

一种基于口腔软摩擦学的奶茶顺滑特性评价模型

詹敏敏¹, 杨小双¹, 王玉牛², 刘付金生², 陈嘉琪¹, 曹庸¹, 宋明月^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东省功能食品活性物重点实验室, 广东广州 510642)

(2. 广州市领航食品有限公司, 广东广州 510000)

摘要: 该文系统研究了奶茶主要原料植脂末 (5.00~100.00 g)、冰块 (5.00~200.00 g) 和糖浆 (0~12.00% *m/m*) 添加量对奶茶顺滑特性, 包括粒径分布、流变特性、感官评价及口腔软摩擦学的影响, 通过补充和优化现有标准, 成功建立了特异性针对奶茶口感顺滑度的感官评价新标准。结果表明奶茶植脂末添加量与奶茶的粒径呈负相关, 与粘度呈正相关。当植脂末添加量为 60.00 g 时, 奶茶的平均粒径为 0.66 μm 。通过对样品进行口腔软摩擦学分析, 建立了奶茶口感顺滑度的预测模型和评判标准, 即只有当口腔软摩擦学曲线同时满足 $K2 \in (-0.23, -0.05)$ 和 $vR2 < 40.00 \text{ mm/s}$ 时, 奶茶表现出较好的顺滑特性, 否则奶茶口感淡薄或厚重, 口感顺滑度差。因此, 该口腔软摩擦模型能够评价不同配方奶茶的顺滑特性, 在快速评价流体食品的口感顺滑方面具有实际应用前景。

关键词: 奶茶; 流变特性; 摩擦学; 顺滑度

文章编号: 1673-9078(2023)12-216-225

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.12.1332

Oral Soft Tribology-based Model for Evaluating the Smoothness

Characteristics of Milk Tea

ZHAN Minmin¹, YANG Xiaoshuang¹, WANG Yuniu², LIU Fujinsheng², CHEN Jiaqi¹, CAO Yong¹,
SONG Mingyue^{1*}

(1. College of Food Science, Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (2. Guangzhou Pilot Food Co. Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The effects of adding non-dairy powder (5.00–100.00 g), ice (5.00–200.00 g), and sugar (0–12.00%, *m/m*) on the smoothness characteristics of milk tea, including particle size distribution, rheological properties, sensory evaluation, and oral soft tribology, were systematically investigated. A new sensory evaluation standard specific to milk tea smoothness was successfully established by supplementing and optimizing existing standards. The results showed that the amount of non-dairy powder added correlated negatively with particle size of milk tea and correlated positively with viscosity. The average particle size of milk tea was 0.66 μm when the amount of added non-dairy powder was 60.00 g. A prediction model and criteria for milk tea smoothness were established by oral soft tribology analysis of the samples. Specifically, when the oral soft tribological curve satisfied both $K2 \in (-0.23, -0.05)$ and $vR2 < 40.00 \text{ mm/s}$, the milk tea exhibited optimal smoothness characteristics. Otherwise, the milk tea was bland or had a heavy mouthfeel, indicating poor smoothness. This oral soft tribology model demonstrated the ability to evaluate the smoothness characteristics of different formulations of milk tea, indicating that this technique has practical application prospects for rapid evaluation of the smoothness characteristics of fluid food products.

Key words: milk tea, rheological properties; tribology; smoothness

引文格式:

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 Minmin, YANG Xiaoshuang, WANG Yuniu, 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

收稿日期: 2022-10-19

基金项目: 广东省引进创新创业团队项目 (2019ZT08N291)

作者简介: 詹敏敏 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然活性物与肠道菌群的相互作用, 食品工艺配方, E-mail: 1069824054@qq.com

通讯作者: 宋明月 (1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然活性物质及功能食品因子在化学、细胞、动物等多层次模型的功能评价以及其与肠道菌群的相互作用研究; 功能成分的应用技术研究与新型功能食品研制, E-mail: songmy@scau.edu.cn

随着经济社会的快速发展和人民水平的提高,奶茶逐渐成为被大众喜爱和广泛消费的茶乳复配的饮料,主要成分包括茶叶、植脂末、糖等^[1]。奶茶作为一种茶乳复配的饮料,在保证一定的甜度和醇香味的基础上,顺滑口感是消费者最关注的性质,此外,也注重奶茶的品质。目前关于奶茶品质和感官特性的物理化学研究报道比较少,Liu等^[2]利用可见光和近红外光谱技术结合反向传播神经网络和最小二乘支持向量机,研究得到快速鉴别速溶奶茶及其糖添加量的方法。柳新荣等^[3]选用4种市面上典型的粉末油脂来制备奶茶,采用 Turbiscan 分析仪测定奶茶的稳定性,同时结合感官评定选出组织状态最佳和口感顺滑的奶茶配方。

目前,系统地对奶茶品质的影响因素的研究较少,也缺乏对奶茶的流变特性和顺滑口感的研究。此外,目前的研究对奶茶口感的评价普遍采用综合评价检验法,由于品评者的主观因素和缺乏统一适用的评价标准,这将导致评价结果的客观真实性受到较大的干扰^[4]。因此建立一个基于奶茶体系物理化学指标和数据评价模型是目前需要解决的难题。

食品流变学和口腔软摩擦学是研究固体、流体和半流体食品品质特性的重要方法^[5,6]。人们在咀嚼过程的不同阶段所感知到的各种感官结构属性包括硬度、粘性、粗糙性、滑腻性等,都可以用特有的测量技术对特定的物理参数进行表征^[7],然而,这些物理指标并不能直接表征食品的奶油感、顺滑感和粘滞感,这也是传统流变学的局限性所在。因此,本研究在传统流变仪的基础上加装球三板装置,模拟人的口腔运动,即模拟舌头与上颚的摩擦和挤压动作(向上/向下和水平移动),以平均摩擦系数系数和 Stribeck 曲线来表征奶茶样品的口感顺滑度^[6]。Xu等^[8]通过摩擦学试验、气相色谱-质谱法和感官评价研究了中国黄酒(Chinese Rice Wine, CRW)在不同加热温度下的饮用口感和润滑特性,并建立摩擦学模型快速评估 CRW 的饮用口感。Nguyen等^[9]利用口腔软摩擦学探讨了不同含脂量巴氏杀菌奶的润滑性能,同时结合感官评价结果,寻找到一种兼顾口感和健康的搅拌型酸奶的脂肪替代物^[10]。

因此,本研究将对不同配方的奶茶样品进行品质和顺滑口感的鉴定。通过研究不同植脂末、冰块和糖的添加量对奶茶的品质、流变特性、口腔软摩擦的影响;同时结合感官评定结果,通过数值参数描述摩擦行为,构建一种奶茶口腔软摩擦学模型,并建立奶茶口感顺滑度的评价标准。这可以为复杂口腔环境和流体食物在润滑情况下的感官特征的研究,以及食品的开发提供技术依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与设备

1.1.1 实验材料

植脂末,无锡市超科食品有限公司;大叶种红茶(红茶),福建省雨之润茶叶有限公司;白砂糖糖浆,中粮融氏生物科技有限公司;纯净水,广州屈臣氏食品饮料有限公司。

1.1.2 实验设备

Mastersizer 300 激光粒度仪,上海市思百吉仪器系统有限公司;Typ006-1659 流变仪,江苏米立特科学仪器有限公司;603-034 球三板配件,江苏米立特科学仪器有限公司;HZB-20/30F 制冰机,惠康国际工业有限公司;DDQ-B01K1 搅拌器,佛山市小熊电器股份有限公司;YP30KN 电子天平,上海市十砚仪器设备有限公司。

