

淀粉凝胶体系的润滑性研究

林顺顺¹, 陈慧¹, 赵杰¹, 孔令治², 张剑¹, 李梦琴^{1*}

(¹河南农业大学食品科学技术学院 郑州 450002

²河南览创食品有限公司 郑州 450043)

摘要 为了探索不同种类淀粉水凝胶在口腔加工中的润滑性规律,本文通过模拟口腔加工,系统分析了 6 种淀粉在不同淀粉质量分数条件下水凝胶体系的摩擦特性。结果表明,随着淀粉质量分数的增加,谷类(玉米、小麦)、豆类(豌豆、绿豆)和薯类(红薯、马铃薯)淀粉凝胶的摩擦系数整体呈先显著上升(1%~7%),再显著下降(8%~10%),随后趋于稳定(11%~14%)的变化趋势。不同淀粉凝胶的润滑性对比分析结果发现:当淀粉质量分数 1%~7%时,红薯淀粉凝胶的润滑性最佳($\mu=0.817\sim0.932$),小麦淀粉凝胶的润滑性能($\mu=1.046\sim1.103$)最差($P<0.05$);当淀粉质量分数 8%~10%时,红薯淀粉凝胶的润滑性仍最佳($\mu=1.033\sim1.046$),玉米淀粉凝胶($\mu=1.157\sim1.188$)的最差($P<0.05$)。当淀粉质量分数 11%~14%时,绿豆淀粉凝胶的润滑性($\mu=1.269\sim1.361$)显著低于其它淀粉($\mu=0.901\sim1.085$)($P<0.05$),此时马铃薯、红薯、小麦、玉米以及豌豆淀粉凝胶之间的润滑性差异显著减小($P<0.05$)。结论:淀粉质量分数及其种类对淀粉凝胶的摩擦特性具有显著影响,且随着质量分数的升高,不同淀粉种属间的润滑性能差异逐渐减弱。本研究为提升淀粉基食品加工中的感官质地提供理论参考。

关键词 淀粉凝胶; 润滑性; 摩擦学; 口腔加工

文章编号 1009-7848(2025)03-0115-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.03.012

人们倾向于从食物消费中获得最大程度的感官愉悦,其中对润滑度和乳化度的感官感知通常是享乐性食物备受喜好的主要因素^[1-2]。即使是像牛奶、酸奶这样的处于可以直接吞噬状态的液体食品,也要经复杂的口腔加工,以便最大程度地享受其润滑享受性。关于食品在口腔加工过程中的结构质地和润滑口感感知研究越来越迫切。

淀粉凝胶作为质地调节剂在日常食品和化妆品中得到了广泛的应用。其对最终产品的质地有着重要影响,尤其是对食品口感起关键作用。淀粉凝胶是淀粉糊化后大多形成具有一定弹性和强度的半透明凝胶,凝胶是胶体质点或高聚物分子互相联结,搭起架子所形成的多维网状结构,是胶体的一种特殊的存在形式,其性质介于固体和液体之间^[3]。常见的食品,如米粉、豆腐、饼干^[4-6]等,都需要淀粉的凝胶作用来增加口感和质地,淀粉凝胶还可作为食品的稳定剂和增稠剂,如用于制作奶油、果冻、布丁^[7]不同类型的食品。由于不同种类淀

粉在粒径、直/支链淀粉含量等结构性质的差异,会导致其所制作产品在口感、质地、润滑性等存在显著差异。

食品口腔加工过程非常复杂,涉及不同物质状态和界面流体运动形式之间的动态转化。同时,食物的形态决定了其在口腔咀嚼中所需咀嚼方法和咀嚼时间的范围。作者前期研究中,以谷物(玉米、小麦)淀粉、豆类(绿豆、豌豆)淀粉、薯类(红薯、马铃薯)淀粉建立了 5 种物理形态^[8],即液态、半固态、软固态、固态和硬固态的淀粉凝胶模型体系。目前对不同形态的淀粉凝胶在界面剪切过程中的摩擦学行为未得到重视,缺乏对淀粉凝胶流变特性和顺滑感的研究。对淀粉凝胶进行主观感官评价仍是最常见的方法,由于品评者主观因素和缺乏统一适用的评价标准等,导致评价结果的真实性存在较大差异^[9]。通过仪器分析实现对润滑口感评价的研究是未来食品研究的重要方向。

