional dairy products.

KEY WORDS: dairy products; rheometers; mouthfeel; tribological properties; rheological properties

0 引 言

乳制品的口感品质是决定消费者偏好与市场竞争力的核心因素之一[1]。随着全球健康饮食观念的普及，消费者对乳制品的需求已从基础营养供给转向高品质感官体验，这促使了食品工业对口感评价技术提出更高要求。目前，对乳制品口感的评价方法主要依赖感官分析与仪器表征的协同应用[2]。感官分析包括定量描述性分析、暂时性感官支配法和渐进式感官评估分析等，通常是由训练有素的感官评价小组成员对乳制品进行触摸、试吃等测试，并通过使用属性定义和强度量表等手段，描述和量化乳制品的口感及质地[3]。尽管该评价方法能够直接反映消费者的实际体验，但往往存在对品评人员水平要求高，具有耗时、成本高以及难以标准化等缺点。而仪器表征技术常常被作为感官评价的重要补充，具有重现性好、主观偏差性小等优势，可以较好地帮助乳制品相关从业人员在产品开发阶段快速积累物性参数，加快新产品的迭代速度[4]。

相较质构仪、摩擦仪等食品力学表征仪器，流变仪因其对动态黏弹性的测定能力，更适合对乳制品感官品质特征参数进行量化表征。传统流变仪通过稳态/动态剪切流变测试获取表观黏度、屈服应力、线性/非线性黏弹性模量等参数，可有效表征乳制品的厚感、黏弹性等基础质地属性[5]。随着技术的发展，近年来，空气轴承、磁悬浮轴承等配备了极小摩擦轴承流变仪已经逐渐替代了传统的机械轴承流变仪，使测量精度更高，更能准确测量低黏度的液体产品[6]。同时，通过加装不同种类的摩擦测量模块，流变仪进一步实现了对口腔润滑行为的精准模拟，能够量化顺滑感、奶油感等复杂感官指标[7]。这种流变-摩擦联用技术不仅克服了单一模态表征的局限性，还通过构建多力学参数-多感官属性的关联数学模型，显著提升了口感评价准确性[8]。目前，流变仪被认为是描述和预测乳制品口腔质地感知的一种关键技术，已在多种不同类型乳制品的感官优化中取得显著成效，如液态乳、发酵乳、冰淇淋及奶酪等[9−11]。然而，其在乳制品研究中系统性地应用综述尚鲜少见报道。因此，本文从流变仪表征乳制品口感属性的技术原理、应用现状及发展趋势等方面进行归纳总结，以期为乳制品的新产品开发、质地改良、配方优化、感官预测和质量控制等方面提供理论支持。

1 流变仪概述及其表征乳制品口感的技术路径

1.1 流变仪概述

流变仪主要由马达、光学编码器、轴承、法向力传感器、测量夹具以及温度控制附件等核心元件构成。其工作原理是通过马达传递给测量夹具，对样品施加应力或应变，并测量样品受到的扭矩变化，从而实现对材料变形和流动特性的表征[12]。目前，主流的流变仪制造商仍是国际品牌，包括奥地利安东帕(Anton Paar)、美国 TA 仪器(TA Instruments)、德国耐驰(NETZSCH)和赛默飞哈克(HAAKE)等。这些厂商生产的高性能流变仪，其核心技术主要依赖于轴承系统：Anton Paar MCR 系列模块化流变仪采用空气轴承技术，通过气膜悬浮降低摩擦损耗，可测量低至 0.5 nNm 的扭矩，分辨率为 0.1 nNm; TA 仪器开发的磁悬浮轴承流变仪 Discovery HR 系列可实现 0.05~0.1 nNm 的超高灵敏度测量；而 HAAKE MARS iQ 同系列流变仪空气轴承的精度要远高于滚珠轴承[13−15]。此外，流变仪的测量系统可根据测试需求灵活配置，常见类型包括锥板、平行板、同轴圆筒、双间隙、桨式转子、界面测量单元等，能够实现表观黏度、屈服应力或应变、黏弹性模量等多维流变学参数的测定[16]。

而摩擦学相关参数作为乳制品口感评价的关键指标，通常可通过专用摩擦仪和集成摩擦模块的流变仪这两类设备获取[17]。后者凭借模块化设计的优势，减少了单独购买摩擦仪的成本，能够在一台仪器上组合测量流变与摩擦特性，因此在乳制品感官研究中越来越受到研究人员的欢迎。此外，其技术优势还体现在，以 Anton Paar MCR 702 流变仪(配备 T-PTD 200 摩擦副)为例，它能够提供精准法向力控制(分辨率为 0.5 mN)、宽域滑移速度(10^{-5}~3.3×10^{3} mm/s)和温度控制(–40~200 ℃，精度可达 0.01 ℃)，以实现对口腔加工条件的进一步精准模拟[18−19]。配备的摩擦模块因仪器制造商的不同而有所差异，但通常包括一个旋转部分(球或环)和一个固定部分(板、球或销)，通过组合不同几何构型与表面特性来模拟舌颚接触。常见的商用摩擦模块有板上环(半环或全环)、板上球(两球或三球)、球三销、球三板和四球等，上述流变仪已普遍集成了此类模块技术。

1.2 流变仪表征乳制品口感的技术路径

流变仪可通过多模态参数获取与数据关联分析，构

建乳制品物理特性与感官体验的映射关系，其技术路径如图 1 所示。具体工作机制如下：流变仪通过控制温度、剪切速率、应变振幅和频率等参数来改变测量强度或时间尺度，模拟乳制品经牙齿、舌头和口腔的咀嚼、吞咽的行为。同时获取屈服特性、黏弹性参数以及摩擦学参数等表征数据。在进行感官评价测试后，再通过统计学分析方法如层次聚类分析、皮尔逊系数相关分析、偏最小二乘回归分析和主成分分析等，将感官评价结果与流变仪测试参数建立联系，确定特征参数，并构建评价模型，最终实现对乳制品的脂感、厚感和滑感等关键口感属性的高效、精准预测[20]。

