

## 模拟口腔环境下脂肪对沙拉酱顺滑感的影响

王亮<sup>1</sup>, 钱善华<sup>1,2\*</sup>, 丁宗如<sup>1</sup>, 倪自丰<sup>1,2</sup>, 卞达<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 江南大学机械工程学院 江苏无锡 214122

<sup>2</sup> 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室 江苏无锡 214122)

**摘要** 脂肪对维持沙拉酱良好的品质发挥关键的作用,其含量变化影响沙拉酱的质构特性。摩擦测试是用于评价食品部分质构属性的常用方法。为弄清脂肪含量对沙拉酱顺滑感的影响,对不同脂肪含量的市售沙拉酱进行粒径和质构剖面分析(TPA),在聚二甲基硅氧烷(PDMS)及模拟唾液所构建的模拟口腔环境摩擦副上研究其摩擦性能。结果表明,沙拉酱的粒径随脂肪含量的降低而增大,与其摩擦性能显著相关( $P < 0.05$ ),与 TPA 参数和摩擦性能无显著的关联性。在唾液作用下,高脂沙拉酱平均摩擦系数显著低于低脂沙拉酱,且随脂肪含量的增加,沙拉酱的摩擦系数总体上呈线性降低;选择合适的工况参数更有利于表征沙拉酱顺滑感的差异。研究结果将为低脂沙拉酱及同类健康食品的研发提供参考。

**关键词** 沙拉酱; 脂肪含量; 食品质构; 颗粒尺寸; 摩擦系数

文章编号 1009-7848(2022)12-0165-09 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2022.12.017

沙拉酱因顺滑饱满的质构特性而备受消费者的青睐。近年来,国内沙拉酱的消费量以 10%~15% 快速增长<sup>[1]</sup>,已成为餐桌上常见的调味食品。高脂肪是使沙拉酱具有良好质构特性的主要原因<sup>[2]</sup>。随着对生活品质的追求,消费者更加注重低脂饮食,然而,脂肪减少会对食品的部分质构属性造成严重的影响<sup>[3]</sup>。为满足市场的需求,低脂沙拉酱应运而生,其是通过加入淀粉、黄原胶等增稠剂(又称为脂肪代替物)<sup>[4-6]</sup>来弥补诸如顺滑感降低,酱体稀薄等质构属性不足。然而,目前现有的低脂沙拉酱能否保持原有的顺滑感,及其评定方法尚需深入研究。

通常情况下,对沙拉酱的感官评定是最直接、有效的方法,然而,人工评定耗时费用高昂,而通过仪器对食品进行部分质构属性评定是一种可行的替代方法。食品质构属性的感知源于人们在口腔加工过程中(接触、咀嚼、吞咽)对食品的综合感受<sup>[7]</sup>。食品在口腔加工过程中存在很多的摩擦运动,如舌对上颚、舌对牙齿、牙齿对食品的相互摩擦,这些摩擦运动是影响其质构感知的重要因

素<sup>[8]</sup>。近年来,摩擦技术被广泛应用于食品口感的部分属性评定,研究发现食品的摩擦性能与诸如顺滑感、奶油感、滑溜感等质构属性具有很高的关联性<sup>[9-12]</sup>。通过摩擦性能评价沙拉酱的顺滑感也是一种有效的方法。

然而,食品的摩擦性能与诸多因素有关,还原真实口腔生理环境是精准表征食品摩擦性能与其顺滑感的重要条件之一,如人舌性能及唾液。真实人舌的表面覆盖大量丝状乳头,而这些丝状乳头所构成舌表面纹理对食品在口腔中摩擦性能有着极为重要影响<sup>[13-14]</sup>。聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)作为一种有机硅材料,其性质稳定且表面纹理与力学特性易于调控,被广泛应用于口腔摩擦学领域,如模拟舌头、上颚等软组织<sup>[15-18]</sup>。此外,唾液作为口腔中分泌的消化液,主要由水、无机盐、黏蛋白以及各种酶类所构成,这些成分在湿润与润滑食物时也会引起食品微观结构及质构变化<sup>[19]</sup>。因此,基于 PDMS 制备的口腔仿生软材料以及模拟唾液构建软体摩擦副,用于模拟口腔环境。

本文以不同脂肪含量的市售沙拉酱为研究对象,对其进行粒径和质构剖面分析,利用所构建的模拟口腔环境,探究脂肪含量对沙拉酱顺滑感和摩擦性能的影响。

收稿日期: 2021-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775244); 中国博士后科学基金特别资助项目(2018T110439)

第一作者: 王亮,男,硕士生

通信作者: 钱善华 E-mail: qianjnw@126.com

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

5种市售高脂沙拉酱及其低脂沙拉酱,具体信息见表1。聚二甲基硅氧烷(PDMS,Sylgard

184),美国道康宁公司;淀粉酶、氯化钠、氯化钾、碳酸氢钠,国药集团化学试剂有限公司;乙醇,上海泰坦科技股份有限公司;胃黏膜素,南京都莱生物技术有限公司。

表1 沙拉酱样品的基本信息

Table 1 Basic information sheet of salad sauces

名称	编号	脂肪含量/%	主要增稠剂
好乐门原味蛋黄酱	AH	79	-
好乐门零脂蛋黄酱	AL	2.9	玉米淀粉、柑橘纤维
丘比蛋黄酱	BH	76.5	黄原胶
丘比蛋黄酱(热量减半)	BL	32.5	改性淀粉、黄原胶
亨氏香甜沙拉酱	CH	64	黄原胶
亨氏小轻纯沙拉酱	CL	31.2	改性淀粉、黄原胶
丘比香甜沙拉酱	DH	63.1	黄原胶
丘比香甜沙拉酱(热量减半)	DL	23.1	改性淀粉、黄原胶
百利香甜沙拉酱	EH	41	改性淀粉、黄原胶
百利香甜沙拉酱(清爽型)	EL	25.3	改性淀粉、黄原胶