1.2 奶茶制作流程和配方

以茶叶:沸水=1:30 (*m/m*) 比例,浸泡 8.00 min 后过滤。滤液冷却至 70.00 °C 时,分别与不同梯度植脂末、冰块和糖浆添加量混合,经小熊牌搅拌机 1 档转速(1 300.00 r/min) 搅拌 2.00 min 后,加入特定白砂糖糖浆,又由小熊牌搅拌机 1 档搅拌 30.00 s 后添加一定可食用冰块,手动搅拌 30.00 s 及手摇 10.00 s 后迅速取样。

表 1 奶茶的配方

Table 1 Formula for milk tea

| 项目 | 命名 | 植脂末/g | 冰块/g | 白砂糖糖浆(<i>m/m</i> , %) |
|-----------------|----|-------|--------|------------------------|
| 植脂末组 A | A1 | 20.00 | 100.00 | 9.00 |
| | A2 | 30.00 | 100.00 | 9.00 |
| | A3 | 40.00 | 100.00 | 9.00 |
| | A4 | 50.00 | 100.00 | 9.00 |
| | A5 | 60.00 | 100.00 | 9.00 |
| 冰块组 B | B1 | 50.00 | 0.00 | 9.00 |
| | B2 | 50.00 | 25.00 | 9.00 |
| | B3 | 50.00 | 50.00 | 9.00 |
| | B4 | 50.00 | 100.00 | 9.00 |
| | B5 | 50.00 | 200.00 | 9.00 |
| 白砂糖 糖浆组 C | C1 | 50.00 | 100.00 | 0.00 |
| | C2 | 50.00 | 100.00 | 3.00 |
| | C3 | 50.00 | 100.00 | 6.00 |
| | C4 | 50.00 | 100.00 | 9.00 |
| | C5 | 50.00 | 100.00 | 12.00 |

1.3 粒径分布

不同配方的奶茶样品的粒径分布均采用激光粒度仪进行测量,并设置具体参数如下:选择球形模型,颗粒折射率为8.5%,分散剂为水,分散相的折射率为1.30,分析软件为配套软件,每个样品重复测量3次并取均值。数据结果用 $D_{[3,2]}$ 表示, $D_{[3,2]}$ 是表面积力矩平均值,指与实际颗粒群有相同比表面的等效球体的平均直径,具体分析如1.8所示。

1.4 微观结构

基于奶茶的粒径及粒径分布结果,进一步通过荧光显微镜来观察不同植脂末添加量的样品的微观结构。实验通过对不同配比奶茶颗粒中的脂质进行染色,随后使用荧光显微镜来观察。在测试之前,取适量的奶茶样品与0.13 mg/mL 尼罗红乙醇染液混合均匀以确保染色完全。取少量混合液于载玻片上,盖上盖玻片后要避免气泡的产生;随后置于荧光显微镜测量盘中心,使用10倍目镜和10~40倍油浸物镜进行观察。其中,激光波长取543.00 nm,发射波长取605.00 nm^[11]。

1.5 流变学

使用Typ 006-1659流变仪和CC25DN/Ti转子来测定不同植脂末添加量的奶茶样品和纯水的流变特性,保持转子与平行板的样品间隙为1.00 mm。在测量前将样品在37.00 °C下平衡1 h。在每次测试开始时,样品在测量间隙处的平行板之间在37.00 °C下再次平衡60 s。取15.00 mL奶茶样品加到同心圆筒内,温度为37.00 °C,在剪切速率从0.10增加到1 000.00 s⁻¹时进行测量样品,记录粘度随剪切速率的变化规律,每个样品重复进行三次测量,数据分析如1.8所示。

1.6 感官品评方法的建立和实施

课题组招募了由12名评估者组成的感官评价小组,在华南农业大学的功能食品活性物重点实验室对待测奶茶样品进行了感官评价。所有评估者都已在纳入感官评价小组之前进行了感官敏锐度的筛选,并在食物的感官评价中具备一定的经验。

12名评价小组成员对不同参数奶茶按口感顺滑特征逐一进行评价。按照GB/T 10220-2012的规定,在测评前一天,所有感官品评员不能吸烟和饮酒;在感官评定前不吃刺激性食物,两个样品评定前后要用净水漱口,并且间隔10.00 min。具体感官评价标准参考NY 82.2-1988、GB 10221.4-2012和T/FJCF 0002-2021,经修改得到奶茶口感顺滑度感官评价标准(表2)。其中,入口协调(顺滑,有奶油感,无涩味,无颗粒感,同时具备浓郁的奶茶香味)和口感寡淡(基本无颗粒感,但奶茶香味淡,口感似茶水)都是对奶茶口感顺滑度的预期感官评价指标。

由于本研究对象为奶茶饮品,其在口腔中的滞留时间通常很短,因此感官品评员必须迅速评估其顺滑度。然而感官评价是综合性很强的实验,通常包括香气、味道、三叉神经和口感以及产品的后调的感觉^[12]。因此为了明晰奶茶感官感受的舌面区间,本研究的感官实验的详细步骤为:避开舌尖饮入10.00 mL奶茶样品的同时使奶茶充满整个口腔。这样做的目的是:由于舌尖的味蕾对甜味最敏感^[13],并以9.00%的白砂糖浆水溶液为甜度标准,降低甜味的对品评员的主观影响;饮入10.00 mL奶茶样品是为了使奶茶充满口腔,还原消费者日常饮用奶茶时的真实情况。感官评价员需要严格执行上述要求,并迅速做出正确的判断。

表2 奶茶口感顺滑度感官评价标准和参考

Table 2 Sensory evaluation criteria and reference for milk tea smoothness

| 感官表现 | 评分/分 | 参考样品 |
|---|-------------|--------------------|
| 入口协调, 口感柔和顺滑, 具有奶油感但无滞留感 | 16.00~20.00 | 动物奶油 |
| 口感较为顺滑, 无明显滞留感 | 11.00~15.00 | 纯牛奶 |
| 口感厚重, 滞留感强; 或口感淡薄, 奶油感弱, 口感顺滑度差 | 6.00~10.00 | 老酸奶(厚重感)、冰淇淋原浆(淡薄) |
| 口感粘稠, 有极强的滞留感, 流动感极弱; 或口感寡淡, 更似茶水的口感, 无明显顺滑口感 | 1.00~5.00 | 蜂蜜(粘稠感)、淡茶水(寡淡口感) |

1.7 口腔摩擦学

基于现有研究^[14,15],采用Typ 006-1659流变仪和603-0347球三板配件模拟口腔软摩擦来测定奶茶样品在37.00 °C的润滑特性,加样至配件2/3高度处。相关研究表明,载荷范围从1.00到8.00 N均为低负载量。

在本研究中,球三板配置中加入1.50 mL奶茶样品,模拟口腔应力约为1.00 N^[1]。经多次实验证明,使用法向应力2 N和3 N与1 N相比,法向力的变化并不能显著影响摩擦力变化,而只是会降低边界润滑区的平均速度^[9]。因此,为更好地模拟口腔的剪切行为和旋转运动,选择1 N的法向应力。滑动速度从0.10~300.00 mm/s