2　基于流变仪的常用测量方法

乳制品的口感属性不仅受组成成分和结构影响，还和在口腔加工过程中唾液的接触、舌头的碾磨、牙齿的咀嚼以及吞咽经历的各种外力作用有关。该过程可分为 3 个特征阶段(如图 1 所示)：在刚进入口腔的初始阶段，其整体形变可以通过剪切流变学中的黏度和黏弹性等参数进行表征，而该阶段的口感主要由经咀嚼破碎后食物颗粒的尺寸和形状决定，通常可以与感官属性如“硬度”和“弹性”的描述对应起来；随后食物颗粒和唾液混合，并与口腔黏膜充分接触形成食物团，摩擦以及润滑等表面相互作用起主导作用；最后吞咽阶段，食物团在较高的变形率下流动，口感主要表现为奶油感和糊口感，这通常可以由摩擦系数和屈服应力表征[21]。基于流变仪的流变-摩擦多模态测量技术，能够对乳制品在上述各环节的特征参数进行系统量化，然而使用不同的测试方法对这些环节的表征作用各不相同。表 1 列举了流变仪在乳制品口感评价中的常见测试方法、关键参数及关联的感官属性，并分析了这些测试方法的优势和局限。研究人员在实验设计时，需结合乳制品的类型和特点，针对性地采用适配的流变和摩擦测试方法，来精准解析口感属性。

2.1　稳态剪切测试

剪切流变主要包括稳态剪切和动态剪切两种方法，二者分别通过流变仪的旋转模式和振荡模式进行测量。稳态剪切测试通过流变仪转子连续的旋转来控制剪切应力或应变，从而获得一定的剪切速率，待剪切流动达到稳态时，通过测量应力或应变，获得黏度、屈服应力等参数，进而揭示乳制品在口腔加工中的流动行为[16]。剪切速率的选择是流变学参数与乳制品口感属性关联性研究的关键。SZCZESNIAK 等[30]研究发现，流变仪剪切速率设定在 10~1000 s^{-1} 范围时，其与口腔咀嚼剪切和吞咽阶段的剪切动力学条件适配，此区间的表观黏度对评估乳制品的质地感官具有实际指导意义。进一步研究表明，乳制品的“厚实感”口感一般与低剪切速率(比如 50 s^{-1})下的表观黏度相关性好(相关系数 r>0.95)，这为半固态乳制品的厚感指标量化提供了可靠的流变学指标[31]。然而，作为反映乳制品食用黏稠性的“感官黏性”指标，其精准表征需同时考虑低剪切速率(0.01~10 s^{-1})和高剪切速率(>100 s^{-1})对黏度的影响，因此有必要适当扩大剪切速率的测试范围[32]。不同类型乳制品选择的剪切速率扫描范围不同，比如表 1 中液态乳饮料为 0.01~200 s^{-1}，而半固态乳制品则需扩展至咀嚼高剪切区(1000 s^{-1})。此外，乳制品的口腔感知是多重动态触感的综合体现，除表观黏度外，还需整合稠度系数、流动指数、触变性、屈服应力等稳态剪切参数进行协同分析，单一黏度指标难以全面反映复杂的口感属性[33]。

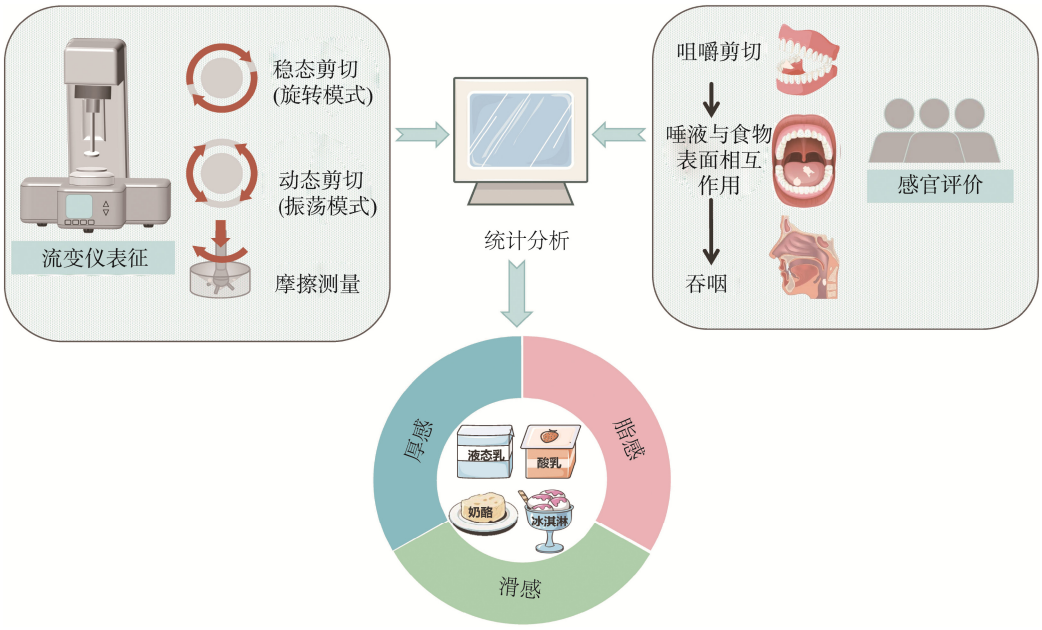

图 1　流变仪表征乳制品口感属性的技术路径图[20]

