

食品 3D 打印中的食品材料特性与应用研究进展

Research on the characteristics and application of food materials in food 3D printing

童 强¹ 姜 宇¹ 佟 垚¹ 蒙玉祥¹ 董秀萍²

TONG Qiang¹ JIANG Yu¹ TONG Yao¹ MENG Yu-xiang¹ DONG Xiu-ping²

(1. 大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 大连 116034; 2. 大连工业大学食品学院, 辽宁 大连 116034)

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China; 2. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

摘要:食品材料是食品 3D 打印的关键因素。文章总结了目前在食品 3D 打印中常用食品材料(蛋白质、淀粉、水凝胶、脂肪)的特点,分析了不同材料组合对成形性能的影响,对不易打印材料如何提高印刷效果给予了一定的建议,指出了目前食品 3D 打印中食品材料发展面临的技术瓶颈,并对未来食品 3D 打印技术的发展趋势进行了展望。

关键词:食品材料;3D 打印;材料特性;食品加工

Abstract: Food material is the key factor of food 3D printing. This review summarized the characteristics of food materials (protein, starch, hydrogel and fat) commonly used in food 3D printing at present, analyzed the influence of different material combinations on the forming performance. Moreover, suggestions on how to improve the printing effect of difficult printing materials were also provided, and the technical bottleneck of food materials development faced in food 3D printing nowadays were noticed. Finally, the direction of food 3D printing technology in the future was prospected.

Keywords: food materials; 3D printing; material characteristics; food processing

食品 3D 打印是一种将三维建模、机电控制、食品科学等诸多跨学科知识融于一体而形成的新型高科技应用技术^[1]。针对不同的个体或人群,食品 3D 打印技术不仅

可以实现对营养的精准控制,还可以个性化定制营养餐食^[2]。目前,利用 3D 打印技术已经成功生产出了多种类型的食品,如巧克力、蛋糕、糖果和人工肉类等^[3]。与传统的食品材料和制造方法相比,食品 3D 打印具有低成本、操作简单、快速成型等优点,可以实时生产具有成本效益的定制食品^[4]。目前,主要的食品 3D 打印方式有 3 种:粉体凝结型食品 3D 打印、挤出型食品 3D 打印和喷墨打印^[5]。

对于食品 3D 打印,打印参数是影响打印质量的主要因素之一。Cai 等^[6]在研究开发含油量高达 20% 的卡仕达酱的试验中发现,打印速度和挤出率是打印过程中材料沉积和提高形状保真度的关键参数。不同的食品材料具有不同的性能,如流动性、耐咀嚼性、弹性等,这些都是影响打印参数的因子,因此不同的材料要选择合适的打印参数^[4]。

此外食品原料的主要成分及其性质也是决定食品 3D 打印技术成功的关键^[7],目前常用于食品 3D 打印的食品材料主要有蛋白质、淀粉、水凝胶和脂肪等,见表 1。也有一些食品材料由于自身结构稳定性较弱,所以无法用作食品 3D 打印材料^[8]。如何通过技术手段改善这些食品材料的特性,以适于 3D 打印,可以拓宽食品 3D 打印技术的应用范围与推广。

文章拟综述分别以蛋白质、淀粉、水凝胶和脂肪作为材料时打印成品所具备的不同特点,探讨不同材料组合对打印成品的改善效果,针对不适于打印的果蔬材料,总结目前打印的技术瓶颈以及最新的试验成果,最后提出食品 3D 打印材料的未来发展趋势和进一步的发展方向。

1 可打印材料的相关特性与应用

1.1 蛋白质

蛋白质是人类生命活动不可或缺的营养素之一,不

基金项目:辽宁省高等学校基本科研项目(编号: LJKMZ20220895)

作者简介:童强,男,大连工业大学讲师,博士。

通信作者:董秀萍(1977—),女,大连工业大学教授,博士。

E-mail: 984557286@qq.com

收稿日期:2022-11-27

改回日期:2023-04-23

表 1 可用于食品 3D 打印的材料特性

Table 1 Materials for food 3D printing

材料	种类	特性	应用范围
蛋白质	明胶、昆虫蛋白、豆类蛋白、肉糜等	提高黏度、增加流动性、结构支撑、乳液稳定剂等	补充蛋白质、人造肉、外观改良类食物等
淀粉	大豆淀粉、玉米淀粉、小麦淀粉、土豆淀粉等	黏性、流变特性等	土豆饼、曲奇、面条、面团等
水凝胶	海藻酸钠、卡拉胶、黄原胶、葡甘露聚糖等混合胶体溶液等	提高表面纹路、增加结构强度、亲水性、提高稳定性等	人造肉、浓缩物、益生菌等
脂肪	可可脂、奶油、黄油、奶酪等	起霜性(巧克力)、结构支撑、增强光泽等	巧克力等