逐渐提高,每次测定时间为 6.00 min。球三板配件用去离子水清洗,然后用体积分数为 75.00%的乙醇冲洗,并用纸巾干燥。在添加下一个样品之前,重复清洗操作。获得每个样品的剪切速率 (mm/s) 与摩擦系数。三次重复测定,取其平均值,数据分析如 1.8 所示。

1.8 数据分析

研究的结果用均值±标准误差表示。数据的分析和处理是通过使用 Origin 2022 和 SPSS 21.0 软件来进行的,并通过单因素分析和 *t* 检验方式实现了区域间的标准差异研究,用不同小写字母表示结果显著不同 $P<0.05$; 同时,对摩擦学数据与感官评价得分进行相关性分析,最后回归分析,并建立奶茶顺滑口感预测模型和评价标准。

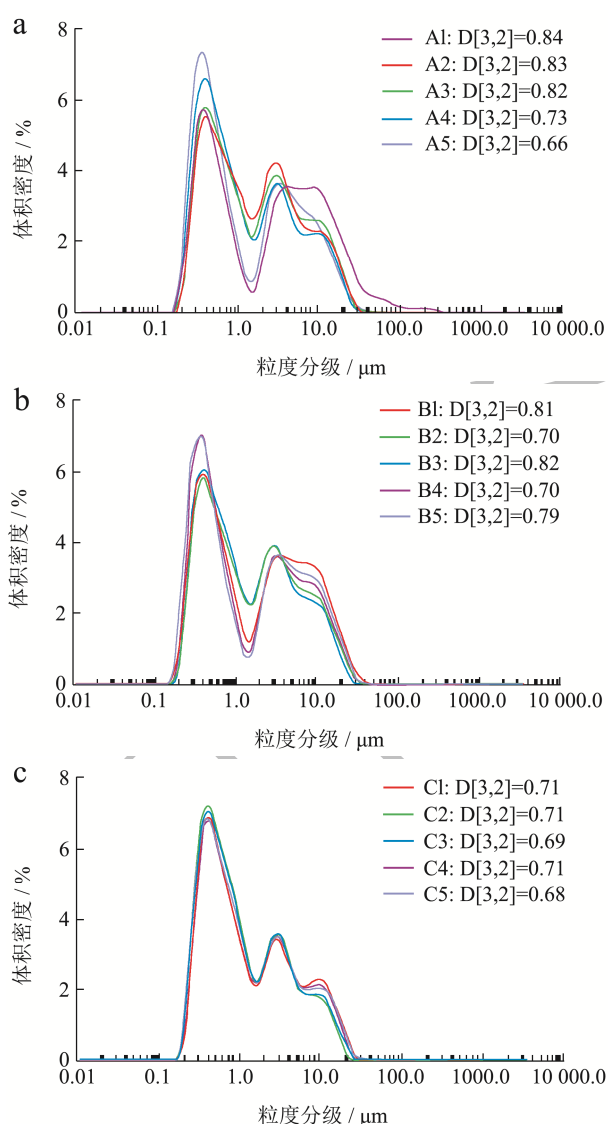


图 1 不同配方奶茶的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of different formulations of milk tea

2 结果与讨论

2.1 粒径分布

如图 1 所示,不同配方的奶茶的粒径分布不同,值得注意的是,所有样品的粒径分布均出现两个峰,在 0.10~1.00 μm 处有个较大的峰,在 1.00~10.00 μm 处有个额外的峰。第一个峰(左)对应于游离酪蛋白胶束,第二个峰对应于脂肪阶段^[9]。这与郑田要等^[16]测量奶茶的粒径分布图结果一致。其中,植脂末的添加量对粒径的影响比较大,而糖的添加量对粒径影响不明显,平均粒径 $D[3,2]$ 在 0.68~0.71 μm 之间。柳新荣等^[3]研究结果也表明市售不同典型的专用植脂粉末对奶茶的粒径大小及粒径分布有影响。随着植脂末的添加量的增加,粒径分布在 0.10~1.00 μm 处的峰占比逐渐增大,而在 1.00~10.00 μm 处的峰占比变小,平均粒径逐渐减小,说明植脂末的添加量越高,体系更稳定。当植脂末添加量为 60.00 g 时,平均粒径为 0.66 μm 。

2.2 微观结构

乳状液的粒径分布在一定程度上反应溶液的颗粒分布情况,并且结合 2.1 结果可知,植脂末添加量是影响奶茶颗粒大小的主要因素,因此,我们重点关注不同植脂末添加量的奶茶样品的微观结构。利用尼罗红乙醇染液更进一步对不同植脂末添加量的奶茶中的脂质进行染色,通过使用激光共聚焦显微镜来观察和分析奶茶颗粒的微观结构如图 2 所示。图 2(A1)箭头所示,奶茶 A1 的乳状液中脂肪颗粒直径较大,可能是由于系统乳化程度不足,导致小颗粒聚集而成。A2~A5 的样品中脂肪颗粒分散均匀,并且,随着植脂末添加量的增多,脂肪颗粒逐渐变小。奶茶配方中的植脂末的成分包含酪蛋白酸钠,它是一种安全的食品添加剂。酪蛋白酸钠分子具有乳化性,这是由于其分子上同时含有亲水基团和疏水基团^[17]。酪蛋白酸钠能降低植脂末中含有的油-茶水界面的张力,从而形成稳定的乳状液。结合图 1 分析,随着植脂末的含量增加,酪蛋白酸钠的含量逐渐增大,乳化性逐渐变强,奶茶的乳状液颗粒逐渐变小。这种变化是由于添加剂在均质过程中迅速包裹小脂肪滴表面,防止聚集,从而减小了脂肪球的大小^[18]。该结果与 Liao 等^[18]发现不同类型的乳化剂以及乳化剂的使用量对婴幼儿配方奶粉的体系粒径大小及稳定性均有影响一致。

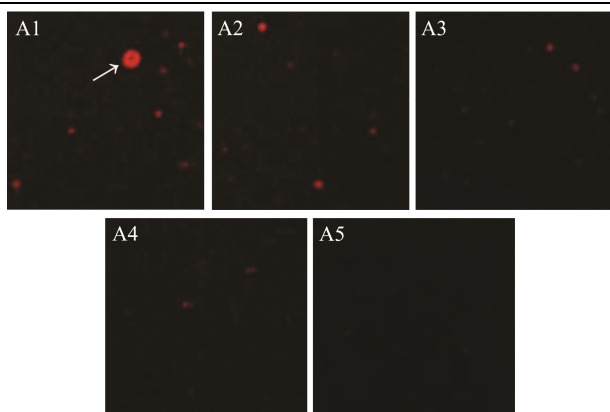


图2 不同植脂末添加量的奶茶的微观结构

Fig.2 Microstructure of milk tea with different non-dairy powder additions

2.3 流变特性

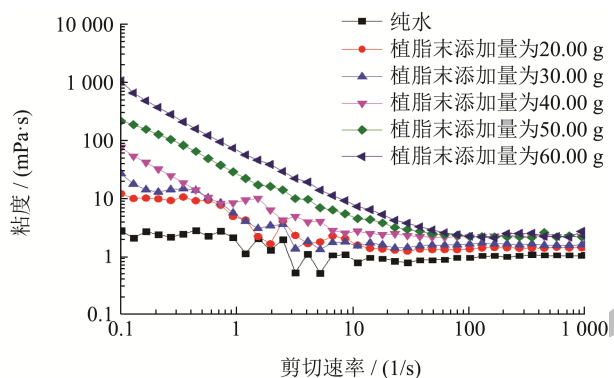


图3 奶茶样品中植脂末添加量不同对应的剪切速率对粘度的影响

Fig.3 Effect of shear rate on viscosity for different non-dairy powder additions to milk tea samples