注:H代表高脂型沙拉酱,L代表低脂型沙拉酱,下文中描述均用编号代替;脂肪含量是指脂肪质量占沙拉酱总质量的比例。

MFT-5000 摩擦试验机、MFT-D 三维形貌仪,美国 Rtec-instrument 公司;DZF-6020 真空电热干燥箱,上海精密仪器有限公司;超声波清洗机,深圳福洋科技集团有限公司;TMS-Pro 物性分析仪,美国 FTC 公司;Battersize-2600 激光粒度分布仪,丹东百特仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 沙拉酱的粒径表征 取 0.1 g 沙拉酱样品,在 150 mL 十二烷基硫酸钠溶液(1 g/L)中稀释,通过低速搅拌使沙拉酱完全溶解,然后,用 Battersize-2600 激光粒度分布仪测定样品的粒径,折射率和吸收率分别设置为 1.46 和 0.001<sup>[20]</sup>。沙拉酱样品的平均粒径由体积平均直径  $d_{4,3}$  表示。

1.2.2 沙拉酱的质构参数表征 根据半固体食品质构测定方法<sup>[21]</sup>测定沙拉酱的质构参数,具体如下:将需测定的沙拉酱样品置于 50 mL 烧杯中,在 4 °C 冰箱中保存 24 h。测定前将样品从冰箱中取出,于 24 °C 下放置 1 h,然后,将含沙拉酱的烧杯置于 TMS-Pro 物性分析仪样品台上做压缩试验,以获得沙拉酱样品的硬度、弹性、内聚性、黏附性、胶黏性以及咀嚼性。试验时,采用二次压缩模式,使用圆柱状探头(TMS 25.4 mm Perspex),测试前、中、后速度均为 1 mm/s,压缩程度 30%,触发压

力 0.15 N,间隔时间 2 s。注意:每次试验均更换新的样品。

### 1.2.3 沙拉酱的摩擦性能表征

1) 模拟口腔软组织材料的制备 首先,为获得具有模拟人舌的表面形貌的仿生舌和仿生上颚<sup>[22]</sup>,设计加工了带有微凸体的 PDMS 基底模具(半球形微凸体的直径、高度、间距分别为 0.72, 0.36, 0.86 mm)和半球型压头模具(直径 12.7 mm)。其次,将 PDMS 与固化剂按 10:1 比例混合并充分搅拌均匀后放入真空干燥箱中负压静置 10 min,待气泡完全消除后分别倒入基底模具和压头模具中,将模具放入 75 °C 真空干燥箱中,4 h 后取出,获得覆盖有半球微凸体(覆盖面积为 44×29 mm<sup>2</sup>)的 PDMS 基底(直径为 49 mm,厚度为 3 mm)和 PDMS 压头(直径为 12.7 mm),微凸体 PDMS 基底的微观形貌及实物如图 1 所示。

2) 模拟唾液的制备 根据文献[23]的模拟唾液配制方法,分别将不同量的氯化钠(0.117 g/L)、氯化钾(0.149 g/L)、碳酸氢钠(2.1 g/L)、淀粉酶(2 g/L)以及胃黏膜素(1.5 g/L)加入去离子水中,搅拌至完全溶解,制得模拟唾液。

3) 沙拉酱摩擦性能的测定 沙拉酱摩擦性能表征是在 MFT-5000 摩擦试验机上进行的,测定

装置如图 2 所示。试验样品为纯沙拉酱和 50% 沙拉酱(即添加同质量模拟唾液混合的样品<sup>[9]</sup>),摩擦副为表面含微凸体的 PDMS 基底与 PDMS 压头。试验前,将摩擦副置于盛有乙醇的超声波清洗机中清洗 10 min 并烘干,将 PDMS 基底固定于旋转台中心处,沙拉酱均匀涂抹于 PDMS 基底表面,PDMS 压头通过金属销固定于试验机传感器上。通过传感器采集 z 方向上压力和 x 方向上摩擦力,测定样品的摩擦系数。选用 0.5,1,2N 为试验载荷(人舌压力一般不超过 10 N<sup>[9]</sup>),线速度为 20 mm/s,旋转半径 10 mm,时间 60 s,各项参数均由试验机的程序控制。每次试验结束后,均更换新的沙拉酱样品与摩擦副。

### 1.3 数据分析

采用 SPSS 25 软件对试验数据进行方差分析、显著性检验和相关性分析。所有试验均重复 3 次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沙拉酱的粒径

图 3 所示沙拉酱的平均粒径及其分布。随着脂肪含量的降低,沙拉酱平均粒径呈增长趋势。5 种高脂沙拉酱的平均粒径分布于 2~6 μm,各高脂沙拉酱间的粒径较为接近;而 5 种低脂沙拉酱的粒径均高于高脂沙拉酱。当脂肪含量低于 30% 时,低脂沙拉酱的粒径出现较大幅度上升,沙拉酱 DL、EL 的平均粒径分别为 19.46 μm 和 19.31 μm,两者平均粒径约为同组高脂沙拉酱 DH、EH