Fig.1　Technical roadmap of the mouthfeel of dairy products characterized by rheometers[20]

表 1 流变仪表征乳制品口感的测试举例

Table 1 Testing examples of the mouthfeel of dairy products characterized by rheometers

测试类型	设定参数和测量条件	乳制品体系	关键参数	关联口感属性	技术优势/局限	参考文献
稳态剪切	剪切速率: 0.1~1000 s^{-1}, 温度: 35 ℃	奶油奶酪	剪切速率为 50 s^{-1} 的表观黏度	稠厚感	技术成熟、操作简单, 但无法模拟动态口腔加工行为	[22]
	剪切速率: 0.01~200 s^{-1}, 温度: 5 ℃和 25 ℃	发酵乳饮料	表观黏度和屈服应力	黏附性和口腔内流动性		[23]
动态剪切-小幅振荡测试	剪切应变范围: 0.1%~100%, 固定频率: 1 Hz	奶酪	储能模量、损耗模量和动态复数黏度	结构稳定性	适用于评价乳制品未被破坏状态下的口感品质	[24]
动态剪切-频率扫描	频率扫描: 0.01~10 Hz, 剪切应变(线性黏弹区内): 1%, 温度: 37 ℃	乳酸菌饮品	储能模量、损耗模量	弱凝胶弹性感		[25]
动态剪切-温度扫描	温度: –20~10 ℃; 频率: 1.6 Hz; 剪切应变(线性黏弹区内): 0.005%; 升温速率为 0.5 ℃/min	冰淇淋	温度为–15 ℃和–5 ℃时的储能模量以及融化阶段储能模量变化的斜率	口融感	支持相变行为模拟, 但仍无法精确复现口腔温度梯度变化	[26]
动态剪切-大幅振荡测试	应变扫描: 0.1%~1000%, 频率: 1、10 和 25 rad/s, 温度: 6 ℃	酸乳	屈服应力/应变	平滑度和糊口感	更贴近真实口腔加工, 但数据分析处理复杂	[27]
摩擦测量	温度: 37 ℃, 法向应力: 1 N, 滑移速度: 0.10~300 mm/s	奶茶饮品	摩擦系数	顺滑度	相较剪切流变, 能够更有效表征与润滑机制相关的口感	[28]
	温度为 35.00 ℃, 法向应力: 1 N 和 2 N, 滑移速度: 0.01~100 mm/s	奶油奶酪		奶油感		[29]

2.2 动态剪切测试

相较旋转模式, 通过振荡模式进行的动态剪切测试可以反映动态口腔加工过程中乳制品的流变行为。根据应变振幅的不同, 动态测试可分为小幅振荡剪切和大幅振荡剪切测试, 分别用于获取线性和非线性区的黏弹性参数。小幅振荡剪切测试中获得的如储能模量、损耗模量、损耗系数、复数模量、复数黏度等参数均为线性黏弹性参数, 反映在小剪切振幅下, 乳制品中蛋白质网络或脂肪球微观结构的完整性及其对口感的影响[34]。另外, 在线性黏弹区范围内, 通过调整振荡频率、温度或作用时间, 可评估乳制品在口腔动态剪切、温度以及时间等多种因素作用下的黏弹性行为, 为货架期预测与适口性设计提供依据[35]。而相对应的大振幅振荡剪切反映的是乳制品受到较大尺度形变下发生结构破坏后的黏弹行为。大振幅振荡测试中获得的数据通常需要经过信号处理方法以获得谐波数据。常见的分析方法包括基于原始应力-应变速率数据构建的 Lissajous 曲线图、使用傅里叶变换获得谐波数据、基于切比雪夫多项式法的原始应力分解及谐波黏弹性模量的计算等[36]。通过这些方法能提取非线性流变学参数比如最大/小应变弹性模量、最大/小动态黏度、应变硬化比、剪切稀化比以及三阶相对谐波强度比等, 这些参数已被证明有助于描述乳制品的咀嚼硬度、结构脆性和糊口感等口感属性[37]。尽管大振幅剪切测试更接近于真实口腔加工的高应变条件, 但其在乳制品感官研究中的应用仍受限。这可能是由于研究人员对大振幅剪切测试的原理和数据处理方法认识不足, 并且其数据解析需依赖部分信号处理算法, 转化与解读复杂度较高。

2.3 摩擦测试

剪切流变学参数往往难以准确表征乳制品与口腔表面接触时的关键口感属性, 如奶油状、涩感和润滑性等, 而这些属性可以通过摩擦学测量进行表征[38]。在乳制品摩擦学研究中, 一般通过构建 Stribeck 曲线来研究其在舌头、上颚和牙齿间产生的摩擦行为, 该曲线能提供关于摩擦特性和感官属性之间关系的重要信息, 但准确性可能受到多种因素的影响, 如摩擦模块类型、接触材料选择(聚二甲基硅氧烷因其能够模拟猪舌的表面粗糙度且易于调节, 成为目前最常使用的仿生接触材料)、滑移速度(不同滑移速度下的摩擦行为不一样, 0.001~1000 mm/s 能够覆盖口腔运动范围)、温度设定(恒温或动态程序升温, 见表 1)、法向应力大小(通常设定为 1 或 2 N 模拟舌颚接触压力)以及唾液作用(添加含黏蛋白的人工唾液更接近真实口腔环境)等[39]。低黏度液态乳的 Stribeck 摩擦曲线通常呈现典型“反 S”形特征, 对应边界、混合和流体动力 3 种润滑机制的转变(图 2a)。研究表明, 口感评估与其在 Stribeck 曲线所处的位置相关: 低滑移速度下, 舌和上颚表面完全接触, 乳制品润滑作用未充分发挥, 表现为高而恒定摩擦力的边界状态; 随着滑移速度增加, 接触表面部分分离, 乳制品开始起到润滑作用, 引起摩擦系数减小, 此区域润滑机制受流变与摩擦性能共同影响; 在流体动力状态区域时, 高滑移速度使接触表面完全分离开来, 此时流变学行为占主导作用[40]。相比之下, 酸乳等半固态乳制品的 Stribeck 曲线呈现“W”[41](图 2b)或“M”形[27](图 2c)的复杂特征。这些摩擦行为可能是由于酸乳经发酵后形成了较鲜乳更为复杂的结构, 由乳液转化为一种由变性乳清蛋白和

