

3D 打印技术在保健食物加工应用中的研究进展

王国霞 李春阁 武 思 李孟丹 宋宗豫

(郑州师范学院生命科学学院, 河南 郑州 450044)

摘要: 三维打印技术是通过数字化进行控制的一种新型食品加工技术, 具有形态各异、节省材料、营养均衡等特点。在现代食品加工领域中, 越来越多的消费者开始关注具有保健作用的食物, 这不仅可以解决温饱问题还能补充部分营养, 因此, 将 3D 打印技术和这些物质结合将成为现代食品领域发展的一个重要方向。文章在对 3D 食品打印过程中常用的设备类型进行阐述的基础上, 总结了 3D 打印技术在具有保健作用食物中的加工应用现状, 分析比较了能够改善 3D 打印食品特性的方法, 并展望了这些食物未来在 3D 食品打印中所面临的挑战和机遇。

关键词: 3D 打印; 保健食物; 改性方法; 挑战和机遇

Research progress of 3D printing technology in health food processing

WANG Guoxia LI Chungu WU Si LI Mengdan SONG Zongyu

(School of Life Sciences, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou, Henan 450044, China)

Abstract: As a new food processing technology controlled by digitization, three-dimensional printing technology is featured with diverse shapes, material saving, and balanced nutrition. In modern food processing, more and more consumers have begun to pay attention to healthy food, which can not only alleviate the food shortage but also supplement certain nutrition. Therefore, the combination of 3D printing technology and these substances will become an important direction for the future development of modern food. Based on the discussion over equipment types commonly used in the process of 3D food printing, the current situation of the processing and application of 3D printing technology in health food is summarized. Approaches to improve the characteristics of 3D printed food are analyzed and compared, and the challenges and opportunities for these foods in 3D food printing in the future are predicted.

Keywords: 3D printing; health food; modification method; challenge and opportunity

药食同源的理念和应用观点是“未病先防”, 其思想根源于《黄帝内经》^[1]。药食两用是指既能充当食物又能调节机体健康的物品, 这些物品具有药食两用的特点^[2]。此外, 历代本草文献中也记载一些日常生活中所常见的具有保健作用的食物, 如荞麦、柠檬、羊肉、鱼肉、胡萝卜等, 科学技术的不断进步, 生活水平的不断提高, 使得具有保健作用的食物也在不断扩增, 已由过去单纯的动物类食物、植物类食物扩增到如今大多数消费者也会关注的微生物类食物。近年来, 随着被列入药食两用品目录食物的逐渐增多, 具有食用价值和药用功效的药食两用物质被越来越多地应用到保健食品和功能食品行业中, 为全面推进健康中国战略提供了有力支撑, 同时也为

新型食品研发带来了新的机遇。

3D 打印技术主要是通过计算机模型设计、层层堆叠的方式形成一种三维实体。随着计算机科学和材料科学的创新发展, 3D 打印技术在各行业发挥着巨大的作用, 如生物医药、机械、食品等领域^[3-4]。目前, 3D 打印技术引领食品领域的第三次工业革命, 可打印原料已包括谷物类^[5]、肉类^[6]、果蔬类^[7]、巧克力^[8]等。3D 打印食品具有复杂的形状、均衡的营养等优势而备受消费者青睐^[9]。

将药食两用物质与 3D 食品打印技术相结合, 会改变传统食品的生产 and 消费模式。其中, 药食两用物质可以提供所需的功能成分, 3D 食品打印技术有助于简化供应链, 不仅能实现食品的定制化设计, 还能够保证个性化营

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(编号: 252102310529)

通信作者: 王国霞(1977—), 女, 郑州师范学院教授, 博士。E-mail: wgxia191919@163.com

收稿日期: 2024-08-24 **改回日期:** 2025-03-21

引用格式: 王国霞, 李春阁, 武思, 等. 3D 打印技术在保健食物加工应用中的研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 236-243.

Citation: WANG Guoxia, LI Chungu, WU Si, et al. Research progress of 3D printing technology in health food processing[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 236-243.

养设计^[10-11]。文章拟在整理近10年相关文献的基础上,概述常见的3D食品打印技术,系统总结3D食品打印技术在药食两用物质加工领域中的应用,并对提高3D食品打印特性的方法和未来发展中所面临的挑战和机遇进行展望,旨在为3D打印与中医药领域中药食两用物质的结合和绿色、优质功能食品的生产提供依据。

1 3D食品打印技术

3D打印食品油墨的特性影响3D打印食品产业的发展,由于食品安全的制约,适用于食品3D打印技术的油墨十分有限,且材料不同所要求的技术不同^[12]。目前,常用于食品领域的3D食品打印技术主要有热熔沉积技术(fused deposition modelling, FDM)、黏合剂喷射成型技术(binder jetting, BJ)、选择性烧结技术(selective laser sintering, SLS)和喷墨打印技术(ink-jet printing, IJP)。

1.1 热熔沉积技术

热熔沉积技术建立于1930年早期,是进料、加热、混合、成型组合而成的多个连续过程^[13]。其原理是从喷嘴挤出的半固态热塑性材料沉积在打印台上(见图1)。热熔挤出含有加热部件,打印墨水到达喷嘴时先被加热到熔点以上,再通过挤压固形并与上一层的截面进行粘连^[14]。为了使油墨保持一种熔融状态,能够成功地从打印喷嘴挤出,需要根据材料的特性来设置合适的温度。早期,常用热熔沉积技术来进行塑料和橡胶产品的生产,此外,由于热熔沉积技术的灵活性较大,还适用于日益增长的个性化药品需要^[15]。近年来,热熔沉积技术被用于巧克力、泥浆、奶酪和面团的生产^[16],其特点主要为占地面积小、维修成本较低、制作时间长、温度波动较大难以控温。

