

## 亲水胶体在易食食品中的应用

步 营, 郭佳奇, 朱文慧, 李学鹏\*, 励建荣

(渤海大学食品科学与工程学院 辽宁省高校重大科技平台“食品贮藏加工及质量安全控制工程技术研究中心”  
辽宁锦州 121013)

**摘要** 吞咽困难是由生理功能下降引起的饮食障碍。患者难以像正常人一样吞咽黏稠液体和硬度较大的食品,易造成营养不良等健康问题。易食食品的研究开发可以满足咀嚼和(或)吞咽功能下降人群的膳食需求。亲水胶体可作为增稠剂和质构改良剂应用于易食食品中。此外,亲水胶体和 3D 打印的结合,为易食食品的设计提供了更多可能。本文综述易食食品的物理特性和技术要求,亲水胶体对易食食品的改良作用以及近来亲水胶体在易食食品中的应用情况,旨在为后续易食食品的研发提供一定的帮助。

**关键词** 吞咽困难; 易食食品; 亲水胶体; 3D 打印; 质构改性

**文章编号** 1009-7848(2024)11-0448-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.11.041

当前人口老龄化严重,老年人由于生理性衰老,或多或少存在咀嚼或吞咽功能障碍,同时由食道疾病引起的吞咽困难也需要适合其咀嚼吞咽功能的食品。吞咽困难是指患者头部、颈部肌肉和神经无法像正常人一样反射,控制食团在口腔和咽部运动,从而不能吞咽流质或者较硬的固态食品,导致其营养不良<sup>[1]</sup>。我国《国民营养计划 2017—2030 年》中针对老年人群营养改善方面提出专门的重大行动和配套的实施策略等内容,明确要采取多种措施满足老年人群营养改善需求,促进“健康老龄化”。鉴于此,设计并开发适合吞咽困难患者的食品具有重要意义。2002 年日本成立了介护食品协会,针对具有咀嚼功能障碍或者吞咽障碍的老年人,通过调整食物的物理状态,推出“介护食品”。介护食品根据体积、软硬度和黏稠度分为 4 大类,日本介护食品有 2 000 种,年产量可达 19 000 t。团体标准《易食食品》(TCN5007-2021)定义易食食品为经改善食物物理性状以满足咀嚼和(或)吞咽功能下降人群膳食需求的一类食品,食物形态从固态到液态,包括软质型、细碎型、细泥型;高稠型、中稠型和低稠型。食品质构对易食

食品具有重要意义,国际标准化组织规定食品质构是指力学的、触觉的,可能还包括视觉、听觉的方法能够感知的食物物性学特征的综合感觉。改性淀粉可以有效起到增稠和质构改良的作用,常作为易食食品的质构改良剂,然而其增稠效果易受到唾液的影响,不利于患者的吞咽安全,并且改性淀粉在对食物的改性效果上仍具有很大的提升空间,亟需寻找改性淀粉的代替品用于研究开发易食食品。

亲水胶体是一类长链聚合物,可溶解或分散在水中,得益于多羟基的存在,这些聚合物在水中充分膨胀、水化形成黏稠的溶液或凝胶,具有较好的凝胶性、增稠性和稳定性。亲水胶体作为增稠剂、胶凝剂和品质改良剂被广泛应用于食品工业。来源于植物的胶体包括微晶纤维素、淀粉、果胶、瓜尔豆胶、阿拉伯胶和刺槐豆胶等。来源于动物的胶体如壳聚糖也常被用于食品加工中。此外,动物骨骼和外皮中富含胶原蛋白,其水解产生的明胶具有优良的界面性质,可有效改善食品的质地及感官属性。从脱脂牛奶中获得的乳清蛋白和酪蛋白是重要的胶体,其水解产物被证明可用于制备纳米颗粒,成为活性物质的输送材料或稳定的皮克林乳液。食品 3D 打印技术通过向食品原料中添加功能成分或从中去除特定物质为老年人等特定人群提供个性化食品。添加亲水胶体等物质成为一种有效解决淀粉作为生物墨水单一成分所带来

**收稿日期:** 2023-11-01

**基金项目:** 辽宁省海洋经济发展项目(2022-33);国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U20A2067)

**第一作者:** 步营,男,博士,副教授

**通信作者:** 李学鹏 E-mail: xuepengli8234@163.com

的质地、品质和营养不足问题的手段。相比于使用天然淀粉或改性淀粉,设计易食食品可使用的亲水胶体种类更多,并且在增稠或改变质构性能上有更好的表现。没有淀粉味、不被唾液淀粉酶影响也是选择亲水胶体的一大原因。亲水胶体具有增稠功能,可增强食品的黏度,可应用于易食食品中,用于改善吞咽困难患者的吞咽行为。

本文综述易食食品生产技术要求 and 亲水胶体对其改良的可能作用机制,以及近年来亲水胶体在易食食品中的应用现状,为今后该类食品的研究开发提供理论支撑。

## 1 易食食品的改良策略

### 1.1 感官要求

质构属性尤其是感官属性对易食食品至关重要。对于吞咽困难的患者而言,食品若只满足吞咽安全的需求,在感官属性上和普通食品差距过大,会引起患者的厌恶从而对治疗产生不利影响。同时掌握食品质构和感官之间的关系有助于合理设计易食食品,为此可通过组建经过专业训练的评测小组进行感官描述和评价来解决此问题。也有研究使用了较新的评价方法,如使用暂时性感官支配测试(Temporal dominance of sensations, TDS)和选择合适项目法(Check-all-that-apply, CATA)评价泥状食品的感官属性,根据结果将样品划分成颗粒状和光滑状两类,结果证明这两种测试方法都可以用于评价质构改性食品的感官性质<sup>[2]</sup>。

