影响凝胶甜味的关键质构因素分析

潘淑靓[1]，宋佳慧[1,2,3]，夏熠珣[1,2,3,4]，徐菲菲[2,3,4]，钟 芳*[1,2,3,4]

（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 江南大学 未来食品科学中心，江苏 无锡 214122；3. 江南大学 江苏省食品安全与质量控制协同创新中心，江苏 无锡 214122；4. 嘉兴未来食品研究院，浙江 嘉兴 314015）

摘要：为了确定影响凝胶甜味的关键质构因素，建立了具有不同质构特征的9种凝胶，采用描述性分析评价其甜味及质构特征，并通过扫描实际咀嚼过程中形成的凝胶碎片进行验证。结果表明，影响凝胶中甜味释放的关键质构因素是易碎性和凝聚性。凝胶碎片扫描结果显示，易碎性较强、凝聚性较弱的样品会形成更多的凝胶碎片和更大的凝胶总表面积，这可能是导致样品甜味更强的原因。此外，较低易碎性样品的甜味还受到润湿性的调控，而高易碎性样品则不受影响。高硬度和低弹性的样品会形成棱角更清晰的凝胶碎片，导致在吞咽前需要经过更多次数的咀嚼，生成更多的凝胶碎片，间接增强凝胶的甜味。

关键词：甜味；质构；凝胶；易碎性；碎片总表面积

中图分类号：TS 201.7　　**文章编号：**1673-1689(2023)07-0028-09　　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.07.004

Analysis of Key Texture Factors Affecting Gel Sweetness

PAN Shuliang[1]，*SONG Jiahui*[1,2,3]，*XIA Yixun*[1,2,3,4]，*XU Feifei*[2,3,4]，*ZHONG Fang*[*1,2,3,4]

（1. School of Food Science and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. Science Center for Future Foods，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；3. Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；4. Jiaxing Institute of Future Food，Jiaxing 314015，China）

Abstract：To determine the key texture factors affecting the sweetness of gels，nine gels with different texture characteristics were established in this study. Their sweetness and texture characteristics were evaluated by descriptive analysis and verified by scanning gel fragments formed during oral chewing. According to the results，fragility and cohesiveness were the key texture factors that influenced the sweetness of gels. The results of gel fragment scanning showed that the samples with stronger friability and weaker cohesiveness produced more gel fragments and larger total surface area，which might be the reason for the stronger sweetness of the samples. Moreover，the sweetness of samples with lower fragility was also regulated by the moisture release，whereas that of samples with higher fragility was unaffected. The higher hardness and lower elasticity of the samples led to

收稿日期：2022-09-06

基金项目：国家自然科学青年基金项目(32001628)；江苏省青年基金项目(BK20200596)；江南大学自主科研计划项目(JUSRP52029A，JUSRP122043)。

*通信作者：钟 芳(1972—)，女，博士，教授，博士研究生导师，主要从事食品胶体与感知科学研究。E-mail：fzhong@jiangnan.edu.cn

the formation of gel fragments with sharper edges, which required more chewing before swallowing, and resulted in more gel fragments, indirectly enhancing the sweetness of the gel.
Keywords: sweetness, texture, gel, fragility, total surface area of fragments

随着消费者对健康的需求日益增强,“控糖”成为热门话题[1]。如何在减少蔗糖等甜味剂的情况下,不影响食物的甜味成为近年来食品领域的研究热点[2-3]。在凝胶等半固体食品中,控制甜味的常见手段包括:改变甜味剂的均匀程度[4-6]、调节质构特性[7]、改变凝胶的微结构[8]、添加香气物质以实现协同作用[9-10]等。目前,普遍认为通过质构调节风味释放是控制凝胶味觉强度最有效的手段[11],具有操作简单、普适性强的优点,具有较大的现实应用意义。

在口腔加工过程中,通过咀嚼将凝胶破碎是至关重要的一步,凝胶的变形特性和断裂特性对甜味的释放过程影响极大[12]。目前已有大量研究表明,半固体凝胶的硬度、脆度、断裂应变以及破裂时清液的释放等质构特征都会对凝胶的味道产生影响[13-16]。在诸多质构特性中,凝胶的脆性被认为是影响味觉感知的关键因素。Costell 等使用不同浓度的 κ-卡拉胶和结冷胶制备具有 3 种断裂应力的样品,发现低强度的样品比中、高强度样品具有更强的甜味、咸味和酸味[14]。Bayarri 等也发现导致 κ-卡拉胶和结冷胶凝胶甜度不一的关键是脆度的差异[16]。Sala 等在研究断裂行为对凝胶模型甜度的影响时,发现样品甜度能够从 10(72%断裂应变)变化到 200(37%断裂应变)[17]。Morris 等认为凝胶脆度决定了凝胶的味觉感知,这是因为咀嚼的过程中,凝胶破裂成许多小碎片,破裂的同时伴随着新凝胶面的生成,这样一来,风味物质更容易释放,进而导致味道增强[18],这一解释也获得了研究人员的广泛认可。