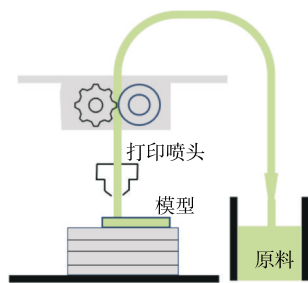


图1 热熔沉积型打印技术示意图

Figure 1 Fused deposition modelling printing technology

1.2 选择性烧结技术

选择性烧结技术的原理是粉末平铺于平台上后,烧结源跟随横纵坐标的方向进行移动,将粉末颗粒熔化成固体层(见图2)^[17]。按照烧结源的差异可分为选择性热风烧结技术和选择性激光烧结技术。选择性热风烧结技术又称空气熔融烧结技术,是以热风作为热源,常用的气体为氮气或热空气;选择性激光烧结技术是以激光作为

热源,激光温度较高,对材料的融化程度影响显著。选择性烧结技术影响3D打印食品精密度的因素主要有材料性能(粒径大小、熔化温度、流动性)、加工因素(烧结源、功率、厚度)和后处理等。早期,选择性烧结技术主要应用于烧结金属、陶瓷和聚合物等^[18],目前该技术在食品上的应用主要是打印糖类或富含糖粉末的油墨。选择性烧结技术的特点是用时短、不需要进行后处理,但只能用于粉末的打印油墨,且要求低熔点打印油墨,此外,选择性烧结打印机制作较麻烦。

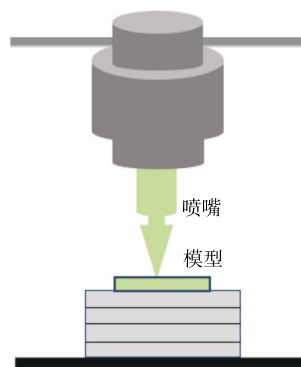


图2 选择性烧结型打印技术示意图

Figure 2 Selective laser sintering printing technology

1.3 黏合剂喷射成型技术

黏合剂喷射成型技术需要借助一种液体黏合剂才能够完成三维物体的加工成型,黏合剂小液滴的直径一般 $<100\ \mu\text{m}$ 。它是将粉末材料平铺在平台上,喷嘴根据该层的截面形状有选择地喷出一层黏合剂,经过一段时间待该薄层粉发生固化后再铺上同厚度的粉末,然后根据已有的截面形状喷出黏合剂,以此往复即可得到一个三维立体形状的物品(见图3)^[19]。黏合剂喷射成型技术主要用于粉状材料,其优势在于速度快、成本低、可以制作结构比较复杂的产品。其劣势在于材料有限、成品表面不光滑、仪器成本较高。且在制作过程中,未黏合的粉末作为一种支撑部件,支撑着黏合体,在打印结束后这些未黏合的粉末还能被移除并回收。Holland等^[20]研究表明,纤维素和葡甘露聚糖粉末通过黏合剂喷射技术成功地设计出复杂的方形和星星状模型。

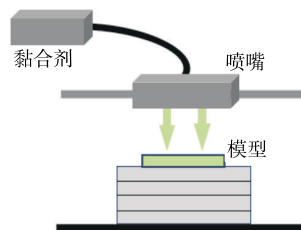


图3 黏合剂喷射成型技术示意图

Figure 3 Binder jetting technology

1.4 喷墨打印技术

喷墨打印技术作为 3D 食品打印技术中最常用的方法之一,主要是利用外力推动物料,通过精密的打印喷头按照预先设计的模型和模型纹路对油墨进行打印(见图 4)。该打印技术要求低黏度的打印油墨,如巧克力、液体面团、果酱、肉酱和凝胶等^[21],其优点是速度快、不需要后处理、产品形状独特,缺点是稳定性较差、只适用于平面打印。

喷墨打印技术按物料特性分为通过加热再凝固成型和通过高剪切力降低黏度,低剪切力恢复黏度两种^[22]。挤出型 3D 食品打印技术为喷墨打印技术中最实用的一种,根据进料模式的差异可以分为活塞挤压型、螺杆挤出型和气压挤出型。活塞挤出型是利用电动机推动活塞直接向下挤出物料进行打印;螺杆挤出型是利用电动机先带动搅拌器的运动使物料搅碎后再通过螺杆的螺旋运动向下挤出物料进行打印;气压挤出型和活塞挤出型的区别在于活塞挤出型是利用电动机对物料进行助推,气压挤出型是利用压力泵对物料进行助推^[23]。

2 3D 打印技术在药食两用物质中的应用

3D 打印食品可用于开发即食性产品和即食加工型产品,它可以将多个步骤结合为一个步骤,此外还可以根据消费者的个体特征,实现全面、营养均衡的定制性食品。目前,具有保健作用的食物因兼具食用和药用价值两种