开发易食食品,要注意产品的色泽、风味、气味、硬度和光滑程度等特征。颜色是吞咽困难患者能最直接且最先发现的感官属性,若颜色难以被患者接受,服用该产品就会在心理上产生困难导致没有食欲。黑色是食品中比较不受欢迎的颜色,因此在设计老年吞咽困难食品时很少以黑木耳为原料。有研究将黑木耳和亲水胶体混合,作者分析了3D打印的黑木耳混合胶体作为易食食品的可行性,并对比了添加卡拉胶、黄原胶、阿拉伯胶对产品感官属性的影响,结果表明,添加0.9%的黄原胶并借助3D打印技术设计了打印精度高、自支撑能力强的易食食品,并且产品具有光滑的表面,最终产品不仅降低了黑木耳所需的咀嚼力,视觉

上也具备了一定的吸引力<sup>[3]</sup>。

吞咽前食团表面的光滑程度作为感官属性中的一种,被用来形容吞咽的难易程度。是否易于吞咽是评判易食食品的重要指标。在一些研究中,表面光滑程度与咀嚼/吞咽的容易程度呈正相关关系<sup>[4]</sup>。光滑程度和食品的摩擦学性质有着紧密的联系,软质食品的摩擦学特征逐渐引起了学者的注意,在设计吞咽困难食品的过程中开始被考虑。目前大多数研究也一致认定,相对于添加淀粉,胶体更能改善样品的光滑程度<sup>[5]</sup>。在一项研究中,对比了2种增稠剂对样品感官属性的影响,参与感官属性描述的分析小组表示,添加黄原胶的样品体现出了更光滑的质构属性,而改性淀粉则使样品体现出较强的颗粒感<sup>[6]</sup>。对于光滑程度的提高带来的好处,Liu等<sup>[7]</sup>在设计基于豌豆蛋白的3D打印食品时,发现添加0.3%黄原胶后样品的咀嚼次数和咀嚼时间显著低于对照组,并推测造成这种现象的原因是适量质量分数黄原胶的加入提高了样品基质的均匀性,增强了食品的光滑感,有利于吞咽困难患者的食用。

综合考虑样品的感官特征和可接受程度,发现“同质性”和“易吞咽性”是易食食品的2个主要影响因素,而“味道”“气味”“质地柔软”和“易于吞咽”有助于提高使用体验,换言之,食用具有较高食用属性评分的食物时,患者会感到更加愉悦。Liu等<sup>[8]</sup>向蟹味菇中添加了多种不同的胶体并研究了这些胶体对吞咽行为的影响,结果表明,含有0.3%黄原胶的3D打印食品吞咽舒适度更高,咀嚼时间更短,因此获得了更理想的咀嚼和吞咽愉悦感,其它各项指标也显示其可以作为一种良好的易食食品。

### 1.2 消化特性要求

消化特性也是评价易食食品的一项重要技术指标,可通过研究胃和肠消化阶段前、后的可溶性蛋白、游离肽、氨基酸和葡萄糖含量来判断消化是否被影响。高龄患者的胃肠消化能力显著低于普通人,Wang等<sup>[9]</sup>和Aalaei等<sup>[10]</sup>评估了老年人对肉、大豆和牛奶蛋白的消化情况,由于老年人胃中pH值的升高减缓了酶裂解位点暴露,导致参与测试的老人食物蛋白质酶解度显著低于对照组,而对蛋白质消化率过低极有可能造成老年人的营养

不良。增稠剂的添加会对食物质构产生很大的影响,这可能改变或限制消化酶的作用,最终影响消化过程和营养物质的释放速度。因此,针对吞咽困难患者设计的易食食品应该尽可能避免这一问题。Ribes等<sup>[11]</sup>选择奇亚籽胶和改性淀粉作为质构改良剂添加到鸡肉和蔬菜泥中,研究了它们对感官和消化特性的影响,在胃消化阶段和肠消化阶段结束后发现游离氨基酸含量在样品之间无显著性差异,证明了添加奇亚籽胶并不影响蛋白质的消化率,此外,奇亚籽胶还减缓了碳水化合物的消化和葡萄糖的吸收。

3D打印作为食品设计、加工的研究热点,同样也活跃于易食食品的研究当中。然而,当3D打印食品所拥有的优点受到开发者喜爱时,该技术

的部分缺陷也同样不能忽视。尤其是在营养方面,由于对食品原材料加工力度大,会影响食品的消化,添加胶体会弥补这种负面影响。添加胶体对消化的改善主要归功于增大了胃内容物黏度,从而降低了胃排空的速度,延长了消化时间<sup>[12]</sup>。

### 1.3 亲水胶体对易食食品的技术改良

近年来,亲水胶体作为质构改良剂和增稠剂应用于易食食品中,受到研究者的广泛关注并逐渐成为研究热点。目前,可用于易食食品的胶体种类数量越来越多,其中黄原胶应用较为广泛,除此之外,羧甲基纤维素、瓜尔豆胶、卡拉胶等胶体在改善吞咽性能和感官特性方面也发挥了良好的效果并得到了大量验证,表1为不同亲水胶体对易食食品的改良效果。

表1 不同亲水胶体在易食食品中的应用效果

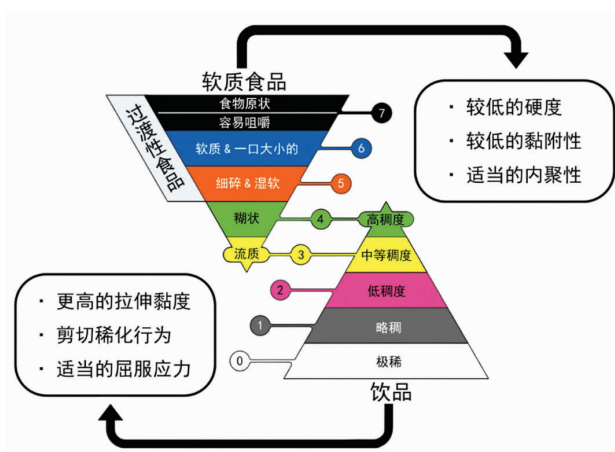
Table 1 Application effect of different hydrophilic colloid in dysphagia food