少研究者都将其作为打印油墨应用于 3D 打印食品和组织工程领域中^[9]。蛋白质根据其分子结构的不同和其凝胶特性,可以通过多种机制形成凝胶,包括冷凝胶(明胶)、热凝胶(球状蛋白)、离子凝胶(带电蛋白)和酶凝胶(大部分蛋白)^[10]。由于它们在受控条件下具有形成凝胶的能力,并且能够保持一定的形状,所以可以用于打印^[11]。其中最常见的 3D 打印蛋白质类材料有明胶、肉糜(鱼糜、虾糜、鸡肉糜)^[12]、昆虫蛋白(粉虫蛋白)^[13]、豆类蛋白^[14]等。其中明胶作为打印油墨既可以作为乳液稳定剂,增加乳液稳定性,还可以作为结构支撑、为细胞提供营养^[9]。最新研究^[15]表明,随着明胶添加量的增加,打印样品的凝胶强度显著提升,同时样品的黏度也会显著增大,这样就会导致物料很难被挤出。杨耿涵等^[15]通过多组试验数据指出了明胶对打印材料强度和黏度的影响,但是未进一步探讨明胶添加量最佳值;资料^[9]表明,乳清蛋白中蛋白质含量高达 97.8%,可用于软化油墨、增强流动性;鱼糜、虾糜不仅富含高蛋白,而且可以作为黏性结构剂、改善质构便于老年人食用^[16]。Du 等^[17]研究表明,加入谷氨酰胺转氨酶可催化蛋白质多肽在分子间和分子内发生共价交联反应,从而可以改善蛋白质的结构和功能,对蛋白质的热稳定性和保水性也有着显著的作用,影响着食品的风味、口感、质地和外观。该试验的成功,为研究蛋白质在食品 3D 打印中的应用提供了新的思路,即在符合食品安全指标前提下通过加入其他物质来优化蛋白质,以达到试验目的需求。上述表明,蛋白质作为一种 3D 打印食品材料具有很大的发展潜力。

1.2 淀粉

淀粉是一种在人类饮食中起着重要作用的高分子碳水化合物,是由葡萄糖分子聚合而成的多糖^[18]。淀粉作为膳食能量的重要来源之一,被广泛应用于食品加工过程中^[19]。因独特的流变特性,淀粉作为凝胶剂和增稠剂应用于食品 3D 打印^[20]。天然淀粉打印 3D 样品时由于保持较强的黏度,容易发生塌陷^[21],但 Ma 等^[22]研究表明,通过 20 min 的射频电磁波处理后,淀粉的黏度峰值会

有所降低,可以得到强度显著提高的凝胶样品,因此,射频处理是用于 3D 打印中淀粉凝胶改性和优化的有效途径之一。此外,在淀粉中加入高浓度的酪蛋白,可降低淀粉的短程有序结构,改变凝胶体系的水分分布,提升凝胶体系的刚度,降低凝胶体系的黏度,使物料顺畅挤出,可以在不破坏淀粉结构的前提下,兼顾刚度和黏度两种物理性质,该方法也是一种优化淀粉凝胶的有效措施^[23]。另外,外部环境也对印刷产品的稳定性有着一定的影响^[24],通过控制环境温度可以改变淀粉材料可打印性,环境温度的升高淀粉模型的表面被强化,从而阻止了模型内部组分的自由流动,提高了结构的稳定性和支撑力,同时,喷嘴直径超过 0.8 mm 可获得更好的打印效果^[19]。Chen 等^[25]研究表明,25% 玉米淀粉、15% 马铃薯淀粉或 20% 水稻淀粉用于食品 3D 打印时,可以得到结构均匀、质地良好、凝胶强度较高的成型产品,这为今后生产一些个性化淀粉食物提供了有力的数据支撑和参考价值,上述都可以说明淀粉作为食品 3D 打印材料具有很高的可塑性和使用价值。

1.3 水凝胶

水凝胶是由亲水性三维网络结构组成的一种高分子材料,可以迅速吸水溶胀并保持溶胀状态,使大量的水不流失^[26]。在食品领域中,许多高分子聚合物,如多糖、多肽、蛋白质都是亲水性聚合物,因此经常使用水作为分散介质,而这种水与一定比例的多种高分子聚合物的混合物称为水凝胶^[27]。如 Kim 等^[28]利用含有卡拉胶(CG)成分的水凝胶替代蛋白质嵌入鱼糜中生产低热量的鱼糜,与蛋白质相比,卡拉胶具有零热量和高弹性的凝胶成型特性,这就可以使由它所形成的水凝胶也具备相同的特点,同时应用同轴嵌入技术,既保持了鱼糜鲜嫩的肉质口感,又具有较低热量,适用于老年人和健身者食用。Pan 等^[29]利用金针菇多糖(FVP)渗入到大豆分离蛋白(SPI)中来制备水凝胶,这种新型水凝胶的打印质量好,精度在 99.7% 以上,稳定性在 99.9% 以上,由于热处理和金针菇多糖的加入,水凝胶具有较低的黏度和较高的水结合能