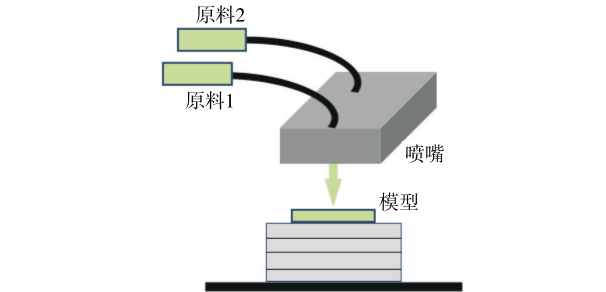


图 4 喷墨型打印技术示意图
Figure 4 Ink-jet printing technology

优势而备受关注。将 3D 打印技术与保健食品进行结合,主要从两个角度出发:① 作为辅料添加到淀粉、多糖或其他主料中进行混合使用;② 将其作为主料增加 3D 打印产品的营养价值(见表 1)。但有关 3D 打印技术的研究多集中于打印油墨的研发,有关打印产品的研究还处于初步发展阶段,3D 打印技术成功与否与原料的特性有极大关联性,其营养价值多体现在 3D 打印产品中。因此,文章重在原料特性和多方面的应用进行阐述。

2.1 3D 打印技术在植物类保健食品中的应用

3D 打印技术在植物类保健食品中的应用主要集中于谷物类、果蔬类和鲜花类等,这些物质多为含有花青素等生物活性物质,作为辅料添加到其他物质中进行打印能

表 1 3D 打印技术在保健食品中的应用
Table 1 Application of 3D printing technology in health food

分类	原料	结论	文献
植物	铁皮石斛、淀粉	铁皮石斛能够改善淀粉凝胶的打印性能	[24]
	纤维素纳米纤维、蓝莓花青素	通过同轴 3D 打印生产的由纤维素纳米纤维、蓝莓花青素、壳聚糖和 1-甲基环丙烯混合而成的核壳结构基质能将荔枝新鲜度延长 6 d	[25]
	小麦粉、冻干芒果粉、橄榄油、水	$m_{\text{面粉}}:m_{\text{水}}:m_{\text{橄榄油}}:m_{\text{冻干芒果粉}}$ 为 57.5:30.0:3.0:2.5 时,打印食品成型、口味最佳,能得到芒果味的 3D 打印食品	[26]
	小麦淀粉、橙子	成功打印了富含维生素 D 的浓缩橙汁小麦淀粉共混物	[27]
	柠檬汁、淀粉	3D 打印的柠檬汁—淀粉凝胶产品经微波处理后,可以创造出丰富多彩且吸引人的食物结构	[28]
	紫甘薯	用紫甘薯印刷出“花”和“蝴蝶”等精美模型	[29]
动物	小麦粉、鸡肉	用小麦粉作添加剂时,可以改善其打印性能	[30]
	淀粉、牛肉	用淀粉作添加剂可以使牛肉实现精准的 3D 打印,并能提高产品的蒸煮得率	[31]
	马铃薯淀粉、玉米淀粉、木薯淀粉、交联淀粉、白虾鱼糜	6% 交联淀粉能有效改善虾糜的材料性能,使其适合 3D 打印	[32]
	猪油、大豆油、橄榄油、虾鱼糜	4% 的猪油能使虾鱼糜呈现最佳的 3D 打印适应性;4% 的大豆油更符合当代人的营养需求	[33]
	蛋清、豌豆蛋白、结冷胶	将蛋清、豌豆蛋白和结冷胶进行组合后,成功打印出适合吞咽困难人群食用的人造牛排	[34]
	微生物 乳酸菌	3D 生物打印乳酸菌复配水凝胶能为不同微生物的共培养提供合适的生长环境	[35]
	乳酸菌、水蜜桃浆、马铃薯粉、黄原胶等	随着发酵时间的延长,4D 打印凝胶体系的乳酸菌数量大量增长、霉菌生长受到抑制	[36]

够满足产品营养上的需求。火龙果中富含甜菜红素和花青素,长期摄入可以有效预防癌症、心脑血管等疾病。黄其林等^[37]以脱皮全麦粉为原料,探究了不同比例火龙果粉对脱皮全麦粉3D打印成型效果的影响,当火龙果粉添加量为15%时,成型效果最优,网络结构较为紧密。玫瑰作为一种药食同源植物,含有重要的生物活性物质花青素,已被广泛应用于食品工业中。邱丽青^[38]以苹果粉为打印原料,探究了超微玫瑰粉对苹果粉混合凝胶3D打印特性的可行性。结果表明,超微玫瑰粉可以提高苹果粉混合凝胶的机械强度,有利于3D打印模型的自支撑性能。此外,利用绿豆分离蛋白及杏皮果胶为壁材,玫瑰花青素提取物及玫瑰香精为芯材制备复合凝聚双乳液微胶囊,并将该微胶囊添加到藜麦混合凝胶中,通过红外—微波联合加热作为刺激源,实现了红外—微波联合加热诱导的变色、变风味的食品4D打印。Guo等^[39]以微波加热作为刺激,明胶—阿拉伯油复合物凝聚微胶囊为刺激—响应材料,实现了含有黄肉桃的3D打印荞麦面团颜色和香气变化的可行性。综上,花青素含量丰富的果蔬类和鲜花类物质与3D打印技术结合,不仅拓宽了产品种类,也能够丰富其营养。3D打印技术虽然对原料特性要求较高,但对原料应用范围较广,在外源刺激的基础上,将3D打印技术与微胶囊技术进行结合,能够呈现出可预期的自发性色泽、风味和营养上的变化,这也可以满足消费者对食品动态外观和结构变化的需求,丰富用餐体验并提高饮食乐趣。