胶体种类	食品名称	效果	参考文献
黄原胶	豌豆蛋白	加入0.3%的黄原胶可赋予良好的3D打印自支撑能力,感官属性,流变特性等	[7]
	海芥菜汤、干鳕鱼汤	有较大幅度的剪切稀化行为,显示出弱凝胶特性	[13]
	水芹籽-黄原胶增稠液	随着胶体浓度增加,出现非牛顿流体特征	[14]
	食品泡沫	食品泡沫添加黄原胶后渗水性能和稳定性更好,且易于打印	[15]
羧甲基纤维素	牛肉饼	改善了牛肉饼的质构特性,根据国际吞咽困难饮食标准(International dysphagia diet standardisation initiative, IDDSI)标准被分类为6级食品	[16]
	豌豆奶油	优化了增稠豌豆奶油的结构,更容易吞咽	[17]
黄原胶-瓜尔豆胶	3D打印的猪肉糊	按一定比例添加黄原胶和瓜尔豆胶后,经过加热等后处理样品被归类为过渡食品	[18]
塔拉胶	西班牙酱	添加塔拉胶后具有更高的稠度、硬度和黏性	[19]
	高蛋白蔬菜泥	添加最佳含量的胶体含量可以获得“布丁”稠度的吞咽困难食品	[20]
奇亚籽胶	鸡肉-蔬菜汤	抗变形能力强,不改变样品的吞咽特性	[21]
魔芋胶	麦芽糊精增稠液	具有剪切稀化的特性,并为不同程度吞咽困难患者提供了3种稠度	[22]
壳聚糖	复合增稠液	壳聚糖溶于乙酸和甘油中显示出假塑性,具有较好的流动能力,吞咽前可以更好地覆盖食团,并延缓食团和片剂的释放时间	[23]
果胶	即食西葫芦泥	果胶和欧姆加热的结合,使即食西葫芦具有假塑性等适合吞咽困难患者的特征	[24]
瓜尔胶	牛奶	加入瓜尔胶获得了较高的黏稠度,表现出较高的屈服应力	[25]
刺槐豆胶	新鲜蔬菜的3D打印	具有优秀的3D打印性能,相对比冷冻蔬菜更能保持蔬菜的营养	[26]
结冷胶	增稠液	2%的结冷胶浓度无味,且研究了温度、pH值等条件对最终产品的影响	[27]



## 2 亲水胶体对易食食品的改良作用机制

对易食食品的流变学和质构特性的分类在临床学上是有意义的,不同国家分类方法不同。美国和日本的标准使用剪切黏度为  $50 \text{ s}^{-1}$  时的剪切黏度来区分增稠液的等级,并认为这是口腔的代表性剪切速率。为了规范并统一食品吞咽困难等级的术语,2013 年 IDDSI 做出了不同等级吞咽困难食品的分类,共有 8 个等级,其中 0~4 级是饮料类,包括等级 0(稀薄)、等级 1(极微稠)、等级 2(低度稠)、等级 3(流质)、等级 4(糊状);5~7 级为过渡性食品,包括等级 5(细碎及湿软)、等级 6(软质及一口量)、等级 7(食物原状)。然而, IDDSI 的这种食品分类方法只能对食品的质地产生一定的了解,并不能详细的表征吞咽困难食品质地参数,因此,需要通过仪器全面测定食品的流变、质构等参数。



注: 本图参考 IDDSI 网站 (<https://iddsi.org/framework/IDDSI-framework>) 上展示的插图并加以翻译和修改。

图 1 IDDSI 框架的食品分级和产品设计策略

Fig.1 IDDSI framework for food grading and product design strategies

### 2.1 流质食品的非牛顿流体特征

**2.1.1 屈服应力** 屈服应力是指破坏样品内部结构,使其由静止状态转变为流动状态的最小作用力。当对流质食品施加的力小于屈服应力时,食品便不会流动并保持原先的形状,此时可视为弹性固体。水、酒精、蜂蜜等大多数纯液体都属于牛顿流体,这种流体没有屈服应力,即便在很小的力下也会随之流动,因此牛顿流体不适合患有吞咽困

难的老年人食用。非牛顿流体是指不符合牛顿黏性定律的流体,其剪切应力和剪切应变不成线性关系,常见的高分子聚合物溶液,如玉米淀粉的水溶液,就属于非牛顿流体。增稠液体通常具有较低的屈服应力,这有利于食品在口腔中形成具有内聚性的食团,同时又易于发生变形和流动。换句话说,加入胶体使流质食品具有假塑性从而成为非牛顿流体。适用于吞咽困难患者的流质食品通常具有较低的屈服应力,这有利于食品形成完整的食团,而在口腔中施加少量的力后仍然可以使其流动。由发酵产生的黄原胶是最常见的增稠剂,其具有高分子质量和硬的棒状分子链,在流变学上表现出显著的非牛顿流体特性和较小的屈服应力。此外,许多研究以黄原胶为参照,对比评估了其它增稠剂的流变特性。Wei 等<sup>[28]</sup>研究了在水和麦芽糊精存在的乳液中,羧甲基纤维素增稠液的流变行为,包括剪切稀化、屈服、黏弹性等性能,当增稠剂的浓度一样时,黄原胶和羧甲基纤维素在乳液和水溶液中均显示出一定的屈服应力,而使用传统的魔芋葡甘聚糖作为增稠剂时,其弹性应力对应变呈现出线性响应,不存在屈服应力,证明了羧甲基纤维素作为一种新型的面向吞咽困难患者的增稠剂的可行性。