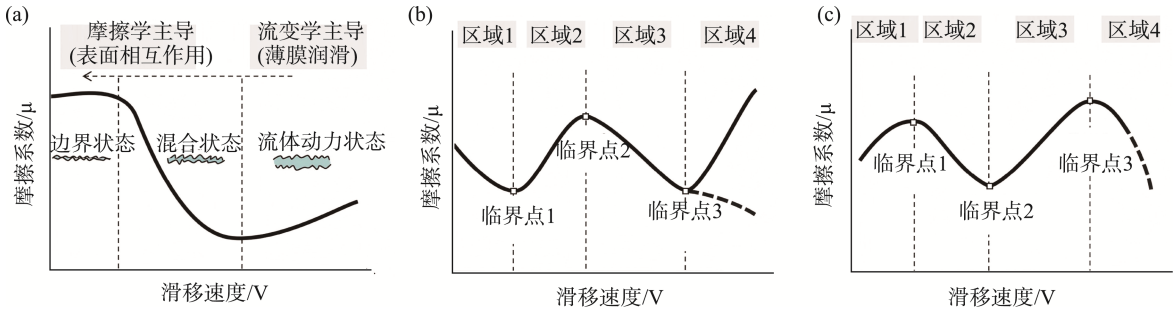

图 2　乳制品中不同形状的 Stribeck 曲线[27,40–41]

Fig.2　Stribeck curves of different shapes in dairy products[27,40–41]

酪蛋白胶束包裹脂肪球形成的交联软凝胶网络, 该结构显著改变了摩擦特性。

3　流变仪在典型乳制品体系口感评价中的应用

3.1　液态乳

液态乳(如牛乳、巧克力乳、乳饮料等)作为低黏度的近牛顿流体, 由于吞咽前几乎不需要咀嚼, 且在口腔中停留的时间较短, 其口感品质主要受在舌/颚间隙的润滑特性与流动行为调控。乳脂肪是液态乳的重要组成分之一, 它通过界面吸附形成润滑膜, 可显著降低口腔摩擦系数和流动行为指数, 赋予全脂乳优异的奶油感、爽滑感和稠厚感[42–43]。然而在低脂化趋势下, 脂肪含量的过度削减会破坏这种润滑机制, 导致摩擦系数骤升, 从而引发涩感与稀薄感等不良口感体验[44]。为平衡健康需求与感官品质, 流变仪通过流变与摩擦组合测试, 为低脂乳脂肪替代策略提供关键技术支撑。在蛋白质类脂肪替代品方面, GODOI 等[45]借助流变仪分析发现, 添加 1.5%胶原肽或微颗粒乳清蛋白可使低脂巧克力味牛乳的稠度系数提高 4 倍, 摩擦系数从 0.4~0.5 降低到 0.28, 感官评分中厚度(11→26)和奶油感(14→25)提升明显, 且改良效果优于明胶。此外, 调整乳清蛋白与酪蛋白的比例, 即使不额外添加亲水胶体, 也能通过二硫键和疏水相互作用提升低脂乳的感官接受度[46]。而在碳水化合物类脂肪替代品的研究中, 如高甲氧基果胶和羧甲基纤维素可作为酸化牛乳饮料的品质改良剂。这些亲水胶体有助于增加表观黏度和屈服应力, 同时降低摩擦系数, 且随着添加量的增加, 产品的感官指标如黏性、顺滑度、乳脂状和稳定性等均得到显著增强[47]。这些研究证实, 流变仪在筛选合适的脂肪替代品类型和浓度方面发挥着关键作用。其应用不仅限于传统低脂液态乳的口感优化, 在新兴的植物基液态乳的产品开发中同样不可或缺。例如, LI 等[48]利用 HAAKE MARS 60 流变仪配备平行板(直径为 35 mm)和摩擦模块对大豆乳进行黏度和摩擦特性同步分析。结果表明, 大豆乳经木瓜蛋白酶水解油体后, 其在 50 mm/s 滑移速度下的摩擦系数从 0.15 降至 0.03, 在 50 s^{-1} 剪切速率下的黏度从 1~2 mPa • s 提升到 10~50 mPa • s, 同时感官奶油感(4.5→6.88)、厚度(4.44→6.81)和光滑度评分(4.06→6.94)得到显著提升。