目前,虽然大多数研究对各类亲水胶体凝胶影响味觉强度的质构因素进行了分析讨论,但这些研究中主要以一类或者两类凝胶为主体,参与测试和分析的凝胶在质构特性上的差异较小,使得其在差异性较大体系中的应用受到了一定限制。并且大多通过仪器进行质构测试和模拟咀嚼情况,对于真实口腔加工过程中不同凝胶的破碎情况缺乏研究。

因此,作者建立了 9 种具有较大差异的凝胶体系,通过描述性分析对其甜味强度和质构特征进行全面评估,讨论并确定影响凝胶体系甜味释放的关键质构因素,同时采集并扫描计算不同样品在咀嚼过程中碎片数量以及碎片表面积的变化情况,对分析得出影响甜味的关键因素进行验证,以期进一步阐释影响凝胶甜味的质构因素的相关机制。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 实验材料 高纯度瓜尔胶(食品级):印度雪龙豆胶化学有限公司产品;卡拉胶(食品级):福建省绿麒食品胶体有限公司产品;刺槐豆胶:意大利凯亚公司产品;黄原胶、琼脂、明胶、玉米淀粉、氯化钾(均为食品级):河南中泰有限公司产品;蔗糖(食品级):广州福正东海食品有限公司产品;AJI 减盐苏打饼干:东莞市味盟食品有限公司产品;纯净水:无锡飘之霖饮用水公司产品。

1.1.2 实验设备 电子天平:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产品;磁力搅拌器:德国 IKA 公司产品;超级恒温水浴锅:上海一恒科技有限公司产品。

1.2 实验方法

1.2.1 凝胶样品的制备 根据预实验,确定了 9 个具有不同质构特征的凝胶体系,其配方和加热方法见表 1。其中卡拉胶凝胶中需要通过加入氯化钾来搭建盐桥从而形成凝胶,而由于氯化钾具有一定的咸味、苦味和涩味,因此在所有样品中均添加了相同质量分数的氯化钾以消除影响。在制备样品时,首先将胶体粉末筛入水中,在对应加热条件下进行加热和搅拌,待充分溶胀后,再加入质量分数 20%的蔗糖,蔗糖充分溶解后趁热将溶液倒入模具,将 8 号样品移入-4 ℃环境进行冷却后形成凝胶,其余样品室温下自然冷却后形成凝胶。成胶后将凝胶切分成 17 mm×17 mm×10 mm 的小块,并在 25 ℃下静置 1 h 后恢复至室温备用。

表 1 凝胶样品的制备方法

Table 1 Preparation methods of the gel samples

样品编号	样品组成	加热方法
1	质量分数 0.50% κ-卡拉胶、0.25%氯化钾	溶解,60 ℃加热 2 h
2	质量分数 6.50%玉米淀粉、0.25%氯化钾	溶解,煮沸加热 15 min
3	质量分数 1.00%结冷胶、0.25%氯化钾	溶解,60 ℃加热 2 h
4	质量分数 0.50%黄原胶、0.50%刺槐豆胶、0.25%氯化钾	溶解,95 ℃加热 2 h
5	质量分数 0.25% κ-卡拉胶、0.75%瓜尔豆胶、0.25%氯化钾	溶解,95 ℃加热 2 h
6	质量分数 0.50% κ-卡拉胶、0.50%刺槐豆胶、0.25%氯化钾	溶解,95 ℃加热 2 h
7	质量分数 0.25% κ-卡拉胶、0.75%刺槐豆胶、0.25%氯化钾	溶解,95 ℃加热 2 h
8	质量分数 6.50%明胶、0.25%氯化钾	30 ℃浸泡,60 ℃溶解
9	质量分数 1.00%琼脂、0.25%氯化钾	溶解,煮沸加热 15 min

1.2.2 Spectrum 描述性分析

1)评价员的筛选 根据国标 GB/T 16291.1—2012,从味觉、嗅觉、质构感知灵敏度,以及对感官评价实验的兴趣、积极性、语言表达、性格特点、日常可协调时间等角度筛选评价员,其中对甜味的测试部分,要求他们能够正确识别 10 g/L 的蔗糖溶液,能够对 10、20、30、40、46 g/L 的蔗糖溶液进行正确排序。最终筛选了 12 名评价员组成评价小组,包括 10 名女性和 2 名男性,年龄范围 18~22 岁。

2)描述词的建立 根据 Stieger 等建立的凝胶感官描述术语[19],为评价员提供了包含 25 个味道及质构属性的描述词库及定义,同时将 9 种凝胶样品全部提供给评价员,评价员根据描述词库,选择可用于描述样品间味道和质构差异的词语,对所有评价员的词汇进行归类后,建立初步描述词库。再次提供样品,所有评价员对初步描述词库进行讨论,删去喜好性、重复性以及样品间差异较小的描述词语,确定最终描述词。此后,评价员进行多次品评和讨论,结合文献讨论,确定各属性的定义及评价方法。个别质构属性定义未能达成一致时,提供合适的具有典型该属性的样品来帮助评价员进行定义及理解,直至所有评价员对该属性的定义达成一致。为减少评价员的感官疲劳,每次培训不超过 2 h。