2.2 3D打印技术在动物类保健食品中的应用

肉类食物的保健作用多是增强气血、增强视力等,但这些食物在慢性疾病中也存在一些隐患,如心血管疾病、肥胖症和心脏病,由于消费者对健康饮食的不断认识,细胞培养肉和植物性替代品越来越受到关注,作为一种可以设计高能量食品材料,肉类乳液可能会成为未来摄入蛋白质和脂肪的主要来源,而3D食品打印技术是一种可以加工可食用肉类乳液的方法。Kim等^[40]在鱼糜的外表面涂膜一层马铃薯溶液,成功打印出与商业产品相似的基于鱼糜的仿蟹肉。Wang等^[41]将豌豆分离蛋白和鸡糜作为主要植物蛋白和肉类的来源,成功3D打印出有纹理的软质人造肉制品。Cheng-Rong等^[42]通过对蛋清、豌豆蛋白和结冷胶进行优化组合,成功3D打印出适合吞咽困难患者的人造牛排。Ben-Arye等^[43]以大豆蛋白为3D支架,模仿细胞外基质创建了牛肌肉组织,复制出了肉的口感和质地。可食用昆虫蛋白是一种新的食品工业蛋白质来源,可用其开发出多种适合老年人食用的3D打印新型食品^[44]。3D打印技术在动物类保健食品中的研究多集中于肉糜,植物替代品的研究集中于大豆蛋白,有关昆虫蛋白的研究较少。3D生物打印技术有望解决当前动物类保健食品的诸多问题,为人类提供可持续的肉类替代品,但是动物类保健食品3D打印技术的发展仍处于初步探

索阶段,在今后需要深入研究动物的肌肉组织结构,以期打印出更符合真实肉类口感、质感和营养的“人造肉”产品。

2.3 3D打印技术在微生物类保健食品中的应用

益生菌作为一种提高机体健康的活性微生物,具有调节肠道菌群、促进消化吸收、增强抗氧化能力等多种作用。目前,3D打印技术中常见的微生物有植物乳杆菌、动物双歧杆菌和乳酸菌。Zhang等^[45]研究了植物乳杆菌在基于小麦的3D打印结构中的存活率,发现3D打印有助于改变食品的微观结构,提高益生菌的存活率。这主要是由于所打印的产品形态为益生菌的生存提供了一个有利的环境。3D打印过程中的一些变量参数也会影响益生菌的活性,如喷嘴直径和打印温度等。Liu等^[46]在对含有动物乳杆菌的土豆泥进行打印时,发现使用小的喷嘴直径(0.6 mm)可使益生菌活力从9.93 lg(CFU/g)降至9.74 lg(CFU/g)。Tripathi等^[47]研究表明,在3D打印过程中,当打印温度高于45℃时,益生菌的生存率与打印温度呈负相关,这主要是因为较高的温度会对益生菌的细胞造成损害,从而影响其功能活性和生存能力。微胶囊是一种将生物活性胶囊封装在密封微胶囊中,并在特定条件下以可控速率释放的技术。这些微胶囊可保护益生菌免受不利环境条件的影响,促进黏附和更长地停留在体内的时间^[48]。Rosas-Val等^[49]开发了一种基于3D打印技术的微胶囊化益生菌配方,可通过口服递送以确保在大肠中递送特定剂量的活菌,从而达到预期的生物学效果。综上,3D打印技术在微生物类保健食品中的应用主要表现为封装益生菌微生物和维持其在整个胃肠道的生存能力,该技术为开发个性化功能产品提供了巨大的技术支持。但在开发新产品时有必要拓宽所研究的菌株数量、优化加工工艺,以便微生物类保健食品在从原料到消费者手中时,能够确保所有阶段都能有效地封装和保存微生物活力。此外,在开发新配方时,可以通过增加组合以改善产品的营养、质地和感官特性。

3 改善保健食品3D打印食品特性的方法

目前,大多数学者主要集中于对保健食品原料和配方的研究,有关原料处理的研究较少,然而对原料进行适当处理是实现成功打印的关键。如一些天然淀粉由于自身具有易老化、不稳定等劣势无法在3D打印技术中应用,但通过一定处理后能够提高其黏度和固化能力。因此,为了获得理想的3D打印油墨,需对其进行一定的处理,目前,物理改性、化学改性、生物改性和添加剂改性是常用的改性方法^[50]。