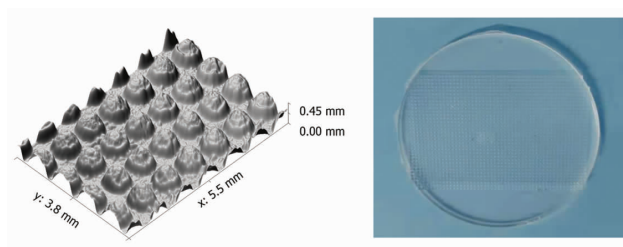


图 1 微凸体 PDMS 基底的微观形貌及其实物图  
Fig.1 Three-dimensional morphology and physical object of microconvex PDMS substrate

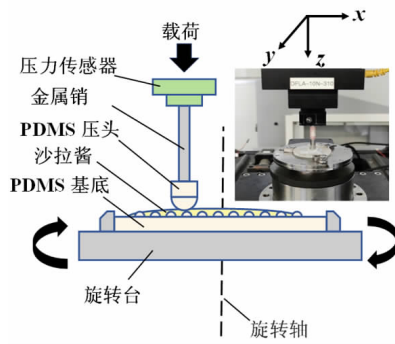


图 2 摩擦试验装置的示意图  
Fig.2 Schematic for the rubbing testing rig

平均粒径的 5 倍;而脂肪含量仅占 2.9% 的沙拉酱 AL 的平均粒径达 43.08 μm,远高于同组高脂沙拉酱 AH 的 5.84 μm。由粒径分布可以发现,高脂沙拉酱的粒径分布以单峰为主,主要反映脂肪颗粒的分布状态,波峰介于 1~10 μm 的范围且峰值相对突出;而低脂沙拉酱总体呈多峰分布,脂肪分布的峰值比高脂沙拉酱明显降低,介于 10~100 μm 范围的峰值主要反映增稠剂的颗粒分布。从脂肪

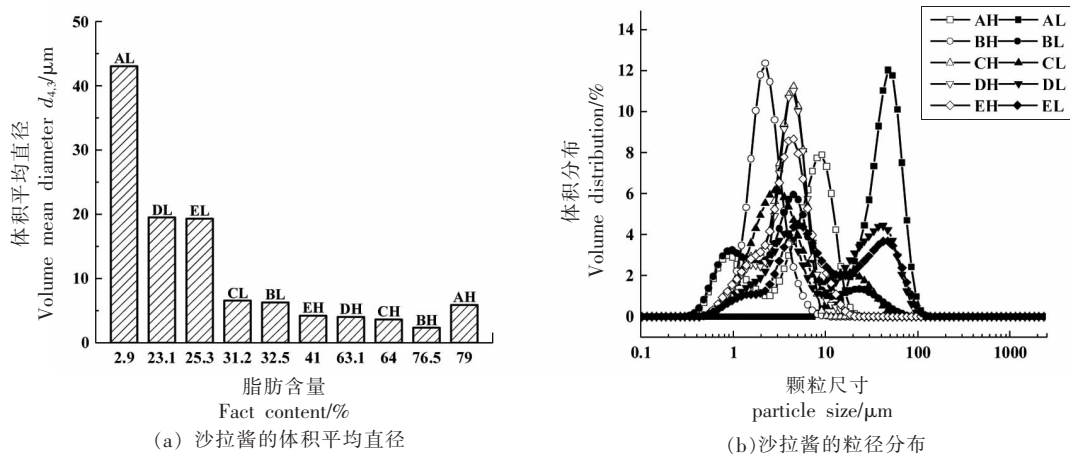


图 3 沙拉酱的体积平均直径及粒径分布

Fig.3 Volume mean diameter and particle size distribution of salad sauces

变化的角度看,随着脂肪的减少,沙拉酱的粒径分布由单峰向多峰转变,波峰逐渐向右移动,而当脂肪含量很低时,粒径分布又恢复到单峰的状态。平均粒径和粒径分布表明,随着沙拉酱脂肪含量的降低,颗粒尺寸较大的增稠剂在沙拉酱中占比提升,导致沙拉酱的平均粒径的增长。

## 2.2 沙拉酱的 TPA 参数

沙拉酱的 TPA 参数见表 2。沙拉酱硬度介于 0.592~1.275 N, A 组的高脂沙拉酱硬度低于对应的低脂沙拉酱, B 组沙拉酱的硬度值没有显著差异, C、D、E 组的高脂沙拉酱硬度显著高于同组的低脂沙拉酱。沙拉酱的弹性介于 0.807~0.928, 除高脂沙拉酱 EH 外, 其它 4 种高脂沙拉酱的弹性

均高于同组对应的低脂沙拉酱。对于黏附性, 除 A 组外, B、C、D、E4 组的高脂沙拉酱均显著高于同组对应的低脂沙拉酱。在内聚性方面, 仅有 B、C 组的高脂沙拉酱高于对应的低脂型沙拉酱, 其余 3 组的高低脂沙拉酱间未出现明显差异。在胶黏性上, 高脂沙拉酱 AH 明显低于低脂沙拉酱 AL, 而 CH、DH 两型高脂沙拉酱显著高于对应的低脂沙拉酱, BH、EH 高脂沙拉酱与对应的低脂沙拉酱没有明显差异。沙拉酱的咀嚼度与胶黏性类似。从 TPA 的各项参数来看, 高脂沙拉酱的弹性和黏附性普遍高于其低脂沙拉酱, 而其余 TPA 参数在对应的高低脂沙拉酱间未有规律性的差异。