3)标准参照样的确定及线性标度的使用培训 根据 Spectrum 描述性分析方法确立各属性的参照样品,并使用线性标度对样品属性进行评分。在预实验中,评价员对一系列不同质量分数蔗糖溶液的甜度进行了评价,实验结果表明,甜度与蔗糖质量分数成正比,这与 Kohyama 等的研究结果[20]一致,因此,确定使用不同质量分数的蔗糖溶液作为甜度的线性参照样。培训过程使用 15 cm 线性标度对样品的味道及质构属性进行评分,直至评价员的一致性、重复性及区分能力达到测评要求,培训过程共持续 20 h。

4)样品描述性评分流程 凝胶样品在品尝前需在室温下放置 1 h 以恢复温度,所有样品采用 3 位数随机编码。评价员在品尝之前,需要用苏打饼干清口并喝纯净水漱口。在评价下一个样品前,为避免样品残留造成的干扰,需要使用清水漱口。每个样品评价两次,评价过程需要在室温环境下进行,评价过程共持续 12 h。

1.2.3 咀嚼过程中碎片数量、表面积及形态的测定

10 名评价员进行彻底的口腔清洗后,将凝胶样品分别进行 1、2、3……N(N 为每个样品到达可吞咽状态时的咀嚼次数)次的咀嚼,咀嚼完迅速用 30 mL 纯净水将所有碎片轻轻漱出,吐于绘有 1 cm 刻度标尺的培养皿中,再加入少量水用手轻轻晃动培养皿,使样品碎片分散开,拍照记录。由于 2 号样品碎片面积过小,8 号样品发生溶化,无法进行碎片数量的计算,因此未进行测试。咀嚼过程中碎片数量及大小的测定采用 Image J 软件进行图片处理,再对碎片数量以及碎片的平面面积进行计算,图片处理过程见图 1。

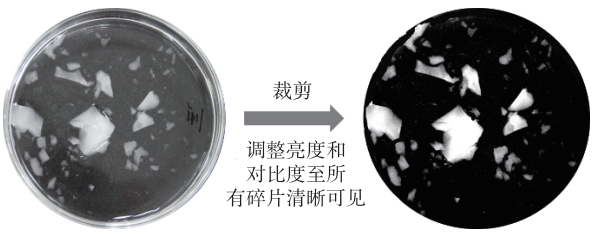


图 1 咀嚼碎片照片的处理过程

Fig. 1 Process of photos of the chewed pieces

1.3 数据处理

采用 Xlstat 2018 对感官评价结果进行单因素方差分析。采用 GraphPad Prism 8.0.1 进行聚类热图和相关性热图分析与绘制。图表采用 Excel 2018 和 Origin 9.1 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 描述性分析中样品描述词定义以及参照样的确定

12 名评价员在进行 20 h 的培训后，初步筛选出 20 个引用频率超过 30%[21]的属性。再经过讨论，删除样品间差异较小、重复性或评价员难以达成一致的词语，最终确定了 1 个味道属性和 10 个质构属性。各描述词的定义及参照样见表 2。

2.2 质构特征分析

样品的质构特征见图 2,9 种凝胶的所有质构属性上均存在显著性差异(P<0.05),各属性最大强度与最小强度的差值范围为 5.7~11.7，说明样品各属性强度在比较广泛的范围内分布。

为了更好地说明样品的质构特征,对评价结果进行归一化处理并进行聚类热图分析（见图 3),图中颜色反映了样品质构属性强度的相对大小,聚类分析是根据样品间质构的相似程度进行分类,在树状图中越靠近的样品越相似[22]。如图所示,样品可被分为 4 类,第一类为样品 8,第二类为样品4、样品 6 和样品 7，第一类样品与第二类样品的质构特征比较接近,其共同特征为凝聚性、弹性、硬度和咀嚼性较强,易碎性和黏附性较弱。但是,第一类样品顺滑

表 2 凝胶的感官属性定义及参照样

Table 2 Definition and the references of sensory properties of gels

属性	定义	参照样品及其标度
甜味	样品在咀嚼过程中可感知的最大甜味	质量分数 4%的蔗糖溶液(8 分) 质量分数 8%的蔗糖溶液(16 分) 质量分数 16%的蔗糖溶液(32 分)
易碎性	样品在咀嚼过程中破裂形成的碎片数量	6 号样品(3 分) 3 号样品(8 分) 1 号样品(15 分)
硬度	用臼齿咬断样品,感受所需要力的大小	1 号样品(1 分) 3 号样品(7 分) 6 号样品(12 分)
凝聚性	样品被咀嚼后碎片的大小	1 号样品(1 分) 3 号样品(8 分) 6 号样品(12 分)
润湿性	样品咀嚼过程中水释放的程度	8 号样品(2 分) 3 号样品(8 分) 6 号样品(12 分)
咀嚼性	样品咀嚼至可吞咽状态时的咀嚼次数	1 号样品(1 分) 3 号样品(6 分) 6 号样品(10 分)
弹性	用臼齿压迫样品,感受样品咀嚼后回弹的程度和速度	1 号样品(1 分) 3 号样品(6 分) 6 号样品(10 分)
黏附性	样品咀嚼过程中在上颚和嘴唇黏滞的状态	质量分数 0.25%的瓜尔胶溶液(5 分) 质量分数 0.50%的瓜尔胶溶液(10 分)
溶化程度	样品在咀嚼过程中溶化的速度	棉花糖(8 分)
顺滑度	样品吞咽过程是否有颗粒感	1 号样品(8 分) 8 号样品(15 分)
吞咽残余度	样品吞咽后口中残留的残渣数量	6 号样品(4 分) 1 号样品(8 分)