当今世界,食物不仅是为了达到饱腹的作用,而是需要以人的主观感受或需要为出发点。研究方向也从营养学,结合食品物理学、流变学、口腔生理学、感官感受、感官心理学等进行学科交叉,实现食品感官科学研究的跨越发展^[10]。在口腔加工过程中淀粉摩擦学行为与口感影响机制有着重

收稿日期: 2024-03-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31901820);
河南省高等学校重点科研项目(24A550011)

第一作者: 林顺顺,女,博士,副教授

通信作者: 李梦琴 E-mail: lmqfood@163.com

要的联系,拥有更低的摩擦系数,通常意味着更细腻的组织状态和润滑口感^[11-13]。食品摩擦学提供一个将口腔加工过程中食物结构和摩擦特性如何与感官感知参数(如乳脂和平滑度)相关联,以及它们如何影响食品偏好的链接。摩擦系数是润滑性能最直观的表现。基于口腔环境下,淀粉凝胶的口腔摩擦学还存在较少的研究,而针对淀粉凝胶的食品在市场上占据大半,在使用人工唾液的情况下进行摩擦学测量在现在看来是一种潜在的技术,有利于更准确地捕捉口腔加工的动态变化^[14]。流体食物膜的膜厚与表面粗糙度直接影响食物的润滑性能。由于不同淀粉粒径、直/支链淀粉比例等的差异,因此不同淀粉凝胶体系在口腔加工过程中的摩擦学机制也可能不同。

本研究以不同质量分数、不同淀粉的水凝胶体系为研究对象,探讨不同淀粉凝胶体系在界面剪切过程中的润滑性规律,为探明淀粉凝胶体系在口腔加工中的摩擦机制提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯淀粉、红薯淀粉、豌豆淀粉、绿豆淀粉、玉米淀粉、小麦淀粉,购于新乡良润全谷物食品有限公司;人工唾液(ISO/TR1027,中性),北京沃凯生物科技有限公司。所用的其它试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

流变仪,安东帕旋转流变仪 MCR72/92;油浴锅,郑州长城商贸有限公司;旋转式真空泵,上海捷昂仪器有限公司;道康宁 DC184 PDMS 模块胶,道康宁公司;烘箱,天津泰斯特仪器有限公司;108孔圆底细胞培养板,上海阿拉丁生化科技有限公司;球/销盘式摩擦磨损试验机(TRB3),安东帕(上海)商贸有限公司。

1.3 淀粉凝胶的制备

采用浓度梯度法制备不同物理形态的凝胶^[15],具体为:准确称取淀粉样品,用适量的蒸馏水配制淀粉悬浮液。通过准确控制淀粉悬浮液的浓度,即分别制备淀粉质量分数梯度为1%~14%的6种淀粉悬浮液(约200 mL),放入500 mL的烧杯中;将烧杯置于(98±2)℃水浴中搅拌加热30 min,缓慢倒入2 cm高的培养皿中,并控制液面

高度为1.5 cm;然后将培养皿平放于4℃冰箱中进行凝胶老化24 h,形成稳定的淀粉凝胶。

1.4 模拟体外口腔摩擦学分析

参考Liu等^[16]的方法采用摩擦机进行摩擦试验,使用弹性体聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为半球销(直径为6 mm)。PDMS由硅弹性体试剂盒(Sylgard184 silicone elastomer, base and curing agents, Dow corning, Midland, MI, USA)制备。在制备半球端PDMS摩擦副时,采用直径为6 mm的圆孔聚苯乙烯96孔细胞培养板为模板。将Sylgard184弹性体试剂盒的基材和固化剂按10:1(m/m)的比例混合。去除气泡后在温和真空下将混合物转移到模板中,在80℃烘箱中培养2 h,然后用乙醇湿润细胞培养板,取出PDMS半球销。将PDMS表面接触物在人工唾液中浸泡2 h以上,形成黏液膜,以模拟口腔环境。将以上制备的混合物均匀放置在PDMS表面进行测试,测试条件:频率1 Hz 载荷:2 N 循环:60个。