表 2 各组沙拉酱的 TPA 参数

Table 2 TPA parameters of salad sauces

编号	硬度/N	弹性	黏附性/mJ	内聚性	胶黏性/N	咀嚼度/N
AH	0.592 ± 0.044 <sup>e</sup>	0.924 ± 0.011 <sup>a</sup>	-2.962 ± 0.308 <sup>f</sup>	0.878 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.520 ± 0.041 <sup>f</sup>	0.480 ± 0.043 <sup>e</sup>
AL	0.968 ± 0.065 <sup>d</sup>	0.863 ± 0.028 <sup>b</sup>	-4.320 ± 0.147 <sup>d</sup>	0.861 ± 0.011 <sup>a</sup>	0.833 ± 0.053 <sup>cd</sup>	0.720 ± 0.068 <sup>bc</sup>
BH	0.887 ± 0.010 <sup>d</sup>	0.928 ± 0.025 <sup>a</sup>	-4.090 ± 0.085 <sup>d</sup>	0.880 ± 0.047 <sup>a</sup>	0.781 ± 0.051 <sup>cd</sup>	0.725 ± 0.066 <sup>bc</sup>
BL	0.948 ± 0.049 <sup>d</sup>	0.861 ± 0.042 <sup>b</sup>	-3.379 ± 0.175 <sup>e</sup>	0.778 ± 0.045 <sup>d</sup>	0.739 ± 0.080 <sup>de</sup>	0.639 ± 0.098 <sup>cd</sup>
CH	1.222 ± 0.040 <sup>ab</sup>	0.883 ± 0.009 <sup>ab</sup>	-5.422 ± 0.066 <sup>b</sup>	0.863 ± 0.007 <sup>a</sup>	1.054 ± 0.025 <sup>a</sup>	0.930 ± 0.020 <sup>a</sup>
CL	1.088 ± 0.100 <sup>c</sup>	0.839 ± 0.017 <sup>bc</sup>	-4.787 ± 0.318 <sup>e</sup>	0.803 ± 0.030 <sup>cd</sup>	0.872 ± 0.066 <sup>bc</sup>	0.732 ± 0.066 <sup>bc</sup>
DH	1.177 ± 0.054 <sup>abc</sup>	0.867 ± 0.026 <sup>b</sup>	-5.207 ± 0.093 <sup>b</sup>	0.812 ± 0.025 <sup>bcd</sup>	0.956 ± 0.073 <sup>ab</sup>	0.830 ± 0.084 <sup>ab</sup>
DL	0.867 ± 0.051 <sup>d</sup>	0.807 ± 0.027 <sup>c</sup>	-2.956 ± 0.007 <sup>f</sup>	0.770 ± 0.007 <sup>d</sup>	0.667 ± 0.034 <sup>e</sup>	0.538 ± 0.021 <sup>de</sup>
EH	1.275 ± 0.103 <sup>a</sup>	0.844 ± 0.025 <sup>bc</sup>	-6.126 ± 0.455 <sup>a</sup>	0.833 ± 0.022 <sup>abc</sup>	1.062 ± 0.095 <sup>a</sup>	0.898 ± 0.105 <sup>a</sup>
EL	1.161 ± 0.034 <sup>bc</sup>	0.883 ± 0.030 <sup>ab</sup>	-5.194 ± 0.132 <sup>b</sup>	0.856 ± 0.005 <sup>ab</sup>	0.993 ± 0.035 <sup>a</sup>	0.877 ± 0.048 <sup>a</sup>

注: 同列中, 不同字母表示在统计学上具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

表 3 列出沙拉酱的各项 TPA 参数与脂肪含量的相关性。沙拉酱的弹性与脂肪含量呈较强的相关性 ( $P < 0.05$ ), 而其余 5 项 TPA 参数与脂肪含量的相关性均较弱。值得强调的是, 不同品牌沙拉酱的加工工艺以及配料差异等因素对黏附性有较大的影响, 而黏附性与脂肪含量未呈显著的相关性。除 A 组外, 高脂沙拉酱黏附性均显著高于同组的低脂沙拉酱, 表明脂肪增加能够提高沙拉酱的黏附性。

## 2.3 沙拉酱的摩擦性能

图 4 所示为 0.5, 1, 2 N 载荷工况下沙拉酱的摩擦系数。其介于 0.12~0.24, 随着载荷的增加, 摩擦系数整体上呈下降趋势, 这符合软摩擦副的摩擦行为特征<sup>[22]</sup>。在 0.5 N 载荷工况下, B 和 C 组低

表 3 TPA 参数与脂肪含量的相关性

Table 3 Correlations of TPA parameters with fat content

TPA 参数	$C_F$	
	$r$	$P$
硬度	-0.218	0.545
弹性	0.697	< 0.05
黏附性	-0.017	0.962
内聚性	0.439	0.205
胶黏性	-0.137	0.706
咀嚼性	-0.023	0.950

注:  $C_F$  为脂肪含量。

脂沙拉酱的摩擦系数明显高于同组高脂沙拉酱, 而 A、D、E 组的低脂沙拉酱的摩擦系数与同组高



脂沙拉酱的差异不大;在添加模拟唾液后,B、D组的高、低脂沙拉酱间的摩擦系数较接近,而A、C、E组的低脂沙拉酱与高脂沙拉酱的摩擦系数产生一定差异。在1 N载荷工况下,除B、C组外,其余3组的低脂沙拉酱的摩擦系数与同组高脂沙拉酱均较为接近,整体情况与0.5 N工况下测得的结果较为相似。添加唾液后,5组低脂沙拉酱的摩擦系数均与同组高脂沙拉酱的摩擦系数形成明显的区