3.1 物理改性

物理改性是指采用热学、力学、光学、电学等技术手段来改变物料的结构形态、物化性质,从而能够改变其功能特性。目前实验室中常用的微波改性、超声波改性、湿

热处理(heat moisture treatment, HMT)、干热处理(dry heat treatment, DHT)、挤压膨化技术和蒸制等属于热加工处理,脉冲电场(pulsed electric fields, PEF)、射频电磁波(radio frequency electromagnetic wave, RF)、激光处理和等离子体处理属于非热加工处理^[51]。微波改性被认为是一种省时高效、绿色环保的加工技术,具有波长短、频率高等特征;超声波改性可以根据所设置的参数来影响淀粉的糊化性能和热稳定性,进而能够影响其结构特性和功能特性;挤压膨化技术是通过挤压温度、螺杆转速和物料水分对原料产生影响;湿热处理和干热处理的区别在于水分含量的不同,干热处理对环境无污染,节约水资源,原料经干热处理后会使得 3D 打印产品具有良好的外观形态。Liu 等^[52]研究发现,蒸煮前将糯米粉和水以质量比 9:100 混合,会获得质量更好、精密度更高的大米面团 3D 打印产品。Maniglia 等^[53]在 130 °C 下对小麦淀粉进行干热处理 4 h,发现小麦淀粉的颗粒变大、结晶度下降,经过处理的淀粉凝胶体系比未处理的淀粉凝胶体系的峰值黏度低、结构强度高和抗压能力强,在进行 3D 打印过程中表现出更流畅的挤压能力、更高的打印精度和更好的稳定性。脉冲电场处理也会对 3D 打印效果产生影响,它作为一种非热加工处理技术,对淀粉的改性具有积极作用^[54]。此外,Ma 等^[55]利用射频电磁波技术处理马铃薯淀粉,发现马铃薯淀粉的直链淀粉含量、峰值黏度和糊化温度均降低,使物料在挤出时的凝胶强度提高,从而改善了 3D 打印样品的稳定性和准确度。因此,原料在进行物理改性后,黏度降低、凝胶强度增大,使其 3D 打印产品呈现出较好的外观形态。

3.2 化学改性

化学改性的原理是通过改性引入新的官能团,使原淀粉变为改性淀粉。常用的化学改性方法有酯化改性、醚化改性、氧化改性和酸水解等。酯化改性是将淀粉中含有的羟基基团与酯化剂发生酯化反应,常用的酯化剂有有机酸类酯化剂和无机酸类酯化剂;直接醚化操作简单,产物复杂;间接醚化具有强靶向性和高产率的特点。氧化改性是通过氧化剂将羟基氧化成醛基,醛基再进一步氧化成羧基^[56]。臭氧氧化作为一种新型的化学改性技术,能够破坏直链淀粉和支链淀粉分子中的糖苷键。臭氧能够快速地被分解成氧气,无化学残留和食品安全等问题,逐渐受到食品行业的青睐。Qiu 等^[57]研究发现,当臭氧质量分数从 11% 增加到 19% 时,臭氧处理的玉米淀粉在 3D 打印过程中展现出较好的水化性能,臭氧质量分数 13% 为玉米淀粉热挤压 3D 打印的最佳参数。Maniglia 等^[58]研究发现,臭氧质量浓度为 43 mg/L、处理时间为 30 min 时,3D 打印的木薯淀粉具有较好的稳定性和印刷性能。不同淀粉原料所含的直链淀粉含量不同、黏度不同,具体选用不同的臭氧浓度或不同的臭氧时间对打印原料特性的影响需进一步研究,但总体来说,经臭氧处理

后的原料在进行 3D 打印时,均表现出较好的打印制品。

3.3 生物改性

生物法改性是通过形成新的糖苷键来改变 3D 打印油墨的结构和大小,此外,也有通过微生物发酵技术来改善淀粉的打印性能。Raja 等^[59]通过研究发现,小米粉浓度影响黑绿豆和大米混合面糊的剪切稀化特性,当小米粉添加量为 20% 时,3D 打印产品印刷性能最好。Papak 等^[60]用 4- α -葡聚糖转移酶处理水稻淀粉发现,随着酶处理时间的增加,链长分布增加,淀粉的黏度降低,进而在进行 3D 打印时会影响其打印性能。此外,燕麦淀粉在组合酶(β -淀粉酶和反式葡萄糖苷酶)处理时也表现出满足 3D 打印需求的性能。目前,有关生物改性在 3D 打印食品领域的研究较少,多集中于发酵领域,但生物改性已被广泛应用于食品工业中,酶的参与能够降低原料的黏度,间接对 3D 打印制品产生影响,因此,后续可分析其在 3D 食品打印中的应用。

3.4 添加剂改性

与化学改性、物理改性和生物改性相比,添加剂改性的方法更容易被大众所接受^[61]。常用的添加剂主要包括多糖、蛋白质、脂肪、淀粉和酚类等。

作为生物活性物质之一的多糖,能够改变淀粉的消化性能,且多糖的存在还能够增加淀粉的储能模量,改变淀粉的机械性能,使淀粉的网络结构变得更加紧密,进而可以维持打印产品的形状。Chen 等^[62]研究指出,多糖可以提高食品印刷材料的营养价值和流变学特性。当蛋白质分子的直径与胶体微粒的大小相同时,蛋白质物质表现为胶体的性质,对打印基材的流变学特性、热稳定性和营养特性也会产生一定的影响。脂类物质主要影响食品的质地、风味和口感,可以提高产品的润滑度和坚硬度^[63]。将脂肪与淀粉结合可以改善淀粉结构和淀粉糊的流动性,进而对 3D 打印的印刷性能产生一定影响。酚类化合物具有抗氧化、预防肥胖、降血糖、赋予食品营养等功能,也能对淀粉油墨的打印性产生影响,已被广泛应用于 3D 打印食品领域。

4 挑战与展望

目前,3D 食品打印技术处于发展阶段,有关保健食品的开发应用、产品的经济效益、消费者可接受度、成品评价标准和食品安全等方面仍面临严峻的挑战。首先,保健食品本身的物料特性是关键性问题,它可以直接决定成品是否可以被顺利挤出成型,当前应用于 3D 打印的保健食品有果蔬类、鲜花类等,这些原料在打印的同时无法涵盖所有的食品类别,因此迫切需要开发出更多适用于 3D 打印的保健食品种类。其次,保健食品的质量和打印参数的一一对应相当重要。高精度的 3D 打印技术要求对打印参数进行精准调控,如温度、速度、挤出流量或喷嘴直径等。此外,部分单一的保健食品可能无法进行打