2 结果与分析

2.1 不同浓度薯类淀粉凝胶的润滑性规律分析

图1是薯类(红薯、马铃薯)淀粉在质量分数为1%~14%时所形成水凝胶的摩擦系数分布曲线。由图1可以看出,在淀粉质量分数1%~14%范围内,淀粉凝胶的摩擦系数整体呈先显著上升(1%~7%)再显著下降(8%~10%)之后趋于稳定(11%~14%)的变化趋势。在淀粉质量分数1%~7%范围,红薯和马铃薯淀粉凝胶的摩擦系数呈显著上升趋势($P<0.05$)。凝胶的摩擦系数增大,说明其口腔润滑性下降,这主要是由于随着淀粉质量分数的增加,凝胶中水分的相对百分比减小,凝胶的硬度显著增大,导致凝胶的润滑性显著减小。董贝贝^[17]对8种淀粉凝胶特性的研究结果显示,淀粉凝胶的硬度和胶黏性随着浓度的增大而增大。

在淀粉质量分数8%~10%范围,此时红薯淀粉和马铃薯淀粉的凝胶均处于软固体形态^[8],凝胶的摩擦系数显著减小,说明凝胶模拟口腔加工的润滑性显著提升($P<0.05$)。分析这可能与凝胶的“球轴承”作用有关^[18]。在淀粉质量分数8%~10%范围时,凝胶体系的润滑性主要由两方面造成,一方面,由于凝胶硬度增大,水分的相对百分比减

小,使得摩擦系数增大;另一方面,由于凝胶的固体形态增强,凝胶珠“球轴承”润滑机制逐渐占据主导地位,摩擦系数减小,使得凝胶的润滑性能显著提升($P<0.05$)。也正是由于这两个方面的相互影响,使得在淀粉质量分数 8%~10% 范围时,薯类体系的摩擦系数存在显著性波动,如质量分数为 9% 红薯淀粉凝胶的摩擦系数显著高于 8% 和 10% 红薯淀粉凝胶体系($P<0.05$)。

在淀粉质量分数为 11%~14% 范围时,凝胶体系润滑性能均趋于稳定。分析这很可能是由于凝胶珠“球轴承”能力已经到球轴承饱和状态。而红薯淀粉凝胶的摩擦系数有小幅度的上升,分析可能与其淀粉结构有关,相比于马铃薯淀粉,红薯淀粉中含有大量的膳食纤维等不溶性成分,不易于淀粉的糊化和老化^[19],这使得红薯淀粉凝胶的“球轴承”更易出现过饱和状态。鉴于凝胶“球轴承”机制理论,可以推测,淀粉凝胶珠“球轴承”机制达到饱和状态之后,随着淀粉质量分数的继续增大,凝胶的摩擦系数将出现显著增大。

2.2 不同浓度豆类淀粉凝胶的润滑性规律分析

豆类(豌豆、绿豆)淀粉在质量分数为 1%~14% 范围时,其凝胶体系的摩擦系数分布曲线(图 2)与薯类相似,即在淀粉质量分数 1%~7% 范围,豆类淀粉凝胶的摩擦系数显著增大($P<0.05$);在淀粉质量分数 8%~10% 范围时凝胶的摩擦系数显著减小($P<0.05$);在淀粉质量分数 11%~13% 时凝胶的摩擦系数趋于稳定(无显著性变化)。

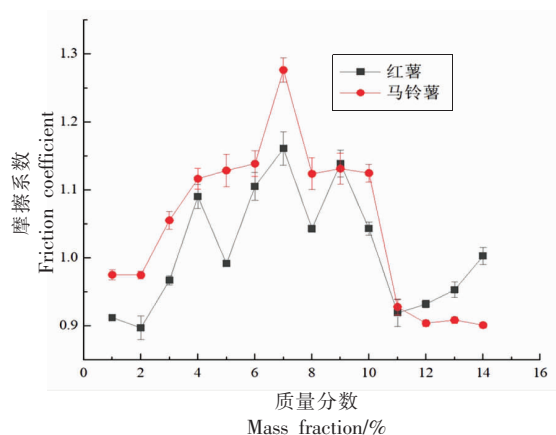


图 1 不同质量分数对薯类淀粉凝胶摩擦系数的影响
Fig.1 Influence of different mass fractions on friction coefficient of potato starch gel

与薯类淀粉凝胶不同的是,质量分数为 11%~14% 豆类淀粉凝胶的摩擦系数显著高于 1%~10% 淀粉凝胶体系($P<0.05$)。分析这可能是因为绿豆淀粉凝胶的硬度显著高于其它淀粉凝胶,使绿豆淀粉凝胶的“球轴承”更易达到饱和状态。在前期研究中也发现,在 10% 质量分数时,绿豆淀粉凝胶的硬度(5 825.82)显著大于豌豆淀粉凝胶(5 571.77)($P<0.05$),同时,绿豆淀粉凝胶的硬度约是薯类和谷类淀粉凝胶硬度的 4~5 倍^[9]。董贝贝^[17]发现随着质量分数的提高,豆类的淀粉凝胶的硬度和胶黏性提升的最高。