分。在2 N载荷工况下,A、D、E组的低脂沙拉酱摩擦系数低于同组高脂沙拉酱的摩擦系数,与高脂沙拉酱相比,低脂沙拉酱的摩擦系数呈现较大幅度的降低;而添加唾液后,沙拉酱整体上呈“低脂高、高脂低”的摩擦系数特征。综合来看,无论在何种载荷工况下,在唾液作用下,低脂沙拉酱整体的摩擦性能均和高脂沙拉酱的摩擦性能有较显著的差异。

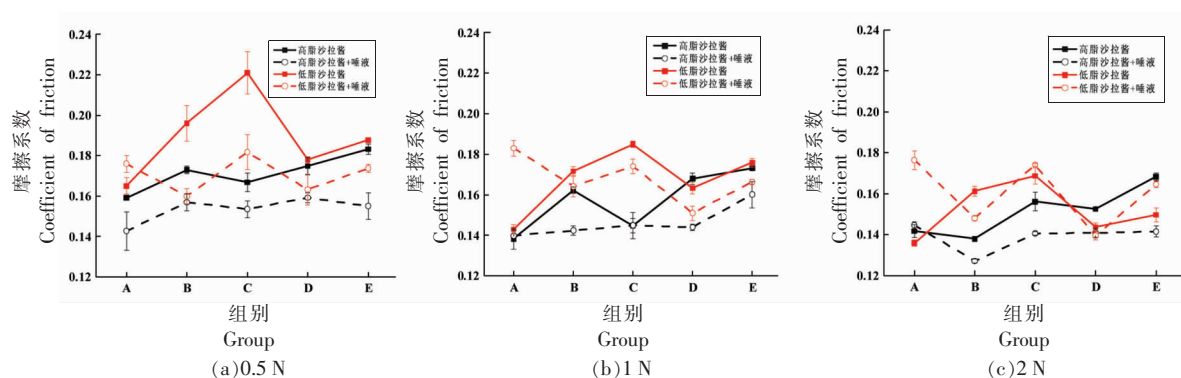


图 4 不同载荷条件下沙拉酱的摩擦特性

Fig.4 Frictional properties of salad sauces under different loading conditions

此外,对5种高、低脂沙拉酱在添加唾液前、后的摩擦系数做独立样本  $t$  检验,将各沙拉酱的摩擦系数与其脂肪含量进行相关性分析,结果见表4和表5。未添加唾液前,5种高脂与低脂沙拉酱的摩擦系数不存在显著性差异( $P > 0.05$ ),且摩擦系数与其脂肪含量间也无明显相关。添加唾液后,3种载荷工况下高脂与低脂沙拉酱的摩擦系数均有显著差异,且摩擦系数与脂肪含量呈较强的相关性( $|r| > 0.7, P < 0.05$ )。独立样本  $t$  检验与相关性分析表明,唾液能够还原沙拉酱的脂肪含量与其摩擦性能间的相关性,脂肪含量越高,沙拉酱的摩擦系数越低;低脂沙拉酱的摩擦性能与高

脂沙拉酱存在一定差距,与低脂沙拉酱相比,高脂沙拉酱在唾液作用下仍能维持较好的顺滑感。

采用线性模型拟合唾液添加后的沙拉酱摩擦系数随脂肪含量的变化关系,如图5所示。随脂肪含量增加,3种工况下沙拉酱摩擦系数整体呈降低趋势。与0.5 N和2 N载荷相比,1 N载荷工况下摩擦系数与脂肪含量的线性关系更为显著,拟合的决定系数  $R^2$  达0.779,表明不同的工况参数对沙拉酱摩擦性能表征产生一定的影响。选取合适的工况参数能精准表征沙拉酱的摩擦性能差异,利于对沙拉酱的顺滑感进行准确评定。

表 4 唾液添加前、后高脂与低脂沙拉酱摩擦系数的对比

Table 4 Comparison of coefficients of friction between high-fat and low-fat salad sauces

样本量		0.5N		1N		2N	
		COF( $\bar{x} \pm s$ )	COFs( $\bar{x} \pm s$ )	COF( $\bar{x} \pm s$ )	COFs( $\bar{x} \pm s$ )	COF( $\bar{x} \pm s$ )	COFs( $\bar{x} \pm s$ )
高脂组	5	0.171 ± 0.009	0.153 ± 0.006	0.157 ± 0.015	0.146 ± 0.008	0.151 ± 0.012	0.139 ± 0.007
低脂组	5	0.190 ± 0.021	0.171 ± 0.009	0.167 ± 0.016	0.168 ± 0.012	0.152 ± 0.013	0.161 ± 0.016
$t$		-1.778	-3.510	-1.072	-3.342	-0.065	-2.744
$P$		0.113	< 0.01	0.315	< 0.05	0.950	< 0.05

注:CoF和CoFs分别代表未添加和添加唾液后的沙拉酱的平均摩擦系数。

表5 沙拉酱摩擦系数与脂肪含量相关性

Table 5 Correlations between coefficient of friction and fat content

载荷/N	摩擦系数	$C_F$	
		$r$	$P$
0.5	CoF	-0.370	0.292
	CoFs	-0.774	<0.01
1	CoF	-0.278	0.436
	CoFs	-0.882	<0.01
2	CoF	-0.079	0.829
	CoFs	-0.720	<0.05