印,如今多作为辅料与谷物基原料、多糖、淀粉组成混合凝胶进行3D打印,该过程中可能会涉及多种材料和化学物质的引入,这些材料的添加可能会引发消费者对食品安全及健康方面的思考,因此,在确保打印过程中不引入任何化学残留物或病原微生物,保证食品成分质量和安全性的严格控制至关重要。再次,由于可使用的保健食品种类的限制和打印设备自身压力作用的影响,3D打印产品的质量有时会优于传统食品,有时会与传统产品的风味产生差异,这些情况也会影响消费者对3D打印食品的可接受度,因此,如何将这些差异缩减也是后续面临的问题之一。最后,从商业角度出发,保健食品的成本和可扩展性也会制约3D打印保健食品的发展,作为既高端又专业的3D打印设备,因其设备成本较高,无法进行大规模的生产。

随着被列入药食两用品目录食物的逐渐增多,具有食用价值和药用功效的药食两用物质被越来越多地应用至保健食品行业中,为全面推进健康中国战略提供了有力支撑,同时也为新型食品研发带来了新的机遇。3D食品打印技术因兼具个性化定制、营养均衡和绿色生产等优势,能为创新型食品研发提供新思路。因而,将保健食品和3D打印技术进行结合,将会改变传统食品的生产 and 消费模式,有助于开发出更多的具有特定功能的新型健康食品。随着技术的不断进步,3D食品打印技术必将从单调的加工模式向复杂的食品加工制造模式转变。首先,需要对3D打印设备进行升级改造,在保证3D打印产品精度的同时,提高3D打印的速度,改善效率,降低成本。其次,可通过宣传、体验和教育等形式,提高消费者对3D打印食品的可接受度。另外,未来需要研究更多适用于3D食品打印技术的保健食品原料,通过丰富保健食品的来源、调整产品的外观、口味和质地,来满足当代的多元化理念,尽可能地让每一位消费者吃到自己的专属产品。最后,有关3D打印保健食品的评价标准也有待研究,未来需要相关监管部门制定严格的食品安全标准,来提高3D打印保健食品在公众的可接受度。

综上,从保健食品原料的开发、3D打印技术设备、经济效益和3D打印保健食品安全等方面作进一步的突破,相信在未来,3D食品打印技术有望为人类开辟一条通往3D保健食品的崭新道路,为人类的营养健康饮食带来实质性的进步。

参考文献

- [1] 黎颖菁, 尚小红, 龙紫媛, 等. 广西药食同源植物种类分布、利用现状与展望[J]. 中国热带农业, 2022(1): 32-38.
- LI Y J, SHANG X H, LONG Z Y, et al. Species distribution, utilization status and prospects of medicinal and edible plants in Guangxi[J]. China Tropical Agriculture, 2022(1): 32-38.
- [2] 黄璐琦, 何春年, 马培, 等. 我国药食两用物品产业发展战略

- 思考[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 81-87.
- HUANG L Q, HE C N, MA P, et al. Strategic thinking on the development of food-medicine industry[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 81-87.
- [3] MANOJ A, PANDA R C. Biodegradable filament for 3D printing process: a review[J]. Engineered Science, 2022, 18: 11-19.
- [4] NAVA F M, SUNO O J K V, AALIYA B, et al. 4D printing: a new approach for food printing; effect of various stimuli on 4D printed food properties. A comprehensive review[J]. Applied Food Research, 2022, 2(2): 100150.
- [5] MATAS A, IGUAL M, GARCÍA-SEGOVIA P, et al. Application of 3D printing in the design of functional gluten-free dough[J]. Foods, 2022, 11(11): 1555.
- [6] 张志超, 陈旭, 汪少芸, 等. 氯化钠对鲢鱼糜体系3D打印性能及凝胶特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 1-6, 46.
- ZHANG Z C, CHEN X, WANG S Y, et al. Effect of sodium chloride on 3D printing performance and gel properties of silver carp surimi system[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 1-6, 46.
- [7] 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.
- [8] YOU S Q, HUANG Q R, LU X X. Development of fat-reduced 3D printed chocolate by substituting cocoa butter with water-in-oil emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108114.
- [9] BURKE-SHYNE S, GALLEGOS D, WILLIAMS T. 3D food printing: nutrition opportunities and challenges[J]. British Food Journal, 2020, 123(2): 649-663.
- [10] HAMILTON A N, MIRMAHDI R S, UBEYITOGULLARI A, et al. From bytes to bites: advancing the food industry with three-dimensional food printing[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13293.
- [11] RAJA V, NIMBKAR S, MOSES J A, et al. Modeling and simulation of 3D food printing systems: scope, advances, and challenges[J]. Foods, 2023, 12(18): 3412.
- [12] 董茗洋, 陈革, 杨庆余. 不同胶体对马铃薯淀粉基材料3D打印特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 44-52.
- DONG M Y, CHEN G, YANG Q Y. Effect of different colloids on 3D printing properties of potato starch-based materials[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(1): 44-52.
- [13] 徐光辉, 何冬婷, 袁毅亦, 等. 基于3D打印技术制备复方丹参缓释制剂的研究[J]. 今日药学, 2022, 32(2): 117-119.
- XU G H, HE D T, YUAN Y Y, et al. Study on preparation of compound salvia miltiorrhiza sustained and controlled release preparation based on 3D printing technology[J]. Pharmacy Today, 2022, 32(2): 117-119.
- [14] KARAVASILIS C, GKARAGKOUNIS A, MOSCHAKIS T, et al. Pediatric-friendly chocolate-based dosage forms for the oral administration of both hydrophilic and lipophilic drugs fabricated with extrusion-based 3D printing[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2020, 147: 105291.