此外,质量分数为 14% 豆类淀粉凝胶的摩擦系数显著高于 11%~13% 淀粉凝胶体系($P<0.05$)。更加验证了这一推测,即随着淀粉质量分数的继续增大,淀粉凝胶珠“球轴承”机制达到饱和状态之后,继续增大淀粉质量分数,将出现凝胶体系摩擦系数显著增大的现象。

2.3 不同浓度谷类淀粉凝胶的润滑性规律分析

与薯类和谷类淀粉凝胶的摩擦系数变化趋势均显著不同的是,在淀粉质量分数为 4%~10% 范围,谷类淀粉凝胶的摩擦系数存在显著性波动变化($P<0.05$),这可能与谷类淀粉凝胶的结构有关,谷类淀粉粒径相对较小^[20-21],凝胶体系的两种润滑机制相互抗衡,一方面,凝胶体系中水分的相对百分比减小,使得摩擦系数增大;另一方面,凝胶珠“球轴承”润滑机制使得摩擦系数减小,润滑性能提升。

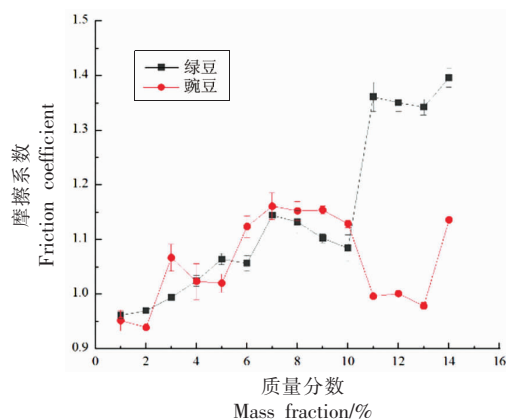


图 2 不同质量分数对豆类淀粉凝胶摩擦系数的影响
Fig.2 Influence of different mass fractions on gel friction coefficient of soybean starch

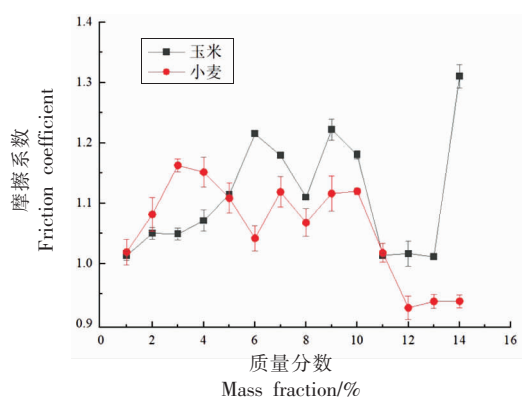


图3 不同质量分数对谷类淀粉凝胶摩擦系数的影响

Fig.3 Influence of different mass fractions on gel friction coefficient of cereal starch gel

由于这两个方面的相互影响,使得谷类淀粉凝胶体系的摩擦系数存在显著性波动变化。尽管如此,但在淀粉质量分数为1%~14%范围,谷类淀粉凝胶摩擦系数的整体变化趋势与薯类和豆类淀粉凝胶的趋势基本一致。

2.4 不同淀粉凝胶模拟口腔加工润滑性的对比分析

为了更全面了解不同淀粉间凝胶的润滑性能,本研究利用SIMCA-P 11软件对6种淀粉3种淀粉质量分数区间(1%~7%,8%~10%,11%~14%)凝胶的摩擦系数分别进行了主成分分析,结果如图4所示。

在淀粉质量分数为1%~7%区间,凝胶PCA结果(图4a~4b)显示,前两个主成分(PC1和PC2)解释了78%交叉验证方差,说明前两个主成分包含了大量的样品信息,足以反映样品的整体信息。样品的相关性载荷图(图4a)显示,几乎所有的变量都落在内外两个椭圆(分别代表50%和100%的解释方差)之间,由于第一主成分为主要解释变量(51%),因此主要沿PC1方向进行差异分析。图4a中,1%~5%样品集中位于载荷图的右侧,说明在淀粉质量分数1%~5%时,不同淀粉之间的摩擦系数差异规律近似(实际证明确实如此),因此这里仅提供了2%质量分数时,不同淀粉凝胶摩擦系数差异的Scores图(图4b)。图4b中样品在PC1-PC2二维图中位置距离的远近直观地反映了样品间差异的大小,即距离越远差异越大;图上方不同颜色标尺代表了对应颜色的淀粉凝胶摩擦系数范