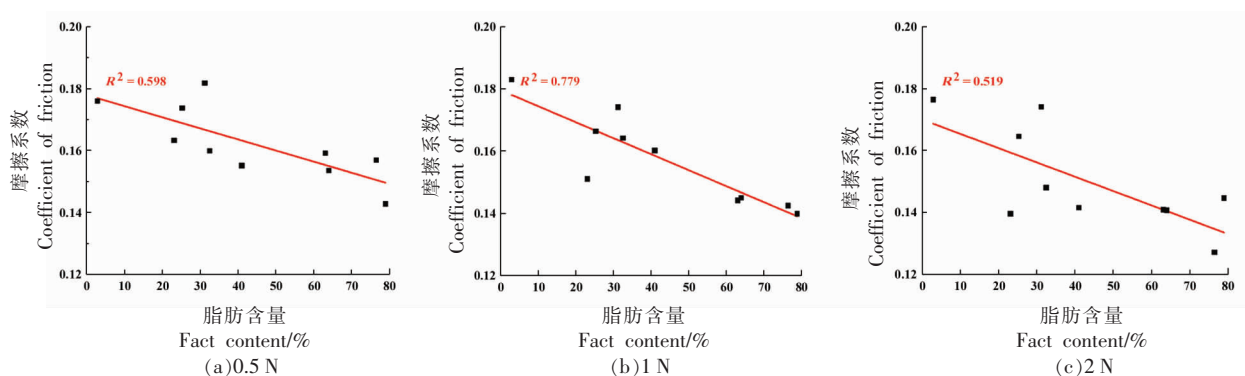


图5 沙拉酱摩擦系数随脂肪含量的变化关系

Fig.5 Variation in coefficient of friction with fat content

## 2.4 讨论

从上述结果看,模拟口腔环境下的摩擦试验能较好地表征高脂与低脂沙拉酱间摩擦性能的差异,沙拉酱脂肪含量和唾液对其摩擦性能有较大影响。随着脂肪含量的增加,其摩擦系数总体呈线性降低趋势。然而,TPA法所得沙拉酱硬度、弹性、黏附性等6项TPA参数与其摩擦系数间的相关

性见表6,两者均无显著的相关性( $P > 0.05$ )。虽然TPA法是最早被认定的食品质构评价方法,在食品质构分析方面得许多的应用<sup>[24-25]</sup>,但是,TPA法是通过压缩测试方法分析食品的质构属性,在顺滑感、奶油感、滑溜感等这类与食品表面性质相关的质构属性评价时,其存在较大的局限性。

表6 沙拉酱的摩擦系数与TPA参数的相关性

Table 6 Correlations between coefficient of friction and TPA parameters

摩擦系数		硬度		弹性		黏附性		内聚性		胶黏性		咀嚼性	
		$r$	$P$	$r$	$P$	$r$	$P$	$r$	$P$	$r$	$P$	$r$	$P$
0.5 N	CoF	0.326	0.358	-0.477	0.163	0.165	0.648	-0.584	0.076	0.198	0.583	0.116	0.749
	CoFs	0.328	0.355	-0.476	0.164	0.194	0.591	-0.279	0.434	0.274	0.444	0.202	0.575
1 N	CoF	0.481	0.160	-0.477	0.187	0.516	0.361	-0.579	0.079	0.356	0.313	0.283	0.428
	CoFs	0.258	0.471	-0.456	0.186	0.173	0.632	-0.222	0.537	0.217	0.547	0.140	0.700
2 N	CoF	0.609	0.062	-0.436	0.208	0.516	0.127	-0.479	0.161	0.503	0.139	0.422	0.224
	CoFs	0.127	0.726	-0.286	0.423	0.120	0.742	-0.050	0.891	0.115	0.752	0.061	0.866

增稠剂是沙拉酱的主要成分之一,加入淀粉、黄原胶这类增稠剂可以尽量避免因脂肪减少而造成的沙拉酱顺滑感下降<sup>[26]</sup>。其主要原因是这些增

稠剂在食物体系中所形成的颗粒较大,不易被嵌入摩擦副表面的沟壑,大量颗粒被卷吸到摩擦副接触区充当滚珠作用,将表面的滑动摩擦转变为

滚动摩擦,使得沙拉酱产生较好的摩擦性能<sup>[23]</sup>。这类增稠剂润滑效果主要依赖于食品体系具有较好的黏度和合适的脂肪含量<sup>[27-28]</sup>。沙拉酱体积平均直径与摩擦系数的相关性见表 7,在唾液稀释和低脂肪的作用下,加入更多增稠剂非但不能改善沙拉酱的摩擦性能,还会导致沙拉酱的粒径增大,进而使沙拉酱质构变粗糙<sup>[29]</sup>。低脂沙拉酱仍需含有一定量的脂肪,通过淀粉和黄原胶等的乳化作用产生充足的脂肪微粒,来维持沙拉酱的顺滑感<sup>[3]</sup>。

同时,图 4 还显示唾液对沙拉酱的摩擦性能影响显著。唾液改善沙拉酱的摩擦性能,使高、低脂沙拉酱间的摩擦性能产生明显的差异。这可能是由于唾液与沙拉酱发生复杂的胶体作用,唾液中无机盐、黏蛋白等成分导致沙拉酱乳液结构失稳,产生絮凝,使原本均匀分布于沙拉酱乳液中