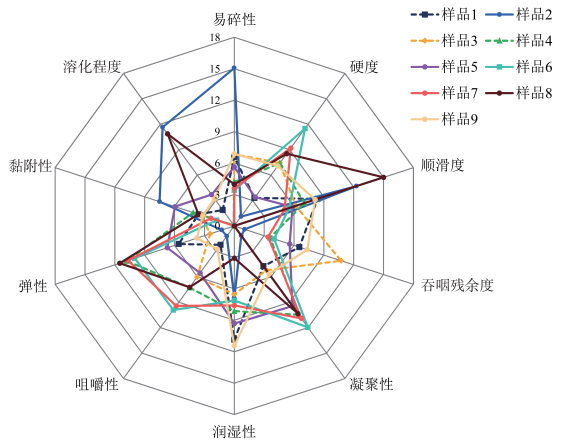


图 2　样品的质构属性强度

Fig. 2　Intensity of the texture properties of samples

度、溶化程度较强，吞咽残余度和润湿性较弱；而第二类样品相反，具有较弱的顺滑度和溶化程度，并具有中等强度的吞咽残余度和润湿性。第三类样品为样品 2，第四类样品为样品 3、样品 5、样品 1 和样品 9，两类样品的质构特征比较接近，其共同特征为凝聚性、弹性、硬度和咀嚼性较弱。但第三类样品的顺滑度、溶化程度、易碎性和黏附性均较强，吞咽残余度和润湿性偏弱；而第四类样品相反，顺滑度、溶化程度、易碎性和黏附性均较弱，但吞咽残余度和润湿性较强。

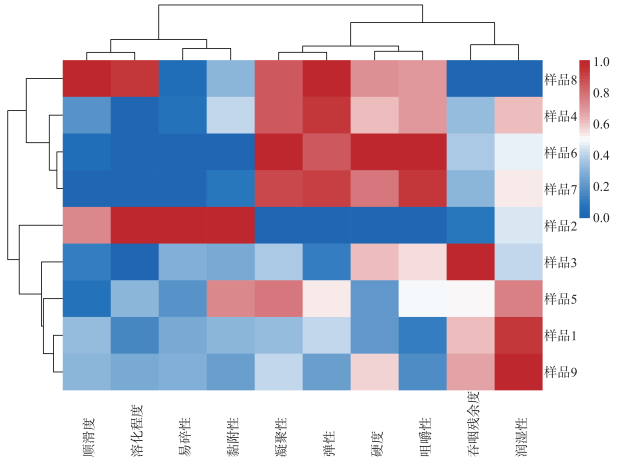
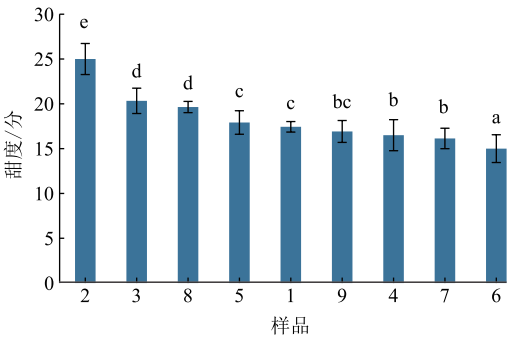


图 3　质构特征的聚类热图分析

Fig. 3　Cluster heatmap analysis of the texture characteristics

2.3　甜度及与质构的关系

样品的甜度见图 4，在添加相同质量分数(20%)蔗糖的情况下，不同质构特征的凝胶甜度存在显著性差异(P<0.05)，这表明作者所设计的质构差异对凝胶甜度能够产生显著影响。其中 2 号样品的甜度最高，6 号样品的甜度最弱，结合显著性分析结果，样品按照甜度的排序为 2>3、8>5、1、9≥4、7>6。结合 2.2 中样品质构特征的聚类热图结果可知，具有相似质构特征的样品甜度比较接近，如 4 号和 7 号样品，5 号、1 号和 9 号样品，但有些样品存在差异，如 8 号样品的质构与 4 号比较接近，但甜度却远高于 4 号样品，推测二者间存在较大差异的属性，如顺滑度、溶化程度和润湿性影响了样品的甜度。



图中具有不同字母的样品间具有显著差异(P<0.05)。

图 4　样品的甜味强度

Fig. 4　Sweetness intensity of the samples

进一步将甜度与样品质构属性进行相关性分析，结果见图 5。易碎性是与甜度正相关性最大的属性，而凝聚性是与甜度负相关性最大的属性。这与 Morris 等对凝胶中风味物质释放过程的解释相符，即凝胶破裂时生成的新凝胶面使风味物质更容易释放[18]。在该研究中，易碎性是指样品在咀嚼过程中破裂形成的碎片数量，而凝聚性是指样品被咀嚼后碎片的大小，根据相关性分析，二者呈显著负相关(R=−0.898，P=0.001)。而凝胶在咀嚼过程中形成的碎片越多，形成的碎片越小，则凝胶的总表面积越大，因此凝胶中的蔗糖更容易被释放，评价员感知到的甜度可能会更高。此外，根据相关性分析发现，黏附性和溶化程度也与甜度显著正相关，推测可能是较强的黏附性有助于加强凝胶与舌面的接触，从而有利于甜味物质从凝胶中转移到舌面。溶化程度较高的样品也由于更多的凝胶溶化为液体，而有利于凝胶中甜味物质的转移。