围。由图4b分析发现,沿PC1方向,小麦、玉米淀粉样品分布在图的右侧,红薯淀粉位于图的左侧,马铃薯、绿豆和豌豆淀粉位居图中间。结果说明,2%淀粉质量分数时,小麦淀粉凝胶的摩擦系数最大(1.046~1.103),红薯淀粉的水凝胶摩擦系数最小(0.817~0.932)。在1%,3%,4%和5%淀粉质量分数时,不同淀粉的水凝胶摩擦系数差异规律亦是如此。

在淀粉质量分数为8%~10%区间,凝胶PCA结果(图4c~4d)显示,前两个主成分(PC1和PC2)足以反映样品的整体信息(共解释了92%交叉验证方差)。样品的相关性载荷图(图4c)显示,所有的变量都落在内外两个椭圆之间,由于第一主成分为主要解释变量(79%),因此主要沿PC1方向进行差异分析。图4a中,8%,9%和10%样品集中位于载荷图的右侧,说明在淀粉质量分数为8%~10%时,不同淀粉之间的摩擦系数差异规律近似,因此这里仅提供了10%质量分数时,不同淀粉凝胶摩擦系数差异的Scores图(图4d)。由图4d分析发现,沿PC1方向,玉米淀粉样品分布在图的右侧,红薯淀粉位于图的左侧,绿豆、小麦、马铃薯和豌豆淀粉位居图中间位置。结果说明,在8%~10%淀粉质量分数时,玉米淀粉的水凝胶摩擦系数最大(1.157~1.188),红薯淀粉的水凝胶摩擦系数最小(1.033~1.064)。值得注意的是,在此质量分数范围,小麦淀粉的水凝胶摩擦系数与豆类和薯类淀粉凝胶的摩擦系数差距减小。

同理,分析了在淀粉质量分数为11%~14%区间,凝胶PCA结果(图4e~4f)显示,样品的相关性载荷图(图4e)显示,所有的变量都落在内外两个椭圆之间,且第一主成分为主要解释变量(91%),又由于11%,12%,13%和10%样品集中位于PC1轴的右侧(图4e),即在淀粉质量分数为11%~14%时,不同淀粉之间的摩擦系数差异规律近似,因此,这里仅提供了12%质量分数时,不同淀粉凝胶摩擦系数差异的Scores图(图4f)。由图4d分析发现,沿PC1方向,绿豆淀粉样品分布在图的最右侧,显著区别于其它淀粉($P<0.05$);红薯、小麦和马铃薯淀粉位于图的左侧,玉米和豌豆淀粉位居图中间位置。结果表明,一方面,绿豆淀粉的水凝胶摩擦系数最大(1.269~1.361),红薯小麦和马铃薯