- [15] 余红燕, 徐光辉, 贾暖. 3D 打印技术在口服固体制剂中的应用研究进展[J]. 中国现代应用药学, 2021, 38(16): 2 033-2 038.
- YU H Y, XU G H, JIA N. Research progress of 3D printing technology in oral solid preparations[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2021, 38(16): 2 033-2 038.
- [16] PRABHA K, GHOSH P, ABDULLAH S, et al. Recent development, challenges, and prospects of extrusion technology[J]. Future Foods, 2021, 3: 100019.
- [17] AWAD A, FINA F, GOYANES A, et al. 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2020, 586: 119594.
- [18] RUGGI D, LUPO M, SOFIA D, et al. Flow properties of polymeric powders for selective laser sintering[J]. Powder Technology, 2020, 370: 288-297.
- [19] LE-BAIL A, MANIGLIA B C, LE-BAIL P. Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing[J]. Current Opinion in Food Science, 2020, 35: 54-64.
- [20] HOLLAND S, TUCK C, FOSTER T. Selective recrystallization of cellulose composite powders and microstructure creation through 3D binder jetting[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 200: 229-238.
- [21] 夏国峰, 欧升阳, 周忠元, 等. 基于马铃薯淀粉和马铃薯泥的食品 3D 打印技术研究与发展[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 181-189.
- XIA G F, OU S Y, ZHOU Z Y, et al. Research and development of food 3D printing based on potato starch and potato puree[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 181-189.
- [22] RANDO P, RAMAIOLI M. Food 3D printing: effect of heat transfer on print stability of chocolate[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 294: 110415.
- [23] 石松业, 温纪平, 耿浩, 等. 基于淀粉原料的 3D 打印技术及其应用[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(12): 353-361.
- SHI S Y, WEN J P, GENG H, et al. Application of 3D printing technology in foods based on starch[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(12): 353-361.
- [24] 冯思敏, 王晶, 谢晨曦, 等. 铁皮石斛复合凝胶 CFD 数值模拟与个性化 3D 打印性能预测[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 165-176.
- FENG S M, WANG J, XIE C X, et al. Prediction of CFD numerical simulation and personalized 3D printing performance of *Dendrobium officinale* composite gel[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 165-176.
- [25] ZHOU W, WU Z G, XIE F W, et al. 3D printed nanocellulose-based label for fruit freshness keeping and visual monitoring [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 273: 118545.
- [26] LIU Y W, LIANG X, SAEED A, et al. Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 54: 9-18.
- [27] AZAM R S M, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Effect of different gums on features of 3D printed object based on vitamin-D enriched orange concentrate[J]. Food Biophysics, 2018, 13(3): 250-262.
- [28] ZHU Y L, LIU Z B, ZHANG X F, et al. Microwave-triggered 4D automatic color change in 3D-printed food materials incorporating natural pigments[J]. Foods, 2023, 12(10): 2 055.
- [29] HE C, ZHANG M, DEVAHASTIN S. Investigation on spontaneous shape change of 4D printed starch-based purees from purple sweet potatoes as induced by microwave dehydration[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12 (34): 37 896-37 905.
- [30] WILSON A, ANUKIRUTHIKA T, MOSES J A, et al. Customized shapes for chicken meat - based products: feasibility study on 3D-printed nuggets[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(11): 1 968-1 983.
- [31] CHEN Y H, MCCLEMENTS D J, PENG X W, et al. Starch as edible ink in 3D printing for food applications: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(2): 456-471.
- [32] PAN Y M, SUN Q X, LIU Y, et al. The relationship between rheological and textural properties of shrimp surimi adding starch and 3D printability based on principal component analysis[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(6): 2 985-2 999.
- [33] PAN Y, SUN Q, LIU Y, et al. Investigation on 3D printing of shrimp surimi adding three edible oils [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2024, 13(3): 429.
- [34] CHENG-RONG T, YUNG-KAI L. Artificial steak: a 3D printable hydrogel composed of egg albumen, pea protein, gellan gum, sodium alginate and rice mill by-products[J]. Future Foods, 2022, 5: 100121.
- [35] 刘毅飞. 3D 打印乳酸菌水凝胶制备及应用特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022: 77-78.
- LIU Y F. Study on preparation and application characteristics of 3D printed lactic acid bacteria hydrogel[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022: 77-78.
- [36] 王岩, 牛犇, 王冠楠, 等. 乳酸菌发酵诱导水蜜桃浆凝胶体系自发变色的 4D 打印研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(8): 143-150.
- WANG Y, NIU B, WANG G N, et al. Spontaneous color change in peach pulp gel system for 4D printing induced by lactic acid bacteria fermentation study[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(8): 143-150.
- [37] 黄齐林, 温纪平. 火龙果粉对全麦粉凝胶 3D 打印特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(11): 111-116.
- HUANG Q L, WEN J P. Effect of pitaya powder on 3D printing properties of whole wheat flour gel[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(11): 111-116.
- [38] 邱丽青. 玫瑰残次花高值化加工及其在 3D/4D 打印中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024: 123-125.
- QIU L Q. Research on the value-added processing of defective