表 7 沙拉酱的摩擦系数与体积平均直径  $d_{4,3}$  的相关性

Table 7 Correlations between coefficient of friction and volume mean diameter

载荷/N	摩擦系数	$d_{4,3}$	
		$r$	$P$
0.5	CoF	-0.194	0.592
	CoFs	0.560	0.092
1	CoF	-0.278	0.437
	CoFs	0.666	< 0.05
2	CoF	-0.502	0.140
	CoFs	0.646	< 0.05

脂肪微粒聚集并附着于舌、上颚等软组织表面<sup>[30]</sup>,如图 6 所示。在唾液的作用下,高脂沙拉酱能够释放更多的脂肪,促进口腔软组织表面间的润滑,使沙拉酱的顺滑感更好。

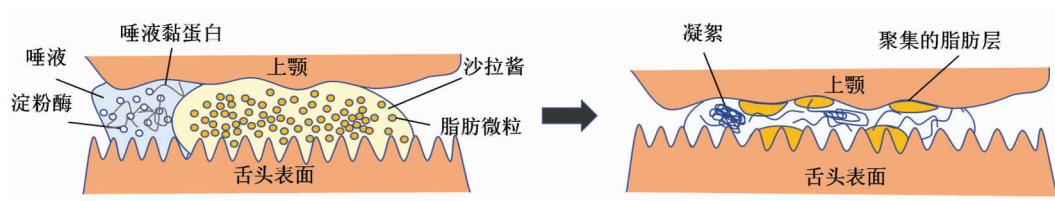


图 6 沙拉酱中脂肪形态在唾液影响下的变化

Fig.6 Transformation of the fat form in salad sauce under the influence of saliva

本文研究 5 种品牌的含高、低脂肪的沙拉酱摩擦性能,通过唾液的作用以及选择合适的测定参数,模拟口腔环境的摩擦测试,能较好地地区分高、低脂肪沙拉酱的摩擦性能差异,表明摩擦方法能够较好地评价沙拉酱的顺滑感性能。同时,脂肪对于维持沙拉酱良好的质构属性有重要作用。与低脂沙拉酱相比,高脂肪沙拉酱的顺滑感仍存在一定的优势。如何在沙拉酱的脂肪含量、颗粒尺寸和质构属性方面寻找平衡点,以及开发性能更优的脂肪替代物,是当下和未来食品工业亟需解决的关键问题。

### 3 结论

1) 沙拉酱的平均体积直径随脂肪含量的降低呈增大趋势,且低脂沙拉酱的粒径呈现多峰分布的状态。粒径大小与沙拉酱的摩擦性能存在显著关联,较大粒径导致沙拉酱的摩擦系数增加,进

而影响其顺滑感。

2) 沙拉酱的硬度、内聚性、胶黏性和咀嚼性与脂肪含量的关联性较弱。沙拉酱的 TPA 参数与其摩擦系数没有显著的关联性,TPA 法不适用于沙拉酱顺滑感的评定。

3) 在唾液作用下,高脂沙拉酱的摩擦系数显著低于低脂沙拉酱的摩擦系数。随脂肪含量的增加,沙拉酱的摩擦系数总体上呈线性降低。此外,选择合适的工况参数有利于表征沙拉酱顺滑感的差异。

### 参 考 文 献

- [1] 辛松林. 沙拉酱的研究进展与开发[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(2): 134-136.  
XIN S L. Research progress and development on salad sauce [J]. Food Research and Development, 2014, 35(2): 134-136.