图3为不同植脂末添加量对奶茶粘度的影响。不同配方奶茶样品的剪切速率逐渐变大,粘度先快速减小后保持不变,表现出高粘度和显著的伪塑性流体剪

切减薄特性^[9]。然而,在剪切速率大于 100 s^{-1} 时,这些样品的粘度分布几乎重叠,这可能是剪切速率越大时,定向作用越强,大分子间的相互作用越弱^[19,20],因此,植脂末添加量对溶液表观粘度的影响减弱。从实验结果可以看出,在所用剪切速率范围($0.1\sim 1\,000\text{ s}^{-1}$)内,奶茶的粘度随植脂末含量的增加而增大,当植脂末的添加量低于 30.00 g 时,奶茶的粘度随植脂末添加量增加的幅度较小;当植脂末的添加量高于 30.00 g 时,奶茶的粘度随植脂末添加量增加的幅度较大;并且,不同植脂末添加量的奶茶粘度均比纯水的高。剪切速率为 50.00 s^{-1} 时的粘度已被认为与从牛顿流体到油溶液的各种食品的厚度、粘性和滞留性有良好的相关性^[10]。G50是在 50.00 s^{-1} 的剪切速率下的粘度值。实验中不同奶茶G50的表观粘度值为 $1.00\sim 3.00\text{ mPa}\cdot\text{s}$,与以往报道牛奶样品的值在同一数量级,Nguyen等^[9]研究结果表明脂肪含量为 $0.1\%\sim 4.9\%$ 的商业巴氏奶的粘度在G50处的值在 $1\sim 5\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 范围内,并且脂肪含量越低,G50越接近 $1\text{ mPa}\cdot\text{s}$;Fava等^[21]使用旋转粘度计测得新鲜牛奶、冷藏牛奶和冷冻牛奶的粘度为 $2.64、3.30、2.65\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。因此,可以得出结论,随着植脂末的添加量的增加,奶茶的粘度逐渐增高,这是由于奶茶中的固体颗粒增加(植脂末中含有的酪蛋白酸钠和黄原胶),含水量减少,导致酪蛋白胶束之间的相互作用增加,并减少了它们之间的间隙^[21]。Nguyen等^[10]研究表明黄原胶在非常低的浓度下显著增加了酸奶的粘度。酪蛋白酸钠具有增稠性,而负电荷黄原胶与酪蛋白胶束的正电荷表面相互作用以形成高度结构化的网络,其有助于样品粘度和凝胶强度的增加^[10]。

2.4 感官特征

表3 奶茶口感顺滑度得分

Table 3 Milk tea smoothness score

| 项目 | 糖浆添加量(m/m) | | | | | 冰添加量/g | | |
|----|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 0.00% | 3.00% | 6.00% | 9.00% | 12.00% | 5.00 | 50.00 | 200.00 |
| 得分 | 11.75±0.25 ^f | 14.67±0.23 ^c | 14.58±0.31 ^c | 16.92±0.36 ^{ab} | 14.25±0.46 ^{cd} | 12.33±0.38 ^{ef} | 14.58±0.45 ^c | 17.25±0.51 ^a |
| 排名 | 5 | 3 | 2 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 项目 | 植脂末添加量/g | | | | | | | |
| | 5.00g | 20.00 | 30.00 | 40.00 | 50.00 | 60.00 | 100.00 | |
| 得分 | 10.25±0.33 ^s | 10.33±0.40 ^s | 14.33±0.31 ^{cd} | 14.67±0.26 ^c | 15.92±0.23 ^b | 15.08±0.31 ^s | 9.17±0.32 ^s | |
| 排名 | 6 | 5 | 4 | 3 | 1 | 2 | 7 | |

注: 同列相同指标右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。

基于前期对奶茶粒径和粘度实验结果的基础上,扩大植脂末的添加量以及增大冰块添加量的变化范围对奶茶顺滑口感进行感官评价,以期提高样品的差异

性。分别对12位感官评价员就不同奶茶样品给出的判定分数进行统计分析。结果如表3和图4所示,各组中对奶茶口感顺滑度评分最高的组别分别是植脂末添

加量 50.00 g、冰添加量 200.00 g 和糖浆添加量 9.00%，得分分别为 15.92、17.25 和 16.92。根据感官评分标准，感官评价员一致认为植脂末组和冰组中奶茶口感顺滑度组内差异较大，糖浆组中组内顺滑度差别不大，其中影响糖浆组感官评价结果的主要因素是甜度。其中，有 5 款（30.00~60.00 g）奶茶口感均较为顺滑，无明显滞留感，是比较理想的奶茶产品。而感官评分最低的是植脂末添加量为 100.00 g 的奶茶，只有 9.17 分，口感厚重且滞留感强，口感顺滑度差，不是理想的奶茶产品。因此，口感顺滑度较为理想的奶茶配方分别为植脂末添加量为 50.00 g，冰块添加量为 200.00 g 和糖浆添加量为 9.00%（m/m）的奶茶样品。

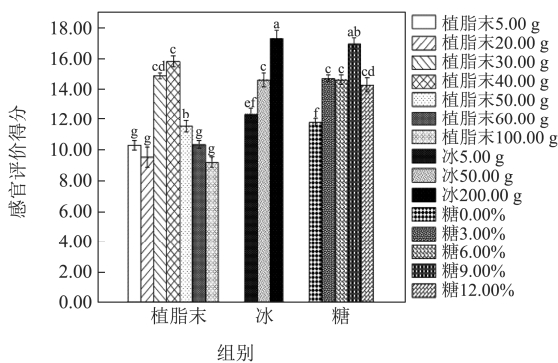


图 4 不同配方奶茶顺滑口感感官评价得分

Fig.4 Sensory evaluation scores of different formulations of milk tea with smooth texture

注：不同的小写字母表示具有显著差异（ $P < 0.05$ ）。

2.5 口腔软摩擦学

为更清晰地观察奶茶口腔软摩擦学行为，并建立奶茶顺滑度预测模型，在前期粒径和粘度实验的基础上新增植脂末 5.00 g 和植脂末 100.00 g 配方的奶茶样品进行摩擦学行为探究。7 种配方奶茶样品的 Stribeck 曲线如图 5a 所示，摩擦系数随剪切速率的持续增加，呈现先保持基本不变后减小再增大的趋势，满足典型的 Stribeck 曲线基本特征。加入不同植脂末含量的奶茶的 Stribeck 曲线总趋势与 Nguyen 等^[9,10]研究的乳制品顺滑特性曲线一致。不同植脂末配方奶茶的 Stribeck 曲线差异明显，结合 2.4 感官评价结果，我们推测该因素影响下的奶茶 Stribeck 曲线与其口感顺滑度有重要的关联性。因此，我们推测植脂末的加样量与奶茶口感顺滑的主要评价标准密切相关，是建立基于口腔摩擦学的奶茶顺滑特性的模型的不可或缺因素。