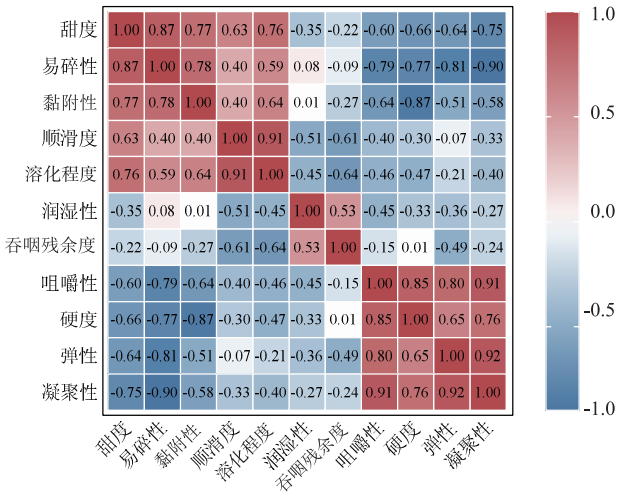


图 5　甜度与质构属性的相关性热图

Fig. 5　Heatmap of the correlation between sweetness and texture characteristics

2.4　凝胶碎片的数量及总表面积与甜味感知的关系

图 6 显示了各样品随着咀嚼次数的增加,碎片数量的增长情况。随着咀嚼次数的增加,凝胶样品的碎片数量呈现增加趋势。由于样品碎片数量差异较大,将样品分为高碎片数量组和低碎片数量组。其中高碎片数量组如图 6(a)所示,从咀嚼前期至咀嚼终点,3 号样品始终为碎片数量最多的样品,其数量高达 543 片。1 号和 9 号样品碎片数量仅次于 3 号样品,二者在咀嚼过程中的碎片数量相近,但 9 号样品需要更多次数的咀嚼;至咀嚼终点,9 号样品的碎片数量略多于 1 号样品。5 号样品相对较少,至咀嚼终点碎片数为 85 片。低碎片数量组如图 6(b)所示,其中 6 号样品在组内具有最高的碎片数量,咀嚼终点碎片数为 32 片。4 号样品在咀嚼前期的碎片数量略高于 7 号样品,但由于 7 号样品需要的咀嚼次数更多,至咀嚼终点时,7 号样品的碎片数量(16 片)略高于 4 号样品(14 片)。整体而言,按碎片数量,样品排序为 3>9>1>5>6>7>4。将凝胶样品的碎片数量与描述性分析中的易碎性对应,按照易碎性,样品排序为 9>3>1>5>4>7>6,二者整体排序基本接近,高碎片数量组对应高易碎性,低碎片数量组对应低易碎性。

通过扫描培养皿中碎片的面积可获得该凝胶的总表面积[8],各咀嚼次数下样品碎片的总表面积见图 7(a)。随着咀嚼次数增加,碎片总表面积呈增加趋势,至咀嚼终点,9 号和 1 号样品的总表面积最大,其次为 5 号样品,总表面积最小的样品是 3 号