- [2] 胡小雪, 陈建设, 王鑫森. 食品中脂肪的感官机制研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 370-376.  
HU X X, CHEN J S, WANG X M. Research progress on sensory mechanisms of food fat[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(1): 370-376.
- [3] MA Z, BOYE J I. Advances in the design and production of reduced-fat and reduced-cholesterol salad dressing and mayonnaise: a Review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 648-670.
- [4] 王嫣, 庞艳生. 变性淀粉在低脂沙拉酱中的应用及性质比较[J]. 中国调味品, 2018, 43(5): 141-144, 148.  
WANG Y, PANG Y S. Application and properties comparison of modified starch in low-fat salad dressing[J]. China Condiment, 2018, 43(5): 141-144, 148.
- [5] 徐群英, 赵锦妆. 1种果胶为基质的脂肪替代物的制备[J]. 中国食品学报, 2020, 20(6): 181-187.  
XU Q Y, ZHAO J Z. Preparation of a pectin-based matrix fat substitute[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(6): 181-187.
- [6] GOLCHOOBI L, ALIMI M, SHOKOOHI S, et al. Interaction between nanofibrillated cellulose with guar gum and carboxy methyl cellulose in low-fat mayonnaise[J]. Journal of Texture Studies, 2016, 47(5): 403-412.
- [7] 陈伟, 陈建设. 食品的品质及其性质[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 377-384.  
CHEN W, CHEN J S. Food texture and properties [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(1): 377-384.
- [8] 李立, 张晓琴, 张昀, 等. 食品口腔摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(1): 118-129.  
LI L, ZHANG X Q, ZHANG Y, et al. Progress of oral tribology in food[J]. Tribology, 2019, 39(1): 118-129.
- [9] UPADHYAY R, CHEN J S. Smoothness as a tactile percept: Correlating 'oral' tribology with sensory measurements [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 38-47.
- [10] UPADHYAY R, AKTAR T, CHEN J S. Perception of creaminess in foods[J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(3): 375-388.
- [11] CHOJNICKA-PASZUN A, JONGH H, KRUIF C. Sensory perception and lubrication properties of milk; Influence of fat content[J]. International Dairy Journal, 2012, 26(1): 15-22.
- [12] 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.
- [13] ESSICKA G K, CHOPRAC A, GUESTB S, et al. Lingual tactile acuity, taste perception, and the density and diameter of fungiform papillae in female subjects[J]. Physiology & Behavior, 2004, 80(2/3): 289-302.
- [14] SHEWAN H M, PRADAL C, STOKES J R. Tribology and its growing use toward the study of food oral processing and sensory perception[J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(1): 7-22.
- [15] VICENTE J D, STOKES J R, SPIKES H A. The frictional properties of newtonian fluids in rolling-sliding soft-EHL contact[J]. Tribology Letters, 2005, 20(3/4): 273-286.
- [16] BONGAERTS J, FOURTOUNI K, STOKES J R. Soft-tribology: Lubrication in a compliant PDMS-PDMS contact[J]. Tribology International, 2007, 39(10): 1531-1542.
- [17] MACAKOVA L, YAKUBOV G E, PLUNKETT M A, et al. Influence of ionic strength on the tribological properties of pre-adsorbed salivary films[J]. Tribology International, 2011, 44(9): 956-962.
- [18] SELWAY N, STOKES J R. 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.
- [19] CHEN J S. Food oral processing: Some important underpinning principles of eating and sensory perception[J]. Food Structure, 2014, 1(2): 91-105.
- [20] 刘贺, 刘昊东, 郭晓飞, 等. 脂肪模拟品对蛋黄酱流变学性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(12): 64-70.  
LIU H, LIU H D, GUO X F, et al. Influence of fat mimetic on rheology properties of mayonnaise[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(12): 64-70.
- [21] 张鸿超. 高油大豆和低油大豆油脂体对蛋黄酱品质及稳定性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.



- ZHANG H C. Effect of oil body from high oil soybeans and low oil soybeans on the quality and stability of mayonnaise[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [22] 王迪, 钱善华, 程帅, 等. 口腔环境下巧克力摩擦性能影响的试验研究[J]. 润滑与密封, 2018, 43(12): 57-62.
- WANG D, QIAN S H, CHENG S, et al. Experimental investigation on the frictional properties of chocolate in the oral environment[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(12): 57-62.
- [23] MORELL P, CHEN J S, FISZMAN S M. The role of starch and saliva in tribology studies and the sensory perception of protein-added yogurts[J]. Food & Function, 2016, 8(2): 545-553.
- [24] STOKES J R, BOEHM M W, BAIER S K. Oral processing, texture and mouthfeel: From rheology to tribology and beyond[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2013, 18(4): 349-359.
- [25] CHEN L, OPARA U L. Texture measurement approaches in fresh and processed foods - A review[J]. Food Research International, 2013, 51(2): 823-835.
- [26] MIRZANAJAFI -ZANJANI M, YOUSEFI M, EHSANI A. Challenges and approaches for production of a healthy and functional mayonnaise sauce[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(8): 2471-2484.
- [27] IMAI E, HATAE K, SHIMADA A. Oral perception of grittiness: Effect of particle size and concentration of the dispersed particles and the dispersion medium [J]. Journal of Texture Studies, 1995, 26(5): 561-576.
- [28] ENGELEN L, WIJK R A D, BILT A V D, et al. Relating particles and texture perception[J]. Physiology & Behavior, 2005, 86(1/2): 111-117.
- [29] WIJK R A D, PRINZ J F. Mechanisms underlying the role of friction in oral texture[J]. Journal of Texture Studies, 2006, 37(4): 413-427.
- [30] SARKAR A, SINGH H. Oral behaviour of food emulsions[M]// CHEN J S, ENGELEN L. Food oral processing: Fundamentals of eating and sensory perception. Oxford: Wiley-Blackwell, 2012: 111-138.

## The Effect of Fat Content on the Smoothness of Salad Sauce in Simulated Oral Environment

Wang Liang<sup>1</sup>, Qian Shanhua<sup>1,2\*</sup>, Ding Zongru<sup>1</sup>, Ni Zifeng<sup>1,2</sup>, Bian Da<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu*

<sup>2</sup>*Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, Jiangsu*

**Abstract** Fat plays a key role in maintaining the good quality of salad sauces, and its variation affects the texture properties of salad sauces. Rubbing test is a common method used to evaluate some of the texture properties of food products. In order to investigate the effect of fat content on the smoothness of salad sauces, particle size measurements and texture profile analysis (TPA) was performed for commercial salad sauces with different fat contents, and then the friction properties were investigated using the rubbing substrates constructed by polydimethylsiloxane (PDMS) and simulated saliva. The results showed that the particle size of salad sauces increased with the decrease of fat content, which was significantly correlated with their coefficients of friction ( $P < 0.05$ ). But there was no significant correlation between their TPA parameters and coefficients of friction. Under the effect of saliva, the average coefficient of friction of high-fat salad sauces was significantly lower than that of low-fat salad sauces, and coefficients of friction functioned as a linearly decreasing relation with the increasing fat content. Reasonably setting parameters was more favorable to characterize the difference in the smooth levels of salad sauces. This study can provide a better insight into the development of low-fat salad sauces and other similar health foods.

**Keywords** salad sauce; fat content; food texture; particle size; coefficient of friction