图 5b 为奶茶样品中不同加冰量的 Stribeck 曲线。冰添加量 5.00 g 奶茶与另外两种不同配方奶茶的曲线呈现明显的差异，且结合 2.4 感官评价结果，初步断定加冰量是影响奶茶顺滑特性的另一关键指标。因此，

冰添加量将作为建立评价标准的另一重要参考因素。

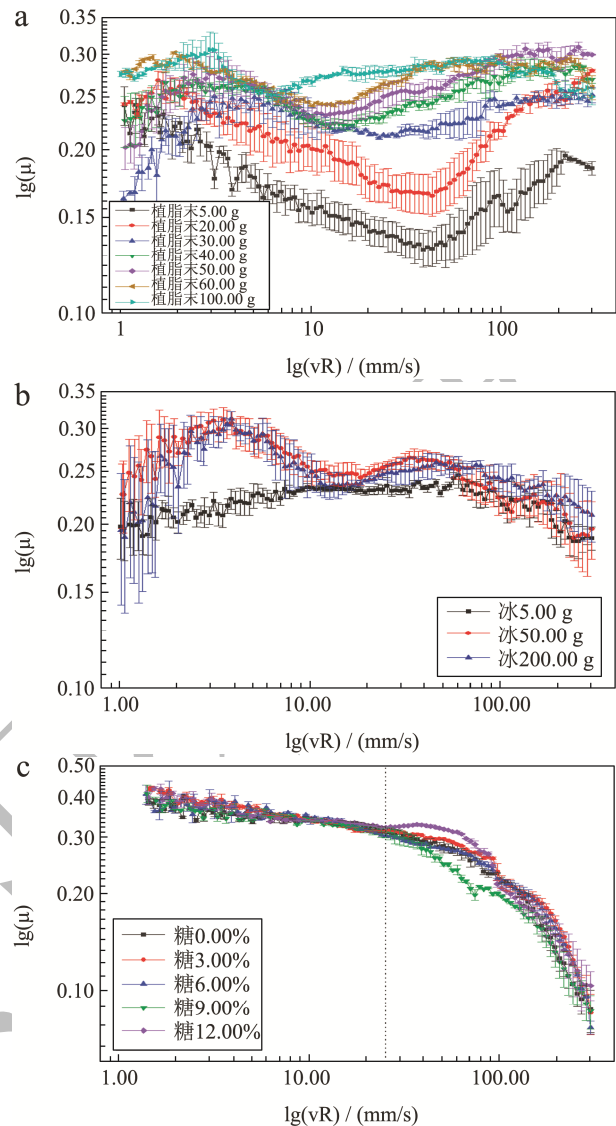


图 5 不同配方奶茶样品的 Stribeck 曲线

Fig.5 Stribeck curves of milk tea samples with different formulations

注：vR 为剪切速率。

图 5c 为奶茶样品中不同加糖量的 Stribeck 曲线，曲线均呈现：随着剪切速率的增加，摩擦系数先保持基本不变再迅速减小，主要经历了边界润滑和混合润滑。5 条曲线基本重合，无明显规律。这是因为糖浆没有改变奶茶的润滑特性^[22-24]，结合 2.1 粒径分布结果分析，奶茶中不同的加糖量不影响样品中颗粒的形成及稳定，同时，对样品初入口腔时润滑膜的产生没有增强或削弱的效果。依据 2.4 感官特征结果分析，加糖量对奶茶顺滑口感的影响不大。但是，其评分结果的差异是由于品评员的主观色彩引起的，究其原因不同人对甜度的偏好程度不同，从而对结果造成一定的影响^[25]。

经对上述实验和数据分析，成功建立了一套基于口

腔软摩擦学的奶茶口感顺滑度预测模型。如图 6 模型图, 该 Stribeck 曲线描述了摩擦系数均值[log(μ)]随剪切速率[log(vR)]变化的总体趋势。模拟人的口腔运动, 用虚线把奶茶样品在口腔中的软摩擦行为分成三个阶段。从左往右的顺序定义为边界润滑区(区域 I), 混合润滑区(区域 II)和流体动力润滑区(区域 III)。

前人的研究表明, 混合润滑和边界润滑最能体现食物的顺滑度、涩味感等口感性质, 且多以平均摩擦系数作为唯一的评价标准来描述食品的顺滑口感^[26,27]。奶茶作为一个复杂体系, 不仅要分析其平均摩擦系数, 还要综合边界润滑的速度区间、进入混合润滑区的剪切速率、混合润滑区的速度区间、摩擦系数最低点、混合润滑区拟合斜率等对奶茶口感顺滑度进行评价。

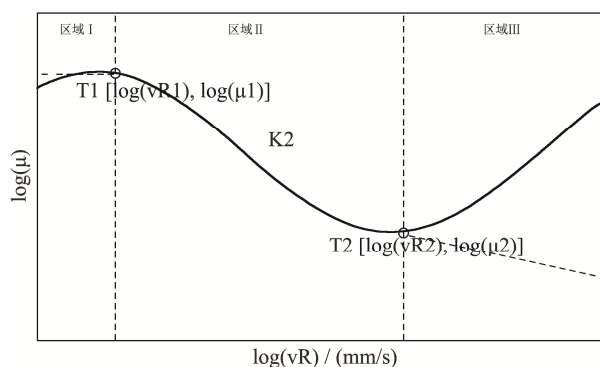


图 6 模型图

Fig.6 Model pictures

为进一步量化Stribeck曲线, 本研究根据曲线特征和感官评价逻辑筛选出两个关键参数^[28], 分别为区域 II 的拟合斜率K2以及区域 II 与区域 III 之间转折点所对

应的剪切速率 $vR2$ 。因此, 区域 I: 奶茶开始进入接触区, 从而逐渐增加摩擦。接触面之间形成薄薄的润滑膜, 使摩擦增加到其最大值(过渡点T1)。摩擦力不再像传统的斯特里贝克曲线那样是一个恒定值, 而是随速度线性增加^[9]。此过程中摩擦系数的变化趋势主要受植脂末中氢化椰子油、黄原胶等原料的成膜促进作用的影响^[29,30]。区域 II: 润滑膜进一步发展, 厚度增加, 可以部分分离表面, 减少摩擦。摩擦的减少受促进流体夹带的样品粘度的控制, 这与常规斯特里贝克曲线中的混合状态相同, 该区域是评判奶茶口感顺滑的枢纽^[9]。因此, K2是曲线在区域 II 的拐点T2[log($vR2$), log($\mu2$)]处的斜率, 是评价奶茶顺滑特性的重中之重。区域 III: 为T2[log($vR2$), log($\mu2$)]后的曲线范围, 该区域内流体的行为不仅仅受奶茶的粘度影响, 还取决于样品的稳定性, 对顺滑口感无明显影响作用^[10,23]。一方面, 假设随着log($vR2$)值的继续增加, log($\mu2$)下降后出现回升, 说明较厚的水动力膜使舌头和上颚两表面间实现完全分离^[27], 即与传统的斯特里贝克曲线中的流体动力状态相同。另一方面, 假设随着log($vR2$)值的继续增加, log($\mu2$)持续下降至更小或降至零, 说明此款奶茶如果流体结构在高速时破裂, 摩擦可能会随着速度进一步减少^[10], 无法再对奶茶样品进行口感顺滑度评价。