3.2　酸　乳

酸乳是一类由乳酸菌(比如保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌等)发酵乳糖形成的半固态凝胶体系, 其口感品质与酪蛋白胶束的流变和摩擦特性密切相关[49]。在酸乳口感品质的研究中, 流变仪是一种最常用的分析评价工具。赵红玲等[50]通过稳态剪切测试发现, 黏度值低于 540.6 mPa • s 时酸乳呈现“稀薄感”, 而高于 674.25 mPa • s 则引发“胶质感”, 由此表明了流变仪可量化酸乳适口性的临界值。此外, 结合摩擦学模型, 还可进一步预测酸乳的顺滑感和奶油感等特征口感属性[41]。相较于液态乳, 酸乳的弱凝胶特性使其流变-摩擦行为更为复杂, 因此还需重点结合动态剪切测试, 以深入解析凝胶网络在口腔加工中的黏弹性响应。例如, 在低脂酸乳的开发中, 研究人员通过流变仪研究黏弹性和摩擦特性发现, 添加乳清蛋白-高甲氧基果胶的复配体系, 使储能模量提升 2.5 倍, 摩擦系数降低至 0.28, 可以产生类似于全脂酸乳的感官质地[51]。ESPINOSA-ANDREWS 等[52]通过小/大振幅振荡剪切参数, 有效表征了希腊式酸乳的黏弹性和稳定性口感。SONNE 等[49]通过对搅拌型酸乳进行流变、摩擦特性以及颗粒尺寸的综合评估, 能够提高口感黏稠性(决定系数 r^2=0.83→0.91)和奶油度(r^2=0.89→0.97)的预测能力。上述基于流变仪的技术方法已被成功应用于骆驼乳[53]和羊乳[54]等特色乳源、高品质清洁标签[55]以及植物基[56]等酸乳产品的质地感官品质评价和配方优化。综上, 流变仪为酸乳行业的多元化发展提供了实用且系统的方法, 有助于推动酸乳产品在品质和种类上的不断创新。

3.3　冰淇淋

冰淇淋作为一种由冰晶、空气细胞、脂肪球及未冷冻血清相组成的多相复杂体系, 其口感品质高度依赖于各组分在动态相变中的相互作用[57]。流变仪通过量化黏弹性、屈服应力、剪切稀化以及摩擦行为等关键参数, 成为解析冰淇淋物理特性与感官属性关联的核心工具。刘婷婷等[58]

通过稳态剪切流变测试发现, 冰淇淋浆料的表观黏度与抗融性呈正相关(r=0.82), 表明高黏度血清相可有效抑制冰晶重结晶, 延缓融化速率。此外, 还发现剪切稀化现象有助于开发更佳口感的冰淇淋产品。值得注意的是, 冰淇淋是一种冷冻乳制品, 在口腔加工中经历从–20~37 ℃的相变过程, 其流变和摩擦特性具有显著温度依赖性。赵雯等[57]研究发现, 软质冰淇淋的硬度与绵密口感与温度动态变化的黏弹性参数相关性较强, 而恒温条件下的频率扫描测试数据对口感预测有限, 由此证实温度动态流变测试对冷冻乳制品感官评价的必要性。此外, LIU 等[26]基于振荡热流变仪, 通过测定–20~10 ℃区间内储能模量和损耗模量随温度升高的变化斜率, 来量化清凉感强度, 同时表明损耗系数可作为跟踪冰网融化、脂肪球聚集状态以及蛋白质结构排列的重要参数。进一步结合摩擦学分析, 流变仪可更全面地模拟口腔感知。MEHTA 等[59]采用球三销摩擦模块测试发现, 冰淇淋在不同温度下的摩擦行为明显不同: 在–5 ℃初始状态摩擦系数(滑移速度为 25 mm/s)为 0.42, 而 37 ℃熔化态降至 0.17。同时, 摩擦系数与口融感、颗粒感和稀薄/液体感知呈正相关, 而与硬度、光滑度和感官接受度呈负相关, 且相关性随着温度降低而降低, 这表明 37 ℃时的摩擦系数更适合用于预测冰淇淋口感属性。这种融合温度梯度模拟的流变仪表征技术, 通过优化冰淇淋配方中稳定剂、乳化剂添加的种类和浓度, 能够有效抑制冰淇淋中较大尺寸的冰晶形成和脂肪部分聚集, 改善低脂、低糖、功能性以及植物基等健康型冰淇淋产品的质地和口感缺陷[60–61]。然而, 当前研究多基于恒温条件, 对口腔温度变化的动态模拟不足, 且针对温度依赖性摩擦特性的研究尤为缺乏, 导致了仪器测试数据与真实口感之间仍存在一定的偏差。

3.4 奶 酪

奶酪一般是以动物鲜乳为原料, 经乳酸菌发酵和凝乳酶凝固形成的半固态或固态乳制品[22]。流变仪通过流变和摩擦表征, 为奶酪的口感评估提供关键量化依据。NINGTYAS 等[62]为研究天然形式和酯化形式的植物甾醇作为脂肪替代物对改善低脂奶油奶酪口感属性的效果, 利用 Discovery HR 流变仪(配备板上环摩擦模块)进行表观黏度、黏弹性和摩擦行为测定, 结果表明使用天然形式的植物甾醇使低脂奶油奶酪表观黏度(η_{50}=3.85→5.03)和线性黏弹性模量(G'=5084→10414 Pa, G''=1578→1927.5 Pa)显著增加, 促进黏稠感; 而酯化形式则倾向于增强奶油感的主导优势, 其 Stribeck 曲线下移至与全脂产品相似水平。由于大多数奶酪偏固态, 研究人员常侧重流变仪的动态剪切测试, 特别是非线性黏弹性区比如大幅振荡测试, 它能深入解析奶酪结构和结构分解过程, 为口感研究挖掘更多信息。HUTCHINGS 等[63]通过大幅振荡测试结合感官分析, 成功解释了乳制品与非乳制品奶酪的口感差异: 传统乳源切达奶酪比以淀粉和椰子油为原料的非乳制品的屈服应力高 1.5 倍和屈服应变高 2.2 倍, 而感官评价显示乳制品切达干酪咀嚼评分高 12 倍(更耐嚼)、易碎性低 7 倍(不易碎)。此外, MELITO 等[64]研究证实, 非线性黏弹性参数三阶储能模量强度比(G'_3/G'_1)或最大/小应变储能模量比(G'_L/G'_M)同样可作为流变仪表征不同类型奶酪比如切达奶酪、莫扎里拉奶酪和美式奶酪这些口感属性的重要仪器参数。流变仪还可以用于奶酪口感的温度依赖性研究, 比如对于切达奶酪而言, ZAD-BAGHER-SEIGHALANI 等[65]在设定的温度梯度(5、15 和 25 ℃)下进行了应变扫描测试, 结果表明较高的温度会增大非线性黏弹值, 对应更低的感官硬度。