值得注意的是,当胶体和 3D 打印结合的时候,屈服应力同样发挥着重要作用。屈服应力常常是储能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )的交点,被认为和喷嘴挤出墨水的难易程度有关,当屈服应力较大时,墨水需要更大的力才能被挤出,因此作为 3D 打印食品经常检验的指标。Dick 等<sup>[18]</sup>测试了不同配方的屈服应力,用来评估猪肉的打印性能,发现每种配方的屈服应力无显著差异,说明启动这些配方流动所需的临界应力相似,无论是在离开喷嘴还是沉积过程中都具有可恢复性。

**2.1.2 黏性行为** 黏度只适用于描述流质食品,被定义为剪切应力和剪切速率的比值,用于代表物质流动的阻力。常见的增稠液体会伴随剪切稀化行为,随着剪切速率的增加,黏度会随之减小,这种现象被认为有利于吞咽困难患者,这种行为显著区别于牛顿流体,如水、蜂蜜等,它们不会随着剪切速率发生任何改变。因此,这种增稠液体具有较高的黏度,有助于食团在口腔中更容易受控

制并避免危险的流动,而高剪切速率下的低黏度又保证了患者吞咽时所需的力<sup>[28]</sup>。Kongjaroen 等<sup>[29]</sup>对比了5种增稠剂在剪切速率下的黏度,其中由黄原胶组成的增稠剂可以在剪切速率很低时发生剪切稀化行为,而含有塔拉胶或瓜尔胶的增稠剂在达到一定的剪切速率时才会有剪切稀化现象,这说明即使是很小的剪切速率也可以使黄原胶发生解缠绕,从而导致剪切黏度的下降,而最终所有样品都显示出剪切稀化现象。目前所有研究中,增稠液体的流变特性都需要首先验证样品的剪切稀化行为,可见这种行为在易食食品中的重要性。有许多模型可以用来拟合剪切稀化现象,其中 Careau-Yasuda(CY)模型使用的最多,它可以更好的描述增稠液的非牛顿流体行为,模型的方程中有几个参数十分重要,可以很直观地看出非牛顿流体的特征强弱。通常在得到流动曲线后采用CY模型拟合并观察流动指数 $n$ ,若 $0 < n < 1$ ,则增稠液为非牛顿流体,有利于患者的吞咽安全。 $n$ 值越小代表剪切稀化越明显, $n$ 往往会随着胶体加入的浓度增大而增大,较大程度的剪切稀化行为不容易造成吞咽时误吸,更有利于吞咽困难患者<sup>[30]</sup>。

除了增稠液的剪切流变学,增稠液的拉伸延展性同样是设计和开发产品时值得注意的。增稠液的拉伸黏度和尺寸的改变有紧密的联系,从而影响到食团的流动行为,当液体的稠度增大时,咽下食物的流动速度会减慢,且拉伸黏度的增加会抑制食团的拉伸。拉伸黏度会促使食团保持为一个整体而减少在咽部的残留,降低吞咽的风险。使用毛细管破裂拉伸流变仪可以测定增稠剂的拉伸性能,通过观察增稠液的毛细管断裂时间可以对比不同种类的增稠液和浓度。和剪切黏度相似的是,增稠剂的浓度也会影响拉伸黏度的大小,浓度越大则拉伸黏度越大。有研究发现,当剪切速率为 $50 \text{ s}^{-1}$ 且黏度相等时,增稠剂的类型决定了流体的拉伸黏度。Hadde 等<sup>[31]</sup>对比了3种不同增稠剂的剪切和拉伸黏度,这3种增稠剂样品拉伸黏度的区别在于,由淀粉组成的增稠剂样品在拉伸时最容易断裂,由黄原胶组成的增稠剂样品则相反,因其是否容易断裂和增稠液的均匀程度紧密相关,导致高度不均匀的淀粉增稠剂样品具有最差的拉伸效果,长丝最容易断裂,在后来研究中也证实了这

一结果<sup>[32]</sup>,因此胶体增稠剂比淀粉增稠剂具有更优异的拉伸黏度,更利于吞咽困难患者食用。拉伸黏度和食品的内聚性有密切关系,Hadde 等<sup>[33]</sup>招募了多名志愿者并评估了10种增稠水样品的内聚性,使用仪器测定了样品的流变特性,结果显示样品的最大拉伸黏度和内聚性虽然不是线性相关,但仍然具有一定的相关性,证明了最大拉伸黏度和内聚性之间的紧密联系。

## 2.2 质构改良

在口腔中加工食品时,口腔分泌的唾液会在食团的最外层添加一层安全、光滑和有黏性的薄膜,吞咽困难患者无法像正常人一般分泌唾液,因此对食品的质构改性应该更贴近于正常人口腔加工后状态,尽可能地降低吞咽过程中的风险<sup>[34]</sup>。亲水胶体是一种十分有效的质构改性剂,胶体-蛋白质的形成有助于食品的后续加工、改善食品的质地<sup>[35]</sup>。胶体对易食食品的改性包括如下几类:切碎的食物或果泥、食物的整体<sup>[36]</sup>。和流质食品不一样的是,易食食品的目标是在口腔加工的情况下可以形成适合吞咽的食团<sup>[37]</sup>。对食品质构改良主要考察硬度、内聚性和黏附性等参数。

### 2.2.1 硬度

硬度被定义为咬下第一口食物并使之变形所需要的力,是最重要的、最直观的质构参数。为了方便咀嚼,在易食食品的设计中较低的硬度非常重要。和硬度有关的一组参数是流变参数,储能模量 $G'$ 代表黏弹性行为的弹性部分,描述的是样品的固态特性。损耗模量 $G''$ 描述的是黏弹性行为的黏性部分,也可以看作是样品的液态特性。当储能模量 $G'$ 大于损耗模量 $G''$ 时,食品的硬度也会随之上升。3D打印猪肉泥中添加黄原胶和瓜尔胶用于改善吞咽困难饮食,结果发现未添加胶体的猪肉样品有最高的硬度值,并且有最高的咀嚼性,甚至比添加了胶体的样品高3~8倍,这意味着患者在食用未添加胶体的猪肉样品时,需要花更多的力咀嚼和吞咽,而加入胶体则减少了食用的困难。除此之外,经过加热并冷却处理观察不同样品之间的损耗因子,发现未添加胶体的样品有更大的损耗因子,说明降温后未添加胶体的样品有更大的硬度,更接近固体。在此研究中硬度的上升可归因于加热致使肌原纤维的结构发生变化,并在此后发生持续的蛋白质-多糖的相互作用和交