综上, 对奶茶中不同植脂末和冰的加样量的 Stribeck 曲线的 K2 值和 $vR2$ 值进行了计算和分析, 结果如表 4 和图 5 所示。依据此模型, 应用口腔软摩擦学分析, 构建一种奶茶口腔软摩擦学模型, 并建立奶茶口感顺滑度的评价标准。

表 4 不同配方奶茶 Stribeck 曲线 K2 值

Table 4 K2 values of Stribeck curves for different formulations of milk tea

| 项目 | 糖浆添加量(m/m)% | | | | | 冰添加量/g | | |
|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 0.00 | 3.00 | 6.00 | 9.00 | 12.00 | 5.00 | 50.00 | 200.00 |
| K2 | -0.50±0.03 ^a | -0.44±0.03 ^a | -0.43±0.03 ^a | -0.48±0.02 ^a | -0.50±0.02 ^a | -0.01±0.00 ^a | -0.17±0.01 ^b | -0.23±0.01 ^c |
| 项目 | 植脂末添加量/g | | | | | | | |
| | 5.00 | 20.00 | 30.00 | 40.00 | 50.00 | 60.00 | 100.00 | |
| K2 | -0.17±0.01 ^a | -0.15±0.00 ^a | -0.11±0.01 ^b | -0.12±0.01 ^b | -0.12±0.01 ^b | -0.13±0.00 ^b | -0.26±0.03 ^c | |

注: 同列相同指标右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。

图 7a 和表 4 是奶茶中不同植脂末增添量在区域 II 中的 K 值。实验结果表明, 不同奶茶的 K2 值均为负值, 并且, 摩擦系数与剪切速率呈负相关。其中, 顺滑口感最佳的由 50.00 g 植脂末制成的奶茶 $K2(50.00\text{ g})=-0.12$ 。但 100.00 g 植脂末奶茶的拟合斜率 $K2(100.00\text{ g})=-0.28$, 小于-0.23, 约为 $K2(50.00\text{ g})$ 的 2 倍。根据 2.4 实验结果, 100.00 g 植脂末制成的奶茶口感顺滑度差口感粘稠, 有极强的滞留感, 流动感极弱。另外, 5.00 g 和 20.00 g 植脂末制成的奶茶样品口

感寡淡, 无明显顺滑口感, 其曲线的明显特征 $vR2<40.00\text{ mm/s}$; 而 4 款奶茶(植脂末含量 30.00 g、40.00 g、50.00 g、60.00 g)入口协调, 口感柔和顺滑, 无明显滞留感, 曲线特征为 $K2 > -0.23$, 且 $vR2<40.00\text{ mm/s}$ 。因此, 植脂末添加量的不同会引起感官评定的差异, 即会影响奶茶在口腔中的顺滑口感的不同, 究其原因, 可能是不同植脂末添加量导致奶茶在口腔过程中形成的润滑膜薄厚存在差异。尤其是高添加量植脂末的奶茶, 其在口腔中形成的润滑膜更

厚,更难被破坏,同时以其较高的粘度促使奶茶在口腔内的残留,滞留时间加长而导致较低的感官评价结果。此外,植脂末的成分主要含有氢化椰子油、乳清粉和酪蛋白酸钠(Sodium Caseinate, NaCas)等,故不同植脂末的添加量的奶茶样品中脂肪含量不同、含量不同。在边界润滑区,奶茶样品开始进入接触区,逐渐增加摩擦。接触面之间形成薄薄的润滑膜,使摩擦增加到其最大T1。现有研究表明,随着脂肪水平的提高,样品在边界润滑区T1越低^[9];而Pang等^[30]发现NaCas添加量对豆乳摩擦学有影响,其中,随着NaCas添加量的增加,样品在边界润滑区T1越高。在实验中随着植脂末添加量的增加,奶茶样品在边界润滑区T1先增大后减小再增大,在添加量为30.00 g时T1最小,这可能是由脂肪与NaCas共同作用的结果。在混合润滑区内,润滑膜进一步发展,厚度增加,可部分分离表面,减少摩擦。摩擦的减少受奶茶的粘度以及形成的润滑膜的影响。植脂末添加量为30.00 g的奶茶的K2值最大,说明该奶茶样品在混合润滑区的变化程度大,这可能与其粘度和润滑膜的薄厚有关。此外,王亮^[26]的研究表明牛奶蛋白在0~6.00 g/100 mL的含量下起始摩擦系数先增大后减小再增大,并且适量的牛奶蛋白颗粒能够在边界润滑区起滚珠轴承的作用,进而降低流体食品的摩擦系数。植脂末中的乳清粉和NaCas等蛋白颗粒对流体食品的润滑机制与牛奶蛋白类似,在植脂末添加量为30.00 g时起始摩擦系数最低,此后,由于植脂末含量的增加导致样品颗粒聚集,粒径逐渐增大以致不能适应摩擦表面,导致摩擦系数上升。

图7b和表4是奶茶中不同加冰量在区域II中的K值。由2.4实验结果可知,50.00 g和200.00 g加冰量的奶茶口感顺滑评分较高,曲线特征为 $K_2 > -0.23$, $vR_2 < 40.00$ mm/s,与上述不同植脂末增添量的奶茶口感顺滑的曲线特性一致。品评员对于5.00 g加冰量的奶茶评分最低,表现为奶茶口感浓厚,口感顺滑最差,该曲线其一明显特征 $vR_2 < 40.00$ mm/s,不符合上述不同植脂末增添量的奶茶口感顺滑的曲线特征,且 $K_2 > -0.05$,是K2(50.00 g)的1/5倍。此款奶茶在口腔运动过程中润滑膜的形成受阻,摩擦系数在混合区内始终较高数值上波动,感官表现为厚重粘滞的口感。厚重粘滞的口感是由于较高的温度而导致乳化效果不佳,液体存在较大粒径致使其摩擦系数增加,进而影响其顺滑口感^[26]。

因此,基于上述分析,构建了基于口腔软摩擦学的奶茶口感顺滑度的评价标准,具体如下:以Stribeck曲线作为主要参考对象,优先判断拟合斜率K2是否

小于-0.05,即摩擦系数是否呈现明显的下降趋势。若斜率 $K_2 \geq -0.05$,则表明润滑膜的形成受阻,此款奶茶的感官表现为:口感厚重,顺滑度差;当K2满足小于-0.05条件时,同时满足 $vR_2 \geq 40.00$ mm/s,则说明奶茶样品在口腔内润滑膜厚度增加过慢,而此款奶茶的感官表现为:口感近似于纯水或茶水,顺滑感差;当奶茶的Stribeck曲线同时符合 $vR_2 < 40.00$ mm/s和 $K_2 \leq -0.23$ 特征时,则表明其口感粗糙,有粘滞感,顺滑度差;最后,只有当曲线同时满足 $K_2 \in (-0.23, -0.05)$ 和 $vR_2 < 40.00$ mm/s两个条件时,证明摩擦系数与剪切速率呈良好的负相关趋势,能够稳定形成良好的润滑膜,奶茶呈现良好的口感顺滑度,奶茶口感顺滑度最佳。逻辑关系如图8所示。