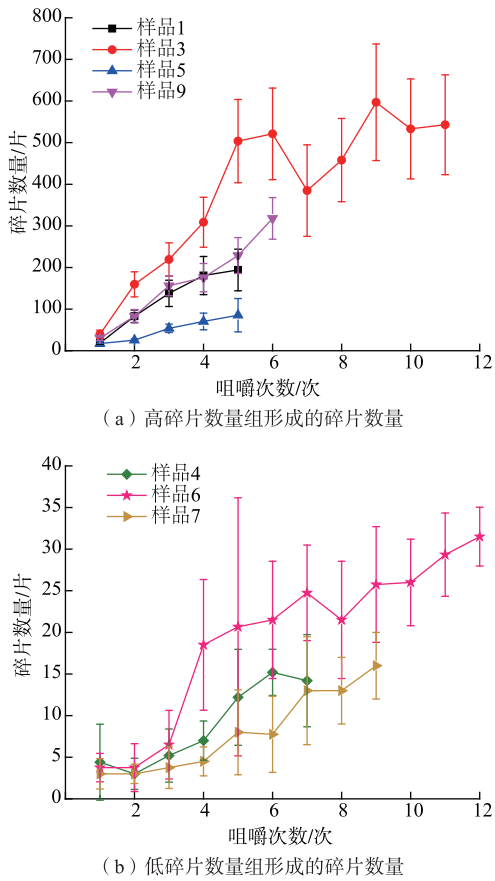


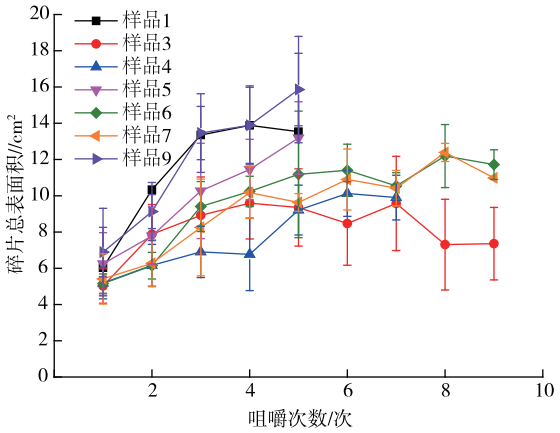
图 6　样品在不同咀嚼次数后形成的凝胶碎片数量

Fig. 6　Number of the gel fragments of samples formed after chewing for different times

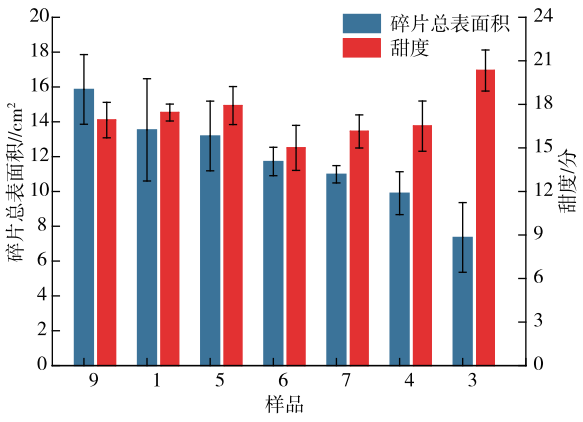
样品。样品按碎片总表面积排序为 9>1>5>6>7>4>3。除 3 号样品外,各样品的碎片总表面积排序与碎片数量排序基本类似,与易碎性的排序相似,和凝聚性的排序(1<3<9<5<4<7<6)基本相反,这说明碎片数量和大小确实会直接影响样品碎片的总表面积。

为了更好地将碎片总表面积与甜度进行比较,将样品的甜度与咀嚼终点时的总表面积共同绘制柱形图(见图 7(b))。碎片数量较多、表面积较大样品(9、1、5 号样品)的甜度均大于碎片数量较少、表面积较小的样品(6、7、4 号样品),这也证实 Morris 等的推论,即断裂行为是影响凝胶中风味释放的关键,较大的总表面积会增加风味成分的释放[18]。但是,在高碎片数与低碎片数两组样品内部,甜度与表面积的排序存在差异。3 个相对表面积较小的样品(4、6、7 号样品)之间甜度排序与表面积排序相反,根据 Gibson 等的研究结论,味道释放来自压缩下液体的排出[23],这一推断与 Morris 的理论并不矛

盾,水的释放可以使风味化合物在凝胶网络破碎产生的新表面上运输,从而促进风味的释放。Wang 等的研究也表明,碎片面积更大时,会释放出更多的液体和蔗糖[24]。在 2.2 质构分析中发现上述 3 个样品润湿性之间有较为显著的差异,样品按润湿性排序为 4>7>6,与甜度排序一致,因此推测当凝胶表面积较小且比较接近的情况下,由于微观结构的差异性,凝胶释放出来的液体体积存在差异[17],从而影响了甜味感知。对于碎片面积较大的 1、5、9 号样品,样品按润湿性排序为 9>1>5,虽然总表面积存在差异,但是甜度却没有显著性差异,推测当碎片总表面积较大时,润湿性的影响相对较小,决定甜味释放的仍然是碎片总表面积,而由于碎片总表面积差异较小,因此甜味的感知相似。另外,3 号样品碎片数量较多的同时具有最高的甜度,但是其碎片总表面积却最小,推测可能是由于 3 号样品形成的样品



(a) 样品不同咀嚼次数下的凝胶碎片总表面积



(b) 样品甜度及咀嚼终点时的碎片总表面积

图 7 凝胶碎片总表面积及其与甜度的关系

Fig. 7 Total surface area of gel fragments and its relationship with sweetness

碎片较小,很多碎片难以被检测到,导致可测量到的总表面积较小。

2.5 凝胶碎片的形态变化与甜味感知的关系

尽管凝胶大小相同,不同凝胶在吞咽前所需要的咀嚼次数却有较大差异(5~12 次),而随着咀嚼次数的增加,凝胶碎片的数量逐渐增多,总表面积增大,这直接影响了凝胶的甜味感知。Cichero 等在不同类型食物对吞咽影响的研究中认为,在咀嚼食物过程中需要将食物咀嚼为小而圆的碎块再进行吞咽[25],在吞咽前,食物必须是光滑、可变形且有凝聚力的[26-27]。为了解凝胶咀嚼过程中形成的碎片形态变化与咀嚼次数和甜度的关系,因此收集咀嚼过程中的碎片进行比较。