联及收缩的结缔组织和大量水分的损失有关,导致更加紧密的结构生成,最终硬度上升<sup>[18]</sup>。

**2.2.2 内聚性** 内聚性被描述为使食团构成一个整体的能力,和食品的屈服应力和拉伸性能强烈相关<sup>[38]</sup>。较低黏度的液体需要较高的内聚性,这会防止食品在吞咽时断裂,而高黏度流质食品的内聚性不能过大,过大的内聚性会导致拉伸困难,因此,过大或过小的内聚性都不利于吞咽安全<sup>[39]</sup>。

内聚性的大小与亲水胶体的种类有关,具有适当内聚性的软质食品更有利于吞咽安全。在一些改性的软质肉类食品中,内聚性被证明与胶体的持水能力有关。以常见的黄原胶来说,黄原胶因其独特的分子结构而获得了较强的持水能力,这种结构可能抑制肌原纤维的凝胶网络形成,导致凝胶结构较弱,在这种影响下,食品的内聚性较低<sup>[40]</sup>。添加黄原胶和罗勒籽胶的苹果和可食用玫瑰样品具有更高的内聚性,且黄原胶和罗勒籽胶以一定比例混合时内聚性最高,表明在食品内部有更高的结合力,在吞咽过程中也不容易分散<sup>[41]</sup>。

**2.2.3 黏附性** 黏附性是一种材料黏附在另一种材料表面的能力,对于泥状或者流体食品,食品黏附性的研究具有重要意义。食品的内聚性和黏附性在 IDDSI 框架中有较为简易的测定方式,例如 4~5 级食品可采用餐勺倾斜试验,即取一勺样品并保持倾斜,轻轻敲弹勺子并观察样品是否滑落,样品滑落后勺子上可能会残留少量薄层,即使该薄层存在,能看到勺子就说明样品作为吞咽困难饮食是安全的<sup>[15]</sup>。

对于易食食品来说,较低的黏附性是必需的。不同种类的增稠剂加入相同的样品中可能会有不一样的黏附性,在一项胡萝卜泥的易食食品改性的研究中,添加了多种常见的商业增稠剂,并分别通过仪器和感官测定了样品的质构参数,对黏附性来而言,未添加增稠剂的对照组有最低的黏附性,其次是添加黄原胶和淀粉的样品,添加结冷胶的样品有最高的黏附性,且仪器测定的结果和感官测定结果有较好的相关性,不仅证明了该研究采用的仪器可以代替专业的感官测量小组,还对比了不同商业增稠剂的质构属性<sup>[42]</sup>。

除了增稠剂的种类,黏附性也会随着增稠剂的浓度发生变化。有研究采用苹果果胶和柑橘果

胶作为质构改良剂,随着胶体的浓度升高,样品的黏附性也升高,这证明了样品黏附性与果胶浓度之间的直接关系,在设定的浓度范围内,添加 0.3% 苹果果胶和柑橘果胶的样品具有最高的黏附性<sup>[24]</sup>。

### 2.3 3D 打印的自支撑作用

3D 打印食品的墨水需要一定的自支撑能力才可以在被挤出后可以层积并稳定形状,这需要 3D 打印的泥状食品有更类似于固体的行为。研究发现,黄原胶可以通过降低水的流动性并促进氢键生成,提高打印墨水的机械强度,而添加了阿拉伯胶的样品机械强度不足以抵抗变形和支撑打印<sup>[43]</sup>。在其它使用黄原胶改善 3D 打印的研究中也有相似的结论,在一定浓度范围内随着加入黄原胶的浓度上升,样品的机械强度也被增大<sup>[7]</sup>。

研究者常用空心圆柱体来观察样品的自支撑能力,从而评估样品的打印性能<sup>[43]</sup>。频率扫描得出的储能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  可以很好地描述墨水的类固体行为,预测墨水随时间而变化的机械强度<sup>[44]</sup>,在  $G'$  和  $G''$  的基础上,计算损耗因子可以更直观的判断机械强度的大小,食品的  $\tan\delta$  在 0.1 到 1 范围内说明  $G'$  在频率上高于  $G''$ ,这种情况被认为有利于吞咽困难患者,也有利于打印材料的自支撑能力<sup>[18]</sup>。

## 3 亲水胶体在易食食品中的应用

### 3.1 软质食品

**3.1.1 普通软质食品** 患有吞咽困难的老年人无法像普通人一样正常摄取软质食品,患者伴随衰老而产生的口腔健康问题,使其无法产生较大的咀嚼力和像普通人一样长的咀嚼时间。因此,许多富含优质蛋白的肉类通常不适用于吞咽困难患者。适合吞咽困难患者摄入的软质食品,应该具有柔软、光滑、富含水分等特点<sup>[45]</sup>。因此,对食品的质构改性可解决吞咽困难患者摄入食物上的困难。经过质构改性后,患者可以依靠舌头挤压口腔,采用很小的力就可以将食物咽下。对肉类食品的软化加工有许多方式,热和高压等方式是过去对肉类加工较为常用的方式<sup>[46]</sup>,然而热加工对食品会产生许多负面的影响,如营养损失和降低能量的摄入等,高压处理虽然可以改善凝胶行为,但高压