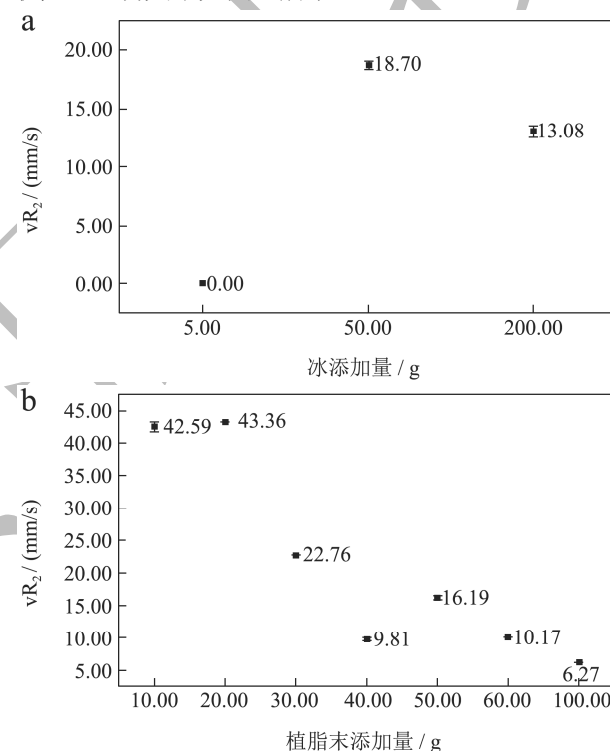


图7 不同配方奶茶样品的混合润滑区K

Fig.7 Mixing lubrication zone of milk tea samples of different formulations K

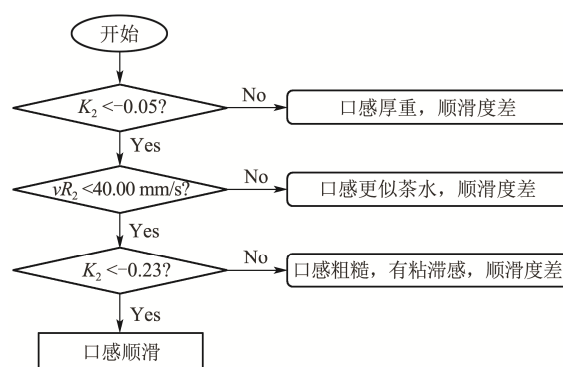


图8 逻辑关系图

Fig.8 Logical relationship diagram

表 5 验证组奶茶口感顺滑度得分

Table 5 Milk tea smoothness score in the verification group

| 项目 | 植脂末 10.00 g | 植脂末 80.00 g | 冰 25.00 g | 冰 150.00 g |
|----|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 得分 | 9.83±0.30 ^a | 13.17±0.27 ^b | 13.33±0.26 ^b | 16.50±0.29 ^c |
| 排名 | 4 | 3 | 2 | 1 |

注：不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。下表同。

表 6 验证组 K_2 值

Table 6 K_2 value in the validation group

| 项目 | 植脂末 10.00 g | 植脂末 80.00 g | 冰 25.00 g | 冰 150.00 g |
|-------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| K_2 | -0.23±0.00 ^a | -0.23±0.02 ^a | 0.02±0.00 ^b | -0.14±0.00 ^c |

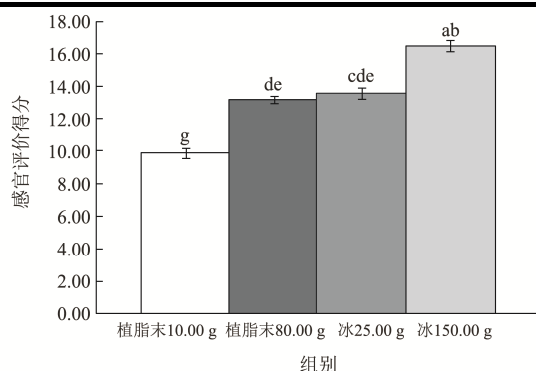


图 9 验证组感官评价得分

Fig.9 Sensory evaluation score in the validation group

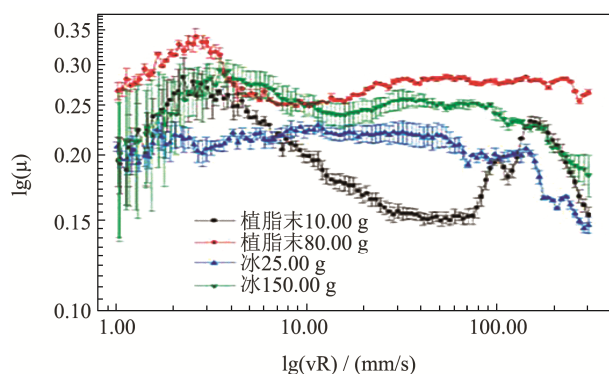


图 10 验证组 Stribeck 曲线

Fig.10 Stribeck curve in the validation group

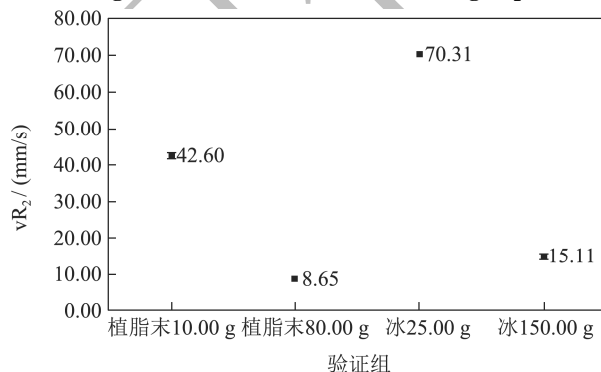


图 11 验证组 vR_2 值图

Fig.11 vR_2 values for the validation group

为进一步验证已构建的奶茶顺滑口感评价模型，本研究制作了四种不同配方的奶茶样品进行摩擦学行

为分析和感官评价。其中植脂末添加量 10.00 g、80.00 g 和冰添加量 25.00 g 奶茶感官评价得分不高，与其摩擦曲线的 $K_2 \in (-0.23, -0.05)$ 和 $vR_2 > 40.00$ mm/s 的曲线特征评价一致。而冰添加量 150.00 g 奶茶同时满足 $K_2 \in (-0.23, -0.05)$ 和 $vR_2 < 40.00$ mm/s，推测是理想的具有顺滑口感的奶茶，与感官评价结果一致。按照图 8 所示的逻辑关系，结合感官评价结果 (表 5)、 K_2 (表 6) 和 vR_2 (图 11) 数据结果得到如图 12 的验证结果。因此，该评价模型成立。