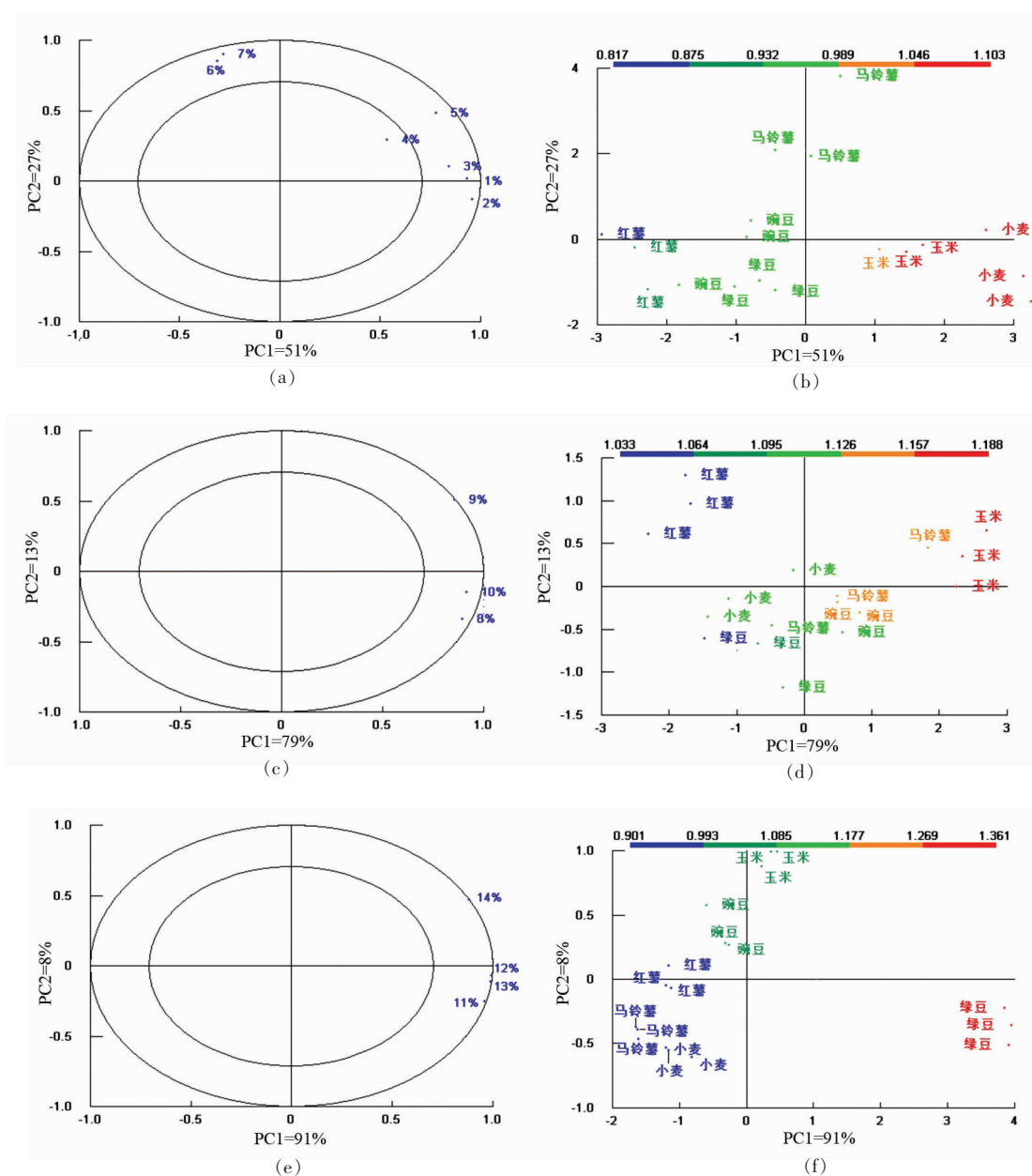


图 4 基于不同质量分数淀粉凝胶摩擦系数的主成分(PCA)分析

Fig.4 Principal component (PCA) analysis of starch gel friction coefficients with different mass fractions

薯淀粉的水凝胶摩擦系数相对最小(0.901~0.993)。另一方面,与淀粉质量分数 1%~10%样品相比,在较高质量分数时(11%~14%),不同淀粉(除绿豆淀粉外)之间的水凝胶摩擦系数差异显著减小($P < 0.05$)。

综上,在淀粉质量分数 1%~7%和 8%~10%范围,谷类淀粉(小麦/玉米)淀粉凝胶的摩擦系数最大,红薯淀粉水凝胶的摩擦系数最小。在低质量分数时(1%~7%),小麦淀粉凝胶的摩擦系数与豆类

和薯类的差距较大,而在高质量分数(8%~14%)时,其与豌豆、马铃薯和红薯的差距显著减小($P < 0.05$)。在淀粉质量分数 11%~14%时,绿豆淀粉的水凝胶摩擦系数显著高于其余淀粉($P < 0.05$),除绿豆淀粉外,不同淀粉之间的水凝胶摩擦系数差异显著减小($P < 0.05$),表现为:红薯、小麦和马铃薯淀粉的水凝胶摩擦系数均相对最小。

淀粉凝胶的形成过程,伴随着淀粉的糊化、老化过程^[22]。淀粉凝胶的润滑/摩擦性能受到凝胶水

分和“球承轴”机制的双重作用,其根源分别归因于凝胶中水分分布和淀粉粒径、直/支链组成等因素。与前期研究淀粉水凝胶水分分布规律^[4]显著不同的是,随着质量分数的增加,马铃薯、红薯、小麦、玉米以及豌豆淀粉凝胶的摩擦系数在类属之间表现的差异逐渐减弱。也反映了在较高淀粉质量分数(8%~14%)时,“球承轴”机制在凝胶的润滑性能中占主导地位。