的范围通常具有很高要求,压力过高或者不够都难以达到理想的效果。胶体的加入是更合适的方法,目前已经应用于牛肉、猪肉、和鸡肉等许多肉制品当中。

在最新的研究中,Kong等<sup>[47]</sup>在红豆馅青团中添加了一种大豆多聚糖,有效改善了青团的持水力,IDDSI结果显示,在一定的大豆多聚糖添加量范围内,随着大豆多聚糖质量分数的升高,样品的硬度明显下降,添加0.9%的大豆多聚糖可使样品的硬度值最低,低场核磁结果发现大豆多聚糖的加入使青团在烹饪过程中不易失水,改善了淀粉糊化的效果。

3.1.2 结合3D打印开发软质食品 3D打印的确为患有吞咽困难症的老年人在饮食上提供了更多选择。值得注意的是,未经处理的打印墨水通常黏

性过大,不利于3D打印机的喷嘴将墨水挤出。为了适合老年人食用,墨水的硬度很低,自支撑能力小,导致打印的精准度差,产品最后的外观在评分上不高。越来越多的研究表明可通过添加胶体改善易食食品的3D打印性能。Liu等<sup>[43]</sup>向香菇中添加黄原胶、卡拉胶和阿拉伯胶并对比了三者的打印性能,发现添加0.3%黄原胶和卡拉胶的样品可通过降低水的流动性和促进氢键形成来提高打印墨水的自支撑能力。在IDDSI框架下,含0.3%黄原胶和卡拉胶的样品被归类为第5级的过渡性食品。结合3D打印制作吞咽困难食品还有其它优势,在3D打印和胶体的组合下更多的食品外观成为可能,因此相对于模压生产,3D打印可以减少工作量并使食品外观更有新意。亲水胶体提高3D打印性能的研究如表2所示。

表2 亲水胶体提高3D打印性能的实例

Table 2 Examples of hydrophilic colloid improving 3D printing performance

胶体种类	被加工的打印墨水	胶体改进打印性能的效果	参考文献
黄原胶、卡拉胶	香菇	通过促进氢键的形成改善打印墨水的自支撑能力,使最终产品归为IDDSI的第5类食品	[43]
混合增稠剂	水、果汁、牛奶	与手工制备的样品相比,增稠剂结合3D打印产生了略高的黏度和更均匀和透明的共混物	[48]
黄原胶、卡拉胶、刺槐豆胶	新鲜蔬菜	满足了营养定制和感官吸引力上的需求,使果蔬3D打印的原料除冻干粉外有了更多的选择	[26]
鱼糜凝胶	南瓜糊	添加来自于玉米的肌原纤维蛋白后,打印墨水有了更适合的G'和保水能力,从而提升了打印性能	[44]
魔芋胶/黄原胶	鱼酱	加入魔芋胶/黄原胶增加了鱼糊中的氢键含量并增加了鱼糊的表黏度,从而有利于打印的墨水层叠	[49]
明胶/木薯淀粉	葡萄凝胶	最终配方的凝胶具有最高的花青素生物可达性(22.9%~28.7%),3D打印适合吞咽困难患者	[50]
黄原胶和罗勒籽胶	苹果-可食用玫瑰	添加胶体可以减少油墨的脱水作用,合适的配方可以具有较高的打印精度和光滑的表面质构	[41]
黄原胶、卡拉胶、刺槐豆胶	蟹味菇	除0.9%卡拉胶样品外,所有样品均可归类为5级吞咽困难饮食	[8]
大豆多糖	青团	改善了糯米淀粉的糊化和降解,符合IDDSI框架中的6级食品	[47]

3D打印还为强化易食食品的营养价值提供了方便。在打印之前,各种食品成分被匀质混合在一起,经过胶体形成的三维网状结构可以有较强的内聚性,易食食品的设计者可以轻易地向其中添加各种营养和活性成分。在一种基于葡萄凝胶的3D打印食品中,向其中添加明胶和淀粉的混合物(明胶和淀粉的质量比为1:1)作为质构改良

剂,可使花青素的生物可及性达到28.7%,不仅获得了有益于吞咽困难患者的易食食品,还个性化的添加了花青素作为营养强化剂,改善了这一易食食品的营养价值<sup>[50]</sup>。

### 3.2 流质食品

除了软质食品外,流质食品也需要经过特殊处理。包括水在内,对流质食品的增稠是目前常用

的研究策略。研究证明,适宜浓稠度的液体可以加快喉部运动的速度,增加舌压的产生,增加食管上括约肌开口的持续时间和舌咽运动的量<sup>[51-52]</sup>。基于淀粉的增稠剂,虽然可以增大液体的稠度,然而其伴随的淀粉味,较弱的耐热性,与唾液相互作用等缺陷使学者开始寻找其替代品。向流质食品中添加胶体,可以增大食品的稠度并轻易制成花蜜装、蜂蜜状和布丁状态,更利于患者吞咽。

加入胶体以增稠流质食品的方法适用于多种食品介质,学者们通过检验增稠液黏度的剪切、拉伸特性等对产品的适用性做出了肯定。Kongjaroen等<sup>[53]</sup>研究了不同分散介质对增稠剂增稠效果的影响,总体而言,虽然增稠剂在苹果汁和牛奶的拉伸流变性测试中的表现不同,但依然在高剪切速率下表现出相似的剪切黏度,此外,当流质食品是饮料而不是水时,该研究指出了不同分散介质对增稠剂影响的重要性。

#### 4 结语

随着人口老龄化的攀升,易食食品的研究开发越来越受到关注。易食食品的设计首先要满足一定的质构属性,其次是营养成分的消化特性。对于流质食品,亲水胶体可改变食品的流变特性,如黏度和屈服应力,使食品拥有了非牛顿流体特征。对于固体食品,亲水胶体改变了食品的硬度、内聚性和黏附性,使食品更符合吞咽困难患者的需求。和3D打印技术结合后,亲水胶体显著改善了食品的自支撑能力,提高了3D打印性能。本文综述了亲水胶体在易食食品中的应用情况,旨在为后续相关更深入的研究以及开发易食食品提供一定的理论参考。