4 结束语

流变仪作为一种成熟的食品物性学表征仪器, 是感官评价的有力辅助工具。在乳制品口感研究中, 流变仪已被证明能够客观、有效地关联感官评价结果与流变学、摩擦学等参数, 同时也为其他食品的口感研究提供了方法借鉴。但目前, 在口腔真实感知模拟与标准化评价体系构建等方面仍存在一定的局限性。未来研究应重点关注以下这几个方面, 以进一步推动流变仪技术在乳制品口感评价的应用: (1)口腔仿生模块的集成开发。针对乳制品在口腔内经历的温度变化、唾液酶解作用及多模态机械作用等复杂过程, 构建融合剪切、拉伸、压缩和摩擦耦合作用的动态测试平台, 真实复现咀嚼频率、舌颚运动轨迹及吞咽等口腔加工行为; (2)特征参数体系的构建与标准化。结合乳制品流变-摩擦指纹图谱与感官组学数据, 系统解析液态乳顺滑度、酸乳滑润饱满口感、冰淇淋口融感、奶酪醇厚细腻感等关键口感属性所对应的特征仪器参数。借助机器学习算法, 建立适用于不同类型乳制品的测试模式、测试条件及感官预测模型, 实现乳制品口感评价的标准化和科学化; (3)运用流变仪技术, 进一步指导低脂、低糖、高蛋白、植物基、功能性以及适合特殊人群的乳制品创新。

参考文献

[1] 高杰, 润子木, 马蕊, 等. 消费者感官评价对酸奶品质提升的导向研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(21): 6855–6861.
GAO J, RUN ZM, MA R, *et al*. Oriented research of yogurt quality improvement based on consumer sensory evaluation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(21): 6855–6861.

[2] SKARLATOS L, MARINOPOULOU A, PETRIDIS A, *et al*. Texture attributes of acid coagulated fresh cheeses as assessed by instrumental and sensory methods [J]. International Dairy Journal, 2021, 114: 104939.

[3] 蒋靖雯, 林思宇, 易灿, 等. 感官分析技术及其在乳制品中的应用[J]. 中国乳业, 2022(2): 110–116.
JIANG JW, LIN SY, YI C, *et al*. Sensory analysis technology and its application in dairy products [J]. China Dairy, 2022(2): 110–116.

[4] JELLEMA RH, JANSSEN AM, TERPSTRA M, *et al*. Relating the sensory sensation ‘creamy mouthfeel’ in custards to rheological

measurements [J]. Journal of Chemometrics, 2005, 19(3): 191–200.

[5] VELEZ-RUIZ JF, BARBOSA CG, PELEG M. Rheological properties of selected dairy products [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1997, 37(4): 311–359.

[6] MARSH S, RUMMEL F. Rheometry and rheological characterisation [M]. ROSENTHAL A, CHEN JS. Food texturology: Measurement and Perception of Food Textural Properties. Springer, Cham, 2024: 195-216. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41900-3_10

[7] GOH SM, VERSLUIS P, APPELQVIST IAM, *et al*. Tribological measurements of foods using a rheometer [J]. Food Research International, 2010, 43(1): 183–186.

[8] GODOI FC, BHANDARI BR, PRAKASH S. Tribo-rheology and sensory analysis of a dairy semi-solid [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 70: 240–250.

[9] BLOK AE, BOLHUIS DP, VELIKOV KP, *et al*. Spray-dried microfibrillated cellulose particles as texture modifier in liquid foods and their effect on rheological, tribological and sensory properties [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 138: 108398.

[10] ALI LA, PARHI A, SHARMA P. Understanding the effect of structure, composition, and particle size on the oral tribology of solid, semi-solid and liquid dairy foods [J]. International Dairy Journal, 2025, 166: 106212.

[11] ZHU Y, BHANDARI B, PRAKASH S. Tribo-rheometry behaviour and gel strength of k-carrageenan and gelatin solutions at concentrations, pH and ionic conditions used in dairy products [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 292–302.

[12] WALTERS K, KEMP RA. On the use of a rheogoniometer [J]. Rheologica Acta, 1968, 7(1): 1–8.

[13] ANTON-PAAR. The modular compact rheometer series [DB/OL]. [2025-02-18]. https://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=18378&L=0

[14] TA-INSTRUMENTS. Discovery hybrid rheometer brochure [EB/OL]. (2024-07-01) [2025-02-18]. https://www.tainstruments.com/pdf/brochure/TA-Instruments-HR-Brochure-EN.pdf

[15] THERMO FISHER SCIENTIFIC INC. Thermo Scientific HAAKE MARS iQ rheometer series [EB/OL]. (2024-07-24) [2025-02-18]. https://assets.thermofisher.cn/TFS-Assets/CAD/Specification-Sheets/ps54652-haake-mars-iq-en.pdf

[16] VOISEY PW, RANDALL CJ. A versatile food rheometer [J]. Journal of Texture Studies, 1977, 8(3): 339–358.