3 结论

本文基于6种淀粉在不同淀粉质量分数所形成的淀粉水凝胶体系,通过模拟口腔加工试验,系统分析了不同种类淀粉水凝胶体系的润滑性能分布。研究表明,淀粉水凝胶体系中,随着淀粉质量分数的增大,谷类(玉米、小麦)、豆类(豌豆、绿豆)和薯类(红薯、马铃薯)淀粉凝胶的摩擦系数整体呈先显著上升(1%~7%),再显著下降(8%~10%),随后趋于稳定(11%~14%)的变化趋势。结果表明在淀粉质量分数1%~14%范围,随着淀粉质量分数的增大,淀粉凝胶的口腔润滑性呈显著减小后显著提升,随后趋于稳定。

不同淀粉之间,凝胶的摩擦性能也存在显著性差异。当淀粉质量分数1%~7%和8%~10%范围,小麦和玉米淀粉凝胶的润滑性能分别最差,红薯淀粉水凝胶的润滑性能最好(0.817~0.932)。当淀粉质量分数11%~14%时,绿豆淀粉凝胶(1.269~1.361)的摩擦系数显著高于其它淀粉凝胶($P<0.05$),其润滑性能最差;而马铃薯、红薯、小麦、玉米以及豌豆淀粉凝胶之间的摩擦系数差异显著减小($P<0.05$),同时红薯、小麦和马铃薯淀粉的水凝胶润滑性能均相对最好。该结果也反映了随着质量分数的增大,马铃薯、红薯、小麦、玉米以及豌豆淀粉凝胶的摩擦系数在类属之间的差异逐渐减弱。本研究结果为提升淀粉基食品加工的感官质地提供理论参考。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] LILLFORD P. Texture and breakdown in the mouth: An industrial research approach[J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(2): 213-218.

[3] 杨盼盼, 杨建军, 吴庆云, 等. 淀粉基水凝胶的制备及其应用进展[J]. 精细化工, 2024, 41(11): 2345-2357.

YANG P P, YANG J J, WU Q Y, et al. Research progress of starch gel[J]. Fine Chemical Industry, 2024, 41(11): 2345-2357.

[4] 司玉君, 陈雪, 曹其聪, 等. 卤水黑豆豆腐制作工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(7): 186-188, 199.

SI Y J, CHEN X, CAO Q C, et al. Study on the production technology of black bean and bean curd in brine[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(7): 186-188, 199.

[5] 刘新华, 韩风, 朱潇, 等. 马铃薯全粉面团特性及其韧性饼干制备[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(3): 31-35.

LIU X H, HAN F, ZHU X, et al. Characteristics of potato flour dough and preparation of tough biscuit[J]. Grain and Oil, 2023, 36(3): 31-35.

[6] 梁璐, 隋勇, 梅新, 等. 紫薯粉对米粉食用品质和理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 254-260.

LIANG L, SUI Y, MEI X, et al. Effects of purple sweet potato powder on edible quality and physico-chemical properties of rice flour [J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 50(11): 254-260.

[7] 刘欣, 宣洁娣, 陈鹤月, 等. 响应面法优化黑豆黑枸杞粮谷布丁制作工艺的研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(5): 75-78.

LIU X, XUAN J D, CHEN H Y, et al. Study on optimization of preparation process of black bean and black wolfberry grain pudding by response surface method[J]. Food and Oil, 2021, 34(5): 75-78.

[8] 林顺顺, 赵杰, 宋晓燕, 等. 不同物理形态淀粉凝胶体系的建立[J]. 中国食品学报, 2022, 22(11): 114-122.

LIN S S, ZHAO J, SONG X Y, et al. Establishment of starch gel systems with different physical morphology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(11): 114-122.