#### 参 考 文 献

- [1] 谢静. 老年人群膳食营养与食物适口性评价研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.  
XIE J. Study on the evaluation of dietary nutrition and food palatability in the elderly[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [2] SHARMA M, DUIZER L. Characterizing the dynamic textural properties of hydrocolloids in pureed foods – A comparison between TDS and TCATA[J]. Foods, 2019, 8(6): 184.
- [3] XING X B, CHITRAKAR B, HATI S, et al. Development of black fungus-based 3D printed foods as dysphagia diet: Effect of gums incorporation[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107173.
- [4] METHACANON P, GAMONPILAS C, KONGJAROEN A, et al. Food polysaccharides and roles of rheology and tribology in rational design of thickened liquids for oropharyngeal dysphagia: A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 4101-4119.
- [5] GAMONPILAS C, KONGJAROEN A, METHACANON P. The importance of shear and extensional rheology and tribology as the design tools for developing food thickeners for dysphagia management[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 140: 108603.
- [6] ONG J J X, STEELE C M, DUIZER L M. Sensory characteristics of liquids thickened with commercial thickeners to levels specified in the International Dysphagia Diet Standardization Initiative (IDDSI) framework[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 208-217.
- [7] LIU Z B, CHEN X, DAI Q Y, et al. Pea protein-xanthan gum interaction driving the development of 3D printed dysphagia diet [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108497.
- [8] LIU Z B, XING X, MO H Z, et al. 3D printed dysphagia diet designed from *Hypsizygus marmoreus* by-products with various polysaccharides[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 343: 111395.
- [9] WANG C, ZHAO F, BAI Y, et al. Effect of gastrointestinal alterations mimicking elderly conditions on *in vitro* digestion of meat and soy proteins[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132465.
- [10] AALAEI K, KHAKIMOV B, DE GOBBA C, et al. Gastric digestion of milk proteins in adult and elderly: Effect of high-pressure processing[J]. Foods, 2021, 10(4): 786.
- [11] RIBES S, GALLEGRO M, BARAT J M, et al. Impact of chia seed mucilage on technological, sensory, and *in vitro* digestibility properties of a texture-modified puree[J]. Journal of Functional Foods, 2022, 89: 104943.
- [12] LORENZ T, ISKANDAR M M, BAEGHBALI V, et



- al. 3D food printing applications related to dysphagia: A narrative review[J]. *Foods*, 2022, 11(12): 1789.
- [13] KIM S G, YOO W, YOO B. Effect of thickener type on the rheological properties of hot thickened soups suitable for elderly people with swallowing difficulty[J]. *Preventive Nutrition and Food Science*, 2014, 19(4): 358–362.
- [14] POURSAANI P, RAZAVI S M A, NOROUZI A. Numerical investigation of a two-phase system on swallowing behavior in dysphagia: A case study on cress seed gum-xanthan gum thickened liquids[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 128: 186–201.
- [15] LEE A Y, PANT A, POJCHANUN K, et al. Three-dimensional printing of food foams stabilized by hydrocolloids for hydration in dysphagia[J]. *International Journal of Bioprinting*, 2021, 7(4): 393.
- [16] PEMATILLEKE N, KAUR M, ADHIKARI B, et al. Investigation of the effects of addition of carboxy methyl cellulose (CMC) and tapioca starch (TS) on the beef patties targeted to the needs of people with dysphagia: A mixture design approach[J]. *Meat Science*, 2022, 191: 108868.
- [17] TALENS P, CASTELLS M L, VERDÚ S, et al. Flow, viscoelastic and masticatory properties of tailor made thickened pea cream for people with swallowing problems[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 292: 110265.
- [18] DICK A, BHANDARI B, DONG X, et al. Feasibility study of hydrocolloid incorporated 3D printed pork as dysphagia food [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107: 105940.
- [19] RIBES S, ESTARRIAGA R, GRAU R, et al. Physical, sensory, and simulated mastication properties of texture-modified Spanish sauce using different texturing agents [J]. *Food & Function*, 2021, 12(17): 8181–8195.
- [20] GIURA L, URTASUN L, ANSORENA D, et al. Effect of freezing on the rheological characteristics of protein enriched vegetable puree containing different hydrocolloids for dysphagia diets [J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2022, 169: 114029.
- [21] RIBES S, GRAU R, TALENS P. Use of chia seed mucilage as a texturing agent: Effect on instrumental and sensory properties of texture-modified soups [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 123: 107171.
- [22] ZHANG W, REN X N, ZHANG L L, et al. Preparation and performance of thickened liquids for patients with konjac glucomannan-mediated dysphagia[J]. *Molecules*, 2022, 27(7): 2194.
- [23] SANGNIM T, SRIAMORNSAK P, SINGH I, et al. Swallowing gel for patients with dysphagia: A novel application of chitosan[J]. *Gels*, 2021, 7(3): 108.
- [24] OLARU L D, NISTOR O V, ANDRONOIU D G, et al. Effect of added hydrocolloids on ready-to-eat courgette (*Cucurbita pepo*) puree ohmically treated [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59(1): 388–396.
- [25] SOPADE P A, HALLEY P J, CICHERO J A Y, et al. Rheological characterisation of food thickeners marketed in Australia in various media for the management of dysphagia. II. Milk as a dispersing medium[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84(4): 553–562.
- [26] PANT A, LEE A Y, KARYAPPA R, et al. 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 114: 106546.
- [27] JENZER H, MÜLLER S, ROTUNNO F, et al. PP-007 evaluation of amylase-resistant gellan GUM (E418) as a rheology and texture modifier for oral preparations[J]. *European Journal of Hospital Pharmacy*, 2016, 23(Suppl 1): A197–A197.
- [28] WEI Y Y, GUO Y L, LI R Q, et al. Rheological characterization of polysaccharide thickeners oriented for dysphagia management: Carboxymethylated curdlan, konjac glucomannan and their mixtures compared to xanthan gum[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106198.
- [29] KONGJAROEN A, METHACANON P, GAMONPILAS C. On the assessment of shear and extensional rheology of thickened liquids from commercial gum-based thickeners used in dysphagia management[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 316: 110820.
- [30] NISHINARI K, TAKEMASA M, SU L, et al. Effect of shear thinning on aspiration – Toward making solutions for judging the risk of aspiration [J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(7): 1737–1743.
- [31] HADDE E K, CHEN J. Shear and extensional rheological characterization of thickened fluid for dysphagia management[J]. *Journal of Food Engineering*,