力,便于挤出,样品不易受到损伤,具有良好的稳定性。此外,Ko 等^[2]通过将黄原胶(XG)、卡拉胶(CG)、海藻酸钠(SA)、葡甘露聚糖(GM)按照一定比例混合的水胶体嵌入蛋白质基质的中心构建 3D 结构,当水胶体中含有 1.5%卡拉胶(CG)、1.5%葡甘露聚糖(GM)或 2.5%卡拉胶(CG)、1.5%葡甘露聚糖(GM)时形成了坚固且稳定的凝胶,其弹性强度与牛肉相当,2.5%卡拉胶(CG)、1.5%葡甘露聚糖(GM)水胶体硬度与牛肉最接近,表明不同比例的水凝胶胶体其强度和硬度是有很大的区别的,同时,也证明了人造肉在口感方面是可以接近真实肉质,为食品 3D 打印机生产肉类产品提供了新途径。当 $m_{\text{卡拉胶}} : m_{\text{黄原胶}}$ 为 1:1 时打印出的产品精度较高、线条细腻,能形成更好的形状纹路。这些都表明,水凝胶作为食品 3D 打印的“油墨”之一,对于打印食品有着很大的作用。

1.4 脂肪

脂肪是一种具有大量碳原子的大分子物质,其特性会受到饱和度的影响^[30]。饱和脂肪具有更理想的物理性能,可以在 30~40℃ 下融化,通过冷却固化可以更好地贮藏,例如可可脂,通过冷却可以在短时间内凝固形成自支撑层^[31],但是由于其熔点略低,所以对加工环境较为严格,还要考虑打印成品后续存放等问题。研究^[32]表明,热敏可可脂的加入提高了植物蛋白基凝胶材料的流动性和 3D 结构的保形性,可用于食品 3D 打印中提高可塑性和成型性,但是在实际生产中,一定要严格把控可可脂添加量,过量的可可脂不但不会提高 3D 打印的成形性,反而会加快凝胶凝固速度,导致凝胶挤出时不连续甚至发生堵头现象,影响 3D 打印效果。含有不同成分的(牛奶、巧克力和黑巧克力)的巧克力显示出不同的打印特性,特别是改变配方,加入不同量的脂肪会改变颗粒间的相互作用^[33]。在加工过程中添加脂肪和卵磷脂,覆盖了糖和可可颗粒,减少了相互作用^[34],并使质构和热参数显著下降($P<0.05$)。脂肪含量较低的巧克力会使打印的产品变得坚韧、稳定,很难挤出^[35],较高的可可脂含量会降低流量阻力^[36]。

以巧克力为典型脂肪类的可打印食材,国内外都做到了产业化生产,如 2022 年 2 月巧克力生产商百乐嘉利宝旗下装饰品牌“蒙娜丽莎”3D 设计工作室推出全球首款可大规模生产的个性化 3D 打印巧克力^[37],其主要和高端酒店合作。此外,中国 3D 食品打印机生产商时印科技旗下“盼打”品牌推出自助式 3D 巧克力打印机,据了解,目前该公司的自助式 3D 巧克力打印机是世界上最快的 3D 巧克力打印机,消费者可以通过微信扫码选择自己喜欢的模型进行现场打印^[38]。虽然脂肪作为食品 3D 打印材料没有上述 3 种材料应用范围广阔,但是其对最终产品的感官和物理特征的影响(支撑能力、光泽和贮存期间起霜现象^[39]),已然表明它是一个不可忽略具有未来发

展前景的食品 3D 打印材料。

2 不易打印材料的相关特性与应用瓶颈

在 3D 打印中,还存在一些塑性差、黏度低、机械强度弱的材料。这些不能直接进行 3D 打印的材料被统称为不容易打印的材料,如富含纤维素的水果和蔬菜原料。水果和蔬菜的原材料不仅黏度低,而且水分高,且在破碎后有很强的流动性,可塑性和成形性都较差。这就必须与其他材料结合,使可塑性增强。预处理过程中,为了获得均匀的糊状黏稠物,必须将水果和蔬菜捣碎,糊的黏度和流变性可通过添加诸如海藻酸盐、琼脂、卡