- [9] 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.
- [10] 陈建设, 刘源, 师锦刚. 食品感官科学研究: 挑战与可能[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 1–7.
CHEN J S, LIU Y, SHI J J. Research on food sensory science: Challenges and possibilities [J]. Food Science, 2022, 43(19): 1–7.
- [11] 詹敏敏, 杨小双, 王玉牛, 等. 一种基于口腔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 M M, YANG X S, WANG Y N, et al. A smooth property evaluation model of milk tea based on oral soft tribology[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 216–225.
- [12] 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 S S, SHI J Q, ZHAO J, et al. Application of tribology in food processing[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11): 457–464.
- [13] 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. Research progress of food oral tribology[J]. Tribology Journal, 2019, 39(1): 118–129.
- [14] 林顺顺, 史家琪, 孙夫才, 等. 淀粉水凝胶体系水分分布规律分析[J]. 食品科学, 2023, 44(20): 227–235.
LIN S S, SHI J Q, SUN F C, et al. Analysis of water distribution in starch hydrogel system[J]. Food Science, 2023, 44(20): 227–235.
- [15] 杜先锋, 许时婴, 王璋. 淀粉凝胶力学性能的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 16–19.
DU X F, XU S Y, WANG Z. Study on Mechanical Properties of starch gel[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2001, 17(2): 16–19.
- [16] LIU X, GUO J, WAN Z L, et al. Wheat gluten-stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 168–175.
- [17] 董贝贝. 八种淀粉糊化和流变特性及其与凝胶特性的关系[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
DONG B B. Gelatinization and rheological properties of eight starches and their relationship with gel properties[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.
- [18] LIU K, TIAN Y, STIEGER M, et al. Evidence for ball-bearing mechanism of microparticulated whey protein as fat replacer in liquid and semi-solid multi-component model foods[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 403–414.
- [19] 余振宇, 韩嵘峻, 胡尧, 等. 红薯全粉与玉米淀粉共混体系的凝胶特性及其粉丝品质研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(9): 106–114.
YU Z Y, HAN S J, HU Y, et al. Study on gel properties and vermicelli quality of sweet potato whole powder and corn starch blend system[J]. China Journal of Grain and Oil, 2023, 38(9): 106–114.
- [20] MORELL M, RAHMAN S, ABRAHAMS S, et al. The biochemistry and molecular biology of starch synthesis in cereals[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1995, 22(4): 647–660.
- [21] TIAN S J, RICKARD J E, BLANSHARD J M V, et al. Physicochemical properties of sweet potato starch [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1991, 57(4): 459–491.
- [22] LIU X, CHAO C, YU J, et al. Mechanistic studies of starch retrogradation and its effects on starch gel properties[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106914.

Studies on Lubricity of Starch Gel System

LIN Shunshun¹, CHEN Hui¹, ZHAO Jie¹, KONG Lingzhi², ZHANG Jian¹, LI Mengqin^{1*}

(¹College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002

²Henan LAN Chuang Food Co., Ltd., Zhengzhou 450043)

Abstract To investigate the lubricity of different starch hydrogels during oral processing, the frictional properties of 6 types of starch hydrogels with varying starch mass fractions were analyzed by simulating oral processing conditions. The

results demonstrated that as the starch mass fraction increased, the friction coefficient of cereal starch gels (corn, wheat), legume starch gels (peas, mung beans), and tuber starch gels (sweet potato, potato) initially increased significantly (1%–7%), subsequently decreased markedly (8%–10%), and eventually stabilized (11%–14%). Comparative analysis of the lubricity of different starch gels revealed that sweet potato starch gels exhibited the best lubricity ($\mu = 0.817\text{--}0.932$), while wheat starch gels showed the worst performance ($\mu = 1.046\text{--}1.103$) when the starch mass fraction was in the range of 1%–7% ($P < 0.05$). When the starch mass fraction was between 8%–10%, sweet potato starch gels continued to demonstrate the highest lubricity ($\mu = 1.033\text{--}1.046$), whereas corn starch gels performed the worst ($\mu = 1.157\text{--}1.188$) ($P < 0.05$). At a starch mass fraction of 11%–14%, the lubricity of mung bean starch gels ($\mu = 1.269\text{--}1.361$) was significantly lower than that of other starch gels ($\mu = 0.901\text{--}1.085$) ($P < 0.05$), and the differences in lubricity among potato, sweet potato, wheat, corn, and pea starch gels were markedly reduced ($P < 0.05$). Conclusion: The frictional properties of starch gels are significantly influenced by both the mass fraction and type of starch. Furthermore, the disparity in lubrication properties between different species and genera of starches gradually diminishes as the mass fraction increases. This study provides a theoretical basis for enhancing sensory texture in the processing of starch-based foods.

Keywords starch gel; lubrication; tribology; oral processing