- 2019, 245: 18–23.
- [32] WAQAS M Q, WIKLUND J, ALTSKÄR A, et al. Shear and extensional rheology of commercial thickeners used for dysphagia management[J]. *Journal of Texture Studies*, 2017, 48(6): 507–517.
- [33] HADDE E K, CHEN W, CHEN J. Cohesiveness visual evaluation of thickened fluids[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105522.
- [34] BEN TOBIN A, MIHNEA M, HILDENBRAND M, et al. Bolus rheology and ease of swallowing of particulated semi-solid foods as evaluated by an elderly panel[J]. *Food & Function*, 2020, 11(10): 8648–8658.
- [35] SARTESHNIZI R, HOSSEINI H, NARGES K. A review on application of hydrocolloids in meat and poultry products[J]. *International Food Research Journal*, 2015, 22: 872–887.
- [36] AGUILERA J M, PARK D J. Texture -modified foods for the elderly: Status, technology and opportunities[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 57: 156–164.
- [37] HADDE E K, CHEN J. Texture and texture assessment of thickened fluids and texture -modified food for dysphagia management [J]. *Journal of Texture Studies*, 2021, 52(1): 4–15.
- [38] NISHINARI K, TURCANU M, NAKAUMA M, et al. Role of fluid cohesiveness in safe swallowing[J]. *NPJ Science of Food*, 2019, 3: 5.
- [39] BLOK A E, BOLHUIS D P, ARNAUDOV L N, et al. Influence of thickeners (microfibrillated cellulose, starch, xanthan gum) on rheological, tribological and sensory properties of low -fat mayonnaises [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 136: 108242.
- [40] DICK A, BHANDARI B, PRAKASH S. Printability and textural assessment of modified -texture cooked beef pastes for dysphagia patients[J]. *Future Foods*, 2021, 3: 100006.
- [41] QIU L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Investigation of 3D printing of apple and edible rose blends as a dysphagia food[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108184.
- [42] PEH J X, LIM W, THA GOH K K, et al. Correlation between instrumental and sensory properties of texture -modified carrot puree[J]. *Journal of Texture Studies*, 2022, 53(1): 72–80.
- [43] LIU Z, BHANDARI B, GUO C, et al. 3D printing of shiitake mushroom incorporated with gums as dysphagia diet[J]. *Foods*, 2021, 10(9): 2189.
- [44] WU J, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Improving 3D printability of pumpkin pastes by addition of surimi[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(11): e17127.
- [45] MUNIALO C D, KONTOGIORGOS V, EUSTON S R, et al. Rheological, tribological and sensory attributes of texture -modified foods for dysphagia patients and the elderly: A review[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(5): 1862–1871.
- [46] PEMATILLEKE N, KAUR M, ADHIKARI B, et al. Meat texture modification for dysphagia management and application of hydrocolloids: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(6): 1764–1779.
- [47] KONG D, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Feasibility of hydrocolloid addition for 3D printing of Qingtuan with red bean filling as a dysphagia food [J]. *Food Research International*, 2023, 165: 112469.
- [48] DIAÑEZ I, GALLEGOS C, BRITO -DE LA FUENTE E, et al. Implementation of a novel continuous solid/liquid mixing accessory for 3D printing of dysphagia -oriented thickened fluids[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106900.
- [49] YU X L, WANG Y, ZHAO W Y, et al. Hydrophilic colloids (Konjac gum/Xanthan gum) in 3D printing of transitional food from fish paste[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 137: 108333.
- [50] SARTORI A G D O, SALIBA A S M C, BITENCOURT B S, et al. Anthocyanin bioaccessibility and anti -inflammatory activity of a grape -based 3D printed food for dysphagia[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 84: 103289.
- [51] NAKAO Y, ONISHI H, HAJI T, et al. Impact of thickened liquids on laryngeal movement velocity in patients with dysphagia[J]. *Dysphagia*, 2022, 37(1): 207–215.
- [52] BROOKS L, LIAO J, FORD J, et al. Thickened liquids using pureed foods for children with dysphagia: IDDSI and rheology measurements[J]. *Dysphagia*, 2022, 37(3): 578–590.
- [53] KONGJAROEN A, METHACANON P, SEETAPAN

N, et al. Effects of dispersing media on the shear and extensional rheology of xanthan gum and guar

gum-based thickeners used for dysphagia management[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107857.

## The Application of Hydrophilic Colloid in Dysphagia Food

Bu Ying, Guo Jiaqi, Zhu Wenhui, Li Xuepeng\*, Li Jianrong

(*Engineering and Technology Research Center of Food Preservation, Processing and Safety Control of Liaoning Province, College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning*)

**Abstract** Dysphagia is a dietary disorder caused by the decline of physiological function, and patients have difficulty swallowing thick liquids and foods with greater hardness like normal people, resulting in health problems such as malnutrition. The research and development of dysphagia food can meet the dietary needs of people with decreased chewing and/or swallowing function. Hydrophilic colloid can be used as a thickening agent and texture modifier in dysphagia food. In addition, the combination of hydrophilic colloid and 3D printing provides more possibilities for the design of dysphagia food. In this paper, the physical properties and technical requirements, the improvement mechanism of hydrophilic colloid on dysphagia food, and the application of hydrophilic colloid in YISHI food in recent years were reviewed in order to provide some help for the subsequent research and development of the dysphagia food.

**Keywords** dysphagia; dysphagia food; hydrophilic colloid; 3D printing; textural modification