[17] 汪琦, 朱扬, 陈建设. 口腔软摩擦理论与测量技术及其在食品感官感知研究中的应用[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 222–232.
WANG Q, ZHU Y, CHEN JS. Application of oral soft friction theory and experimental methods in studying food sensory perception [J]. Food Science, 2021, 42(9): 222–232.

[18] FOX D, LYNCH KM, SAHIN AW, *et al*. Soft tribology using rheometers: A practical guide and introduction [J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2020, 79(3): 213–230.

[19] ANTON-PAAR. MCR plus tribology cells: Tribometer brochure [Z]. 2025. https://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=56956&L=0

[20] MEHTA A, KUMAR L, SERVENTI L, *et al*. Exploring the textural dynamics of dairy and plant-based yoghurts: A comprehensive study [J]. Food Research International, 2023, 171: 113058.

[21] 林顺顺, 史家琪, 赵杰, 等. 口腔摩擦学在食品口腔加工中的应用[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 457–464.
LIN SS, SHI JQ, ZHAO J, *et al*. The application of oral tribology in food oral processing [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11): 457–464.

[22] NINGTYAS DW, BHANDARI B, BANSAL N, *et al*. A tribological analysis of cream cheeses manufactured with different fat content [J]. International Dairy Journal, 2017, 73: 155–165.

[23] SANTOS HC, LEONEL GVF, RAMOS LCDS, *et al*. Enhancing dairy sustainability: Rheological, sensory, and physical-chemical properties of low-fat fermented beverages incorporating buttermilk [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 443: 141159.

[24] 杨述, 高昕, 许加超, 等. 不同硬度奶酪的质构及流变特性比较[J]. 食品科学, 2010, 31(21): 50–53.
YANG S, GAO X, XU JC, *et al*. Comparison of cheese samples with different hardness in texture and rheological properties [J]. Food Science, 2010, 31(21): 50–53.

[25] 吴伟都, 朱慧, 李文强, 等. 流变仪原位检测技术在饮料网络结构评价中的应用[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 100–104.
WU WD, ZHU H, LI WQ, *et al*. Application of technology combined rheometer and in-situ determination on network structure evaluation of beverages [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 36(4): 100–104

[26] LIU X, SALA G, SCHOLTEN E. Impact of soy protein dispersibility on the structural and sensory properties of fat-free ice cream [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109340.

[27] LIN YF, MALONEY K, DRAKE M, *et al*. Synergistic functionality of transglutaminase and protease on modulating texture of pea protein based yogurt alternative: From rheological and tribological characterizations to sensory perception [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109652.

[28] 詹敏敏, 杨小双, 王玉牛, 等. 一种基于口腔软摩擦学的奶茶顺滑特性评价模型[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 216–225.
ZHAN MM, YANG XS, WANG YN, *et al*. Oral soft tribology-based model for evaluating the smoothness characteristics of milk tea [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 216–225.

[29] NGUYEN PTM, BHANDARI B, PRAKASH S. Tribological method to measure lubricating properties of dairy products [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 168: 27–34.

[30] SZCZESNIAK AS, FARKAS E. Objective characterization of the mouthfeel of gum solutions [J]. Journal of Food Science, 1962(27): 381–385.

[31] HE Q, HORT J, WOLF B. Predicting sensory perceptions of thickened solutions based on rheological analysis [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 221–232.

[32] ROSS AIV, TYLER P, GABRIELA M, *et al*. Relationships between shear rheology and sensory attributes of hydrocolloid-thickened fluids designed to compensate for impairments in oral manipulation and swallowing [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 263: 123–131.

[33] TANG LY, SHAO JS, NARANJO BM, *et al*. Sugar or milk: Tribological study on the sensation of coffee beverages [J]. Journal of Food Engineering, 2024, 367: 111876.

[34] 王良君. 基于物性测试的植脂奶油品质的多元分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
WANG LJ. The Multivariate analysis of whipped cream based on the physical properties test [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

[35] LEBA T, DAM MS, LEPHUONG-NGUYEN L, *et al*. A review of processing techniques and rheological properties of yogurts [J]. Journal of Texture Studies, 2025, 56(1): 70006.

[36] WANG Y, SELOMULYA C. Food rheology applications of large amplitude oscillation shear (LAOS) [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 127: 221–244.

[37] JOYNER HS. Nonlinear (large-amplitude oscillatory shear) rheological properties and their impact on food processing and quality [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2021, 21: 591–609.

[38] DICKINSON E. On the road to understanding and control of creaminess perception in food colloids [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 372–385.

[39] LAGUNA L, FARRELL G, BRYANT M, *et al*. Relating rheology and tribology of commercial dairy colloids to sensory perception [J]. Food & Function, 2017, 8(2): 563–573.

[40] SELWAY N, STOKES JR. Insights into the dynamics of oral lubrication and mouthfeel using soft tribology: Differentiating semi-fluid foods with similar rheology [J]. Food Research International, 2013, 54(1): 423–431.

[41] NGUYEN PTM, KRAVCHUK O, BHANDARI B, *et al*. Effect of different hydrocolloids on texture, rheology, tribology and sensory perception of texture and mouthfeel of low-fat pot-set yoghurt [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 90–104.

[42] 郑淇丹, 樊迪, 沈清武, 等. 不同结晶态脂肪比例对乳液奶油感感知的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 7–14.
ZHENG QD, FAN D, SHEN QW, *et al*. Effect of solid fat content on creaminess perception of emulsions [J]. Food Science, 2022, 43(10): 7–14.

[43] 张紫铜, 黄雅婷, 李连良, 等. 聚二甲基硅氧烷表面改性及其对牛奶润滑特性评估的影响[J]. 润滑与密封, 2022, 47(3): 74–80.
ZHANG ZT, HUANG YT, LI LL, *et al*. Surface modification of polydimethylsiloxane and its effect on evaluation of milk lubricating properties [J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(3): 74–80.