图 8 为高碎片数量组的样品(1、3、5、9 号样品)在不同咀嚼次数后最大面积碎片的截取图。观察样品碎片随咀嚼次数的变化可以发现,随着咀嚼的进行,较大的凝胶碎片不断破碎,碎片大小逐渐变得均匀。比较不同样品相同咀嚼次数后的碎片大小发现,4 个样品的最大碎片始终相似,但在 1 号和 5 号样品可以吞咽时(5 次),3 号(11 次)和 9 号(6 次)样品仍然需要更多次数的咀嚼,Prinz 等也发现碎片的大小并不是决定吞咽的唯一因素[26]。进一步比较咀嚼过程中凝胶碎片的形状及棱角的变化可以发现,1 号和 5 号样品的边缘柔和光滑,随着咀嚼的进行,具有明显的中间厚、边缘薄的特点。相比之下,3 号和 9 号样品具有更清晰且有棱角的边缘,随着咀嚼的进行,边缘仅变得略柔和,结合 2.4 中凝胶碎片数量结果,咀嚼终点凝胶碎片数量的顺序为 3>9>1>5,可以推测在咀嚼过程中,若凝胶的碎片棱角清晰,则会刺激口腔进一步将凝胶咀嚼为更小、更多的碎片后再进行吞咽,进而影响凝胶的甜味感知。

此外,吞咽前所需的咀嚼次数反映了凝胶的咀嚼性。根据图 5,与咀嚼性高相关的属性为硬度、弹性,结合 4 个样品硬度(5<1<9<3)与弹性(3<9<1<5)的差异,推测较高的硬度和较低的弹性可能会导致咀嚼形成的碎片棱角更为清晰。前人研究也发现,咀嚼阶段的总持续时间、咀嚼次数、咀嚼频率等均受到食物硬度和弹性的影响[28-29]。因此,凝胶本身的硬度和弹性可能会通过影响咀嚼形成的凝胶形态,进而影响咀嚼次数,并进一步影响凝胶的甜味感知。

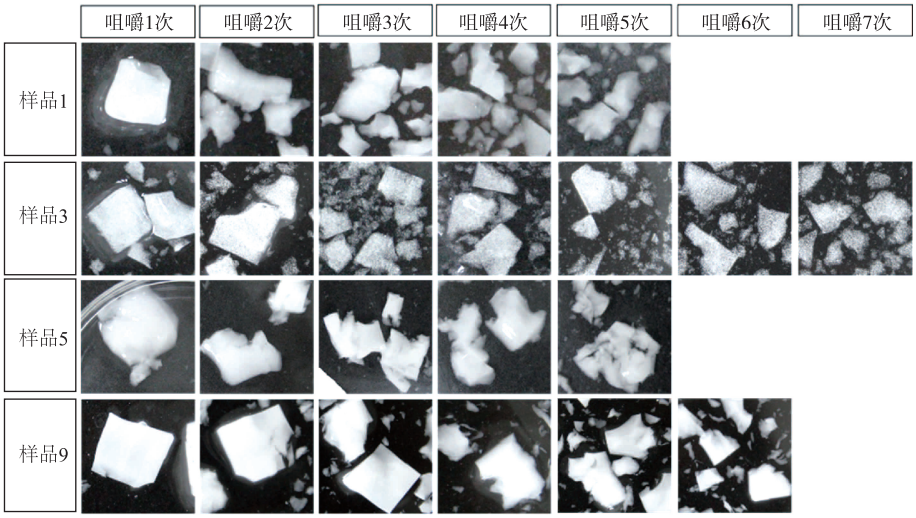


图 8　样品在不同咀嚼次数下最大面积碎片截取图(×0.8)

Fig. 8　Screenshots of the maximum area of fragments obtained after chewing for different times (×0.8)

3 结　语

以常见亲水胶体为原料,建立了 9 个具有较大质构差异的凝胶体系,分析影响凝胶甜味的关键质构因素,首先通过描述性分析全面评价了各样品的质构特征及甜度,相关性分析表明易碎性是与甜度正相关性最大的属性,凝聚性是与甜度负相关性最大的属性。此外,黏附性与溶化程度也与甜度显著正相关。通过采集并扫描凝胶在口腔咀嚼过程中形成的碎片发现,易碎性与凝聚性和扫描得到的凝胶碎片特征具有良好的相关性,咀嚼过程中形成更多凝胶碎片和更大总表面积的凝胶具有更强的甜味,但在低碎片数量样品中,凝胶甜味受到润湿性的调控,润湿性更强的样品具有更高的甜味,而高碎片数量样品不受润湿性影响。通过比较凝胶碎片的形状发现,高硬度和低弹性的样品形成的凝胶碎片具有更清晰的棱角,因此需要更多次的咀嚼才能吞咽,而这会生成更多的凝胶碎片从而增强凝胶的甜度。总之,该研究证明咀嚼中形成凝胶碎片的总表面积大小是影响凝胶甜味的关键,高易碎性和低凝聚性是增强甜味的关键质构因素。此外,润湿性强的样品可通过释放更多溶液增强凝胶甜味;高硬度和低弹性样品可通过增加咀嚼次数,间接增强凝胶甜味。

参考文献:

[1] 许洪高,王鑫,李东. 乳制品减糖的必要性及研究进展[J]. 食品科学技术学报,2022,38(5):14-23.

[2] OLIVEIRA A A A,ANDRADE A C,BASTOS S C,et al. Use of strawberry and vanilla natural flavors for sugar reduction:a dynamic sensory study with yogurt[J]. **Food Research International**,2021,139:1-10.