- rose flowers and their applications in 3D/4D printing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024: 123-125.
- [39] GUO C F, ZHANG M, DEVAHASTIN S. Color/aroma changes of 3D-Printed buckwheat dough with yellow flesh peach as triggered by microwave heating of gelatin-gum Arabic complex coacervates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106358.
- [40] KIM S M, KIM H W, PARK H J. Preparation and characterization of surimi-based imitation crab meat using coaxial extrusion three-dimensional food printing[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 71: 102711.
- [41] WANG T X, KAUR L, FURUHATA Y, et al. 3D printing of textured soft hybrid meat analogues[J]. *Foods*, 2022, 11 (3): 478.
- [42] CHENG-RONG T, YUNG-KAI L. Artificial steak: a 3D printable hydrogel composed of egg albumen, pea protein, gellan gum, sodium alginate and rice mill by-products[J]. *Future Foods*, 2022, 5: 100121.
- [43] BEN-ARYE T, SHANDALOV Y, BEN-SHAUL S, et al. Textured soy protein scaffolds enable the generation of three-dimensional bovine skeletal muscle tissue for cell-based meat [J]. *Nature Food*, 2020, 1: 210-220.
- [44] 童强, 姜宇, 佟焱, 等. 食品 3D 打印中的食品材料特性与应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2023, 39(7): 1-5, 19.
- TONG Q, JIANG Y, TONG Y, et al. Research on the characteristics and application of food materials in food 3D printing[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(7): 1-5, 19.
- [45] ZHANG L, LOU Y M, SCHUTYSER M A I. 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics[J]. *Food Structure*, 2018, 18: 14-22.
- [46] LIU Z B, BHANDARI B, ZHANG M. Incorporation of probiotics (*Bifidobacterium animalis* subsp. *Lactis*) into 3D printed mashed potatoes: effects of variables on the viability [J]. *Food Research International*, 2020, 128: 108795.
- [47] TRIPATHI M K, GIRI S K. Probiotic functional foods: survival of probiotics during processing and storage[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 9: 225-241.
- [48] CENTURION F, MERHEBI S, BAHARFAR M, et al. Cell-mediated biointerfacial phenolic assembly for probiotic nano encapsulation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32 (26): 2200775.
- [49] ROSAS-VAL P, ADHAMI M, BROTONS-CANTO A, et al. 3D printing of microencapsulated *Lactobacillus rhamnosus* for oral delivery[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2023, 641: 123058.
- [50] ASHOGBON A O. Dual modification of various starches: synthesis, properties and applications[J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128325.
- [51] WANG R Y, LI Z H, SHI J Y, et al. Color 3D printing of pulped yam utilizing a natural pH sensitive pigment[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 46: 102062.
- [52] LIU Y T, TANG T T, DUAN S Q, et al. Applicability of rice doughs as promising food materials in extrusion-based 3D printing[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(3): 548-563.
- [53] MANIGLIA B C, LIMA D C, DA MATTA M J, et al. Dry heating treatment: a potential tool to improve the wheat starch properties for 3D food printing application[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109731.
- [54] MANIGLIA B C, PATARO G, FERRARI G, et al. Pulsed electric fields (PEF) treatment to enhance starch 3D printing application: effect on structure, properties, and functionality of wheat and cassava starches[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68: 102602.
- [55] MA S, LIU J B, ZHANG Q R, et al. 3D printing performance using radio frequency electromagnetic wave modified potato starch[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 80: 103064.
- [56] 范颖, 徐同成, 宗爱珍, 等. 大豆多糖的化学改性及其应用研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(6): 1-5.
- FAN Y, XU T C, ZONG A Z, et al. Research progress on chemical modification and application of soybean polysaccharides[J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(6): 1-5.
- [57] QIU Z P, ZHENG B, XU J C, et al. 3D-printing of oxidized starch-based hydrogels with superior hydration properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 292: 119686.
- [58] MANIGLIA B C, LIMA D C, MATTA M D J, et al. Hydrogels based on ozonated cassava starch: effect of ozone processing and gelatinization conditions on enhancing 3D-printing applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 138: 1 087-1 097.
- [59] RAJA V, MOSES J A, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Effect of 3D printing conditions and post-printing fermentation on pearl millet fortified idli[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(5): 2 401-2 412.
- [60] PARK H R, KANG J, RHO S J, et al. Structural and physicochemical properties of enzymatically modified rice starch as influenced by the degree of enzyme treatment[J]. *Journal of Carbohydrate Chemistry*, 2020, 39(5/6): 250-266.
- [61] RONG L Y, SHEN M Y, WEN H L, et al. Effects of xanthan, guar and *Mesona chinensis* Benth gums on the pasting, rheological, texture properties and microstructure of pea starch gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 125: 107391.
- [62] CHEN Y Y, ZHANG M, SUN Y N, et al. Improving 3D/4D printing characteristics of natural food gels by novel additives: a review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 123: 107160.
- [63] FENG C Y, ZHANG M, BHANDARI B. Materials properties of printable edible inks and printing parameters optimization during 3D printing: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(19): 3 074-3 081.