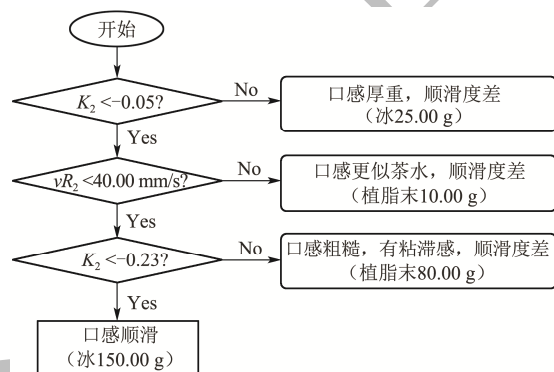


图 12 验证组验证结果图

Fig.12 Validation results in the validation group

3 结论

本实验系统研究了不同植脂末、冰块以及糖浆添加量三因素影响下的奶茶的感官评价、粒径分布、流变性和口腔软摩擦学。糖浆添加量对奶茶粒径分布和口腔软摩擦几乎没有影响，但对其特有的奶茶风味感知有一定的协同作用。感官评价数据结果表明，植脂末和冰添加量对奶茶的口感顺滑度影响最大，其中，植脂末添加量为 30.00 g~50.00 g 奶茶的口感最佳，顺滑度最好。实验结果表明奶茶植脂末添加量与奶茶的粒径呈负相关，与粘度呈正相关。当植脂末添加量为 60.00 g 时，奶茶的平均粒径为 0.66 μm ，G50 为 4.93×10^{-3} Pa·s。通过对样品进行口腔软摩擦学分析，建立了奶茶口感顺滑度的预测模型和评判标准，即只有当口腔软摩擦学曲线同时满足 $K_2 \in (-0.23, -0.05)$ 和 $vR_2 < 40.00$ mm/s 时，奶茶表现出较好的顺滑特性，否则奶茶口感淡薄或厚重，口感顺滑度差。因此，该口腔软摩擦模型能够评价不同配方奶茶的顺滑特性，这表明该技术在快速评价流体食品的口感顺滑方面具有实际应用前景。

该评价标准仍具有一定局限性，为扩大应用范围，需进一步扩大样本量，优化评价标准，建立更完善的评价模型，推广应用于大多数饮料食品和半固态类，预测与润滑性能相关的感官口感；同时为进一步研究奶茶口感顺滑度的机制，并实践于生产应用中，课题

组将在未来再开展奶茶顺滑剂的研究工作,为将来奶茶原料及相关食品添加剂开发奠定一定的基础。

参考文献

- [1] Sarkar A, Krop E M. Marrying oral tribology to sensory perception: A systematic review [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2019, 27: 64-73.
- [2] Liu F, Ye X, He Y, et al. Application of visible/near infrared spectroscopy and chemometric calibrations for variety discrimination of instant milk teas [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(2): 127-133.
- [3] 柳新荣,王炜清,刘元法,等.奶茶粉末油脂乳化液性能分析[J]. *食品与生物技术学报*,2022,41(3):96-102.
- [4] Choi Y, Lee J. The effect of extrinsic cues on consumer perception: A study using milk tea products [J]. *Food Quality and Preference*, 2019, 71: 343-353.
- [5] Fuhrmann P L, Aguayo M M, Jansen B, et al. Characterisation of friction behaviour of intact soft solid foods and food boli [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105441.
- [6] Corvera P B, Sanchez R A I, Meduna D I, et al. Soft tribology and its relationship with the sensory perception in dairy products: A review [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 874763.
- [7] Chen J. Food oral processing - A review [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(1): 1-25.
- [8] Xu W, Jiang J, Xu Q, et al. Drinking tastes of Chinese rice wine under different heating temperatures analyzed by gas chromatography-mass spectrometry and tribology tests [J]. *Journal of Texture Studies*, 2021, 52(1): 124-136.
- [9] Nguyen P T M, Bhandari B, Prakash S. Tribological method to measure lubricating properties of dairy products [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 168: 27-34.
- [10] Nguyen P T M, 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.
- [11] 洪泽翰,吴婉仪,李璐,等.不同大分子乳化剂构建番茄红素纳米乳液的体外消化规律比较[J]. *食品科学*,2019,40(10):1-7.
- [12] Liu D, Deng Y, Sha L, et al. Impact of oral processing on texture attributes and taste perception [J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2017, 54(8): 2585-2593.
- [13] 宋亚雄.味蕾组织传感器与甜味受体T1R2纳米传感器对照研究[D].天津:天津商业大学, 2020.
- [14] Pradal C, Stokes J R. Oral tribology: Bridging the gap between physical measurements and sensory experience [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2016, 9: 34-41.
- [15] Prakash S, Tan D D Y, Chen J. Applications of tribology in studying food oral processing and texture perception [J]. *Food Research International*, 2013, 54(2): 1627-1635.
- [16] 郑田要,张志刚,杨检林,等.均质法控制PET奶茶脂肪上浮的研究[J]. *饮料工业*,2014,17(2):57-59.
- [17] Daniloski D, Mccarthy N A, Auldism M J, et al. Properties of sodium caseinate as affected by the β -casein phenotypes [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 626: 939-950.
- [18] Liao M, Jin R, Ren H, et al. Orthogonal experimental design for the optimization of four additives in a model liquid infant formula to improve its thermal stability [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2022, 163: 113495.
- [19] 朱科学,赵书凡,朱红英,等.苦丁茶冬青多糖流变学特性研究[J]. *食品工业科技*,2017,38(22):61-70.
- [20] 谢建华,谢丙清,庞杰,等.魔芋葡甘聚糖与乳清蛋白的相互作用[J]. *食品科学*,2017,38(5):98-103.
- [21] Fava L, Serpa P, Kulkamp G I, et al. Evaluation of viscosity and particle size distribution of fresh, chilled and frozen milk of Lacatune ewes [J]. *Small Ruminant Research*, 2013, 113(1): 247-250.
- [22] Liu Y, Qu F, Luo L, et al. Detection of rice syrup from acacia honey based on lubrication properties measured by tribology technique [J]. *Tribology International*, 2019, 129: 239-245.
- [23] Wang Q, Wang X, Chen J. A new design of soft texture analyzer tribometer (STAT) for *in vitro* oral lubrication study [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106146.
- [24] Li X, Harding S E, Wolf B, et al. Instrumental characterization of xanthan gum and scleroglucan solutions: Comparison of rotational rheometry, capillary breakup extensional rheometry and soft-contact tribology [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 130: 107681.
- [25] Sasikumar R, Vivek K, Deka S C. Sensory evaluation of ultrasound assisted microwave treated fruit (*Haematocarpus validus*) juice through fuzzy logic approach [J]. *International Food Research Journal*, 2019, 26(4): 1229-1236.
- [26] 王亮.基于摩擦学的流体食品部分口感属性评价方法研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [27] 李立,张晓琴,张昀,等.食品口腔摩擦学研究进展[J]. *摩擦学报*,2019,39(1):118-129.
- [28] Laguna L, Fiszman S, Tarrega A. Saliva matters: Reviewing the role of saliva in the rheology and tribology of liquid and semisolid foods. Relation to in-mouth perception [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 116: 106660.
- [29] Godoi F C, Bhandari B R, Prakash S. Tribo-rheology and sensory analysis of a dairy semi-solid [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 70: 240-250.
- [30] Pang Z, Xu R, Zhu Y, et al. Tribo-rheology and kinetics of soymilk gelation with different types of milk proteins [J]. *Food Chemistry*, 2020, 311: 125961.

现代食品科技