[3] SU K,FESTRING D,AYED C,et al. Reducing sugar and aroma in a confectionery gel without compromising flavour through addition of air inclusions[J]. **Food Chemistry**,2021,354:1-8.

[4] HOLM K,WENDIN K,HERMANSSON A M. Sweetness and texture perceptions in structured gelatin gels with embedded sugar rich domains[J]. **Food Hydrocolloids**,2009,23(8):2388-2393.

[5] SYARIFUDDIN A,USMAN N R,DIRPAN A,et al. Rheological properties and sensory perception of kue lapis with spatial distribution of sucrose and vanilla aroma[C]. London: IOP Publishing,2020.

[6] KISTLER T,PRIDAL A,BOURCET C,et al. Modulation of sweetness perception in confectionary applications[J]. **Food Quality and Preference**,2021,88:1-6.

[7] MOSCA A C,VAN DE VELDE F,BULT J H F,et al. Effect of gel texture and sucrose spatial distribution on sweetness perception[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2012,46(1):183-188.

[8] SALA G,STIEGER M. Time to first fracture affects sweetness of gels[J]. **Food Hydrocolloids**,2013,30(1):73-81.
[9] NOBLE A C. Taste-aroma interactions[J]. **Trends in Food Science and Technology**,1996,7(12):439-444.
[10] GREIS M,KUKKONEN R,LAMPI A M,et al. The impact of vanilla and lemon aromas on sensory perception in plant-based yogurts measured with static and dynamic methods[J]. **Foods**,2022,11(14):1-13.
[11] KNOOP J E,SALA G,SMIT G,et al. Combinatory effects of texture and aroma modification on taste perception of model gels[J]. **Chemosensory Perception**,2013,6(2):60-69.
[12] KOLIANDRIS A,LEE A,FERRY A L,et al. Relationship between structure of hydrocolloid gels and solutions and flavour release[J]. **Food Hydrocolloids**,2008,22(4):623-630.
[13] WILSON C E,BROWN W E. Influence of food matrix structure and oral breakdown during mastication on temporal perception of flavor[J]. **Journal of Sensory Studies**,1997,12(1):69-86.
[14] COSTELL E,PEYROLON M,DURAN L. Influence of texture and type of hydrocolloid on perception of basic tastes in carrageenan and gellan gels[J]. **Food Science and Technology International**,2000,6(6):495-499.
[15] MORITAKA H,NAITO S. Agar and gelatin gel flavor release[J]. **Journal of Texture Studies**,2002,33(3):201-214.
[16] BAYARRI S,DURAN L,COSTELL E. Compression resistance,sweetener's diffusion and sweetness of hydrocolloids gels[J]. **International Dairy Journal**,2003,13(8):643-653.
[17] SALA G,STIEGER M,VAN DE VELDE F. Serum release boosts sweetness intensity in gels[J]. **Food Hydrocolloids**,2010,24(5):494-501.
[18] MORRIS E R,NISHINARI K,RINAUDO M. Gelation of gellan:a review[J]. **Food Hydrocolloids**,2012,28(2):373-411.
[19] STIEGER M,VAN DE VELDE F. Microstructure,texture and oral processing:new ways to reduce sugar and salt in foods[J]. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**,2013,18(4):334-348.
[20] KOHYAMA K,HAYAKAWA F,KAZAMI Y,et al. Sucrose release from agar gels and sensory perceived sweetness[J]. **Food Hydrocolloids**,2016,60:405-414.
[21] LEFEBVRE A,BASSEREAU J F,PENSE-LHERITIER A M,et al. Recruitment and training of a sensory expert panel to measure the touch of beverage packages:issue and methods employed[J]. **Food Quality and Preference**,2010,21(1):156-164.
[22] 李升升,靳义超. 基于主成分和聚类分析的牦牛部位肉品质评价[J]. 食品与生物技术学报,2018,37(2):159-164.
[23] GIBSON W,SANDERSON G R. Gellan gum[M]. Boston:Springer,1997:119-143.
[24] WANG Z,YANG K,BRENNER T,et al. The influence of agar gel texture on sucrose release[J]. **Food Hydrocolloids**,2014,36:196-203.
[25] CICHERO J A Y. Texture-modified meals for hospital patients[M]. The Netherlands: Elsevier,2015:135-162.
[26] PRINZ J F,LUCAS P W. An optimization model for mastication and swallowing in mammals[J]. **Proceedings:Biological Sciences**,1997,264(1389):1715-1721.
[27] PEYRON M, LASSAUZAY C, WODA A. Effects of increased hardness on jaw movement and muscle activity during chewing of visco-elastic model foods[J]. **Experimental Brain Research**,2002,142(1):41-51.
[28] FOSTER K D,WODA A,PEYRON M A. Effect of texture of plastic and elastic model foods on the parameters of mastication[J]. **Journal of Neurophysiology**,2006,95(6):3469-3479.
[29] WODA A,FOSTER K,MISHELLANY A,et al. Adaptation of healthy mastication to factors pertaining to the individual or to the food[J]. **Physiology and Behavior**,2006,89(1):28-35.