[44] LI Y, JOYNER HS, CARTER BG, *et al*. Effects of fat content, pasteurization method, homogenization pressure, and storage time on the mechanical and sensory properties of bovine milk [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(4): 2941–2955.

[45] GODOI FC, NINGTYAS DW, GEOFFROY Z, *et al*. Protein-based hydrocolloids: Effect on the particle size distribution, tribo-rheological behaviour and mouthfeel characteristics of low-fat chocolate flavoured milk [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106628.

[46] ZHU Y, BHANDARI B, PRAKASH S. Relating the tribo-rheological properties of chocolate flavoured milk to temporal aspects of texture [J]. International Dairy Journal, 2020, 110: 104794.

[47] LIU J, PEDERSEN HL, KNARREBORG L, *et al*. Stabilization of directly acidified protein drinks by single and mixed hydrocolloids-combining particle size, rheology, tribology, and sensory data [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(12): 6433–6444.

[48] LI B, HAN CW, FENG G, *et al*. Enhanced creaminess of plant-based milk via enrichment of papain hydrolyzed oleosomes [J]. Food Research International, 2024, 198: 115322.

[49] SONNE A, BUSCH-STOCKFISCH M, WEISS J, *et al*. Improved mapping of in-mouth creaminess of semi-solid dairy products by combining rheology, particle size, and tribology data [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(1): 342–347.

[50] 赵红玲, 李全阳, 赵正涛, 等. 搅拌型酸奶流变学特性的研究[J]. 乳业科学与技术, 2009, 32(4): 159–163.
ZHAO HL, LI QY, ZHAO ZT, *et al*. Preliminary study on the rheological properties of stirred yogurt [J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2009, 32(4): 159–163.

[51] KRZEMINSKI A, PRELL KA, BUSCH-STOCKFISCH M, *et al*. Whey protein-pectin complexes as new texturising elements in fat-reduced yoghurt systems [J]. International Dairy Journal, 2014, 36(2): 118–127.

[52] ESPINOSA-ANDREWS H, HARO-GONZALEZ JN, BARBOSA-NUNEZ JA, *et al*. Physicochemical and rheological characteristics of commercial Greek-style yogurt enriched with *Polygonum cuspidatum* roots or the *P. cuspidatum* *β*-cyclodextrin inclusion complex [J]. Food Research International, 2025, 203: 115854.

[53] ALI AH, ALSALMI M, ALSHAMSI R, *et al*. Effect of whey protein isolate addition on set-type camel milk yogurt: Rheological properties and biological activities of the bioaccessible fraction [J]. Journal of Dairy Science, 2023, 106(12): 8221–8238.

[54] HOVJECKI M, RADOVANOVIC M, MILORADOVIC Z, *et al*. Fortification of goat milk yogurt with goat whey protein concentrate-Effect on rheological, textural, sensory and microstructural properties [J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103393.

[55] CHEN BF, CAI YJ, ZHAO XJ, *et al*. A novel set-type yogurt with improved rheological and sensory properties by the sole addition of insoluble soybean fiber [J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103739.

[56] 任卫文. 基于流变学和摩擦学研究羧甲基纤维素对大豆酸奶口感的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
REN WW. The influence of carboxymethyl cellulose on the texture of soy yogurt: A study based on rheology and friction analysis [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.

[57] 赵雯, 张健, 姜芸云, 等. 不同种类脂肪替代物对软冰淇淋浆料流变特性及产品品质和口感的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(12): 1–8.
ZHAO W, ZHANG J, JIANG YY, *et al*. Effect of fat replacers on rheological properties of soft ice cream mixes and quality and mouthfeel of ice cream [J]. Food Science, 2018, 39(12): 1–8.

[58] 刘婷婷, 张闪闪, 赵文婷, 等. 奇亚籽皮多糖对冰淇淋乳化稳定性及品质的影响[J]. 食品科学, 2021,42(10): 32–37.
LIU TT, ZHANG SS, ZHAO WT, *et al*. Effect of chia seed coat polysaccharide on the emulsion stability and quality of ice cream [J]. Food Science, 2021, 42(10): 32–37.

[59] MEHTA A, KUMAR L, SERVENTI L, *et al*. Bacterial cellulose infusion: A comprehensive investigation into textural, tribological and temporal sensory evaluation of ice creams [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281: 136510.

[60] CHANG W, LI K, QI X, *et al*. Formulation strategies, texture improvement, and sensory perception of healthy ice cream: A review [J]. Food Chemistry, 2025, 481: 144015.

[61] LIU X, SALA G, SCHOLTEN E. Role of polysaccharide structure in the rheological, physical and sensory properties of low-fat ice cream [J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100531.

[62] NINGTYAS DW, BHANDARI B, BANSAL N, *et al*. Sequential aspects of cream cheese texture perception using temporal dominance of sensations (TDS) tool and its relation with flow and lubrication behaviour [J]. Food Research International, 2019, 120: 586–594.

[63] HUTCHINGS S, ALFANTE R, JACOB N, *et al*. Dairy versus non-dairy cheese texture: Sensory and instrumental contrasts [J]. Journal of Texture Studies, 2024, 55: 12863.

[64] MELITO HS, DAUBERT CR, FOEGEDING EA. Relationships between nonlinear viscoelastic behavior and rheological, sensory and oral processing behavior of commercial cheese [J]. Journal of Texture Studies, 2013, 44(4): 253–288.

[65] ZAD-BAGHER-SEIGHALANI F, JOYNER H, ROSS C. Relationships among rheological, sensory, and wear behaviors of cheeses [J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(5): 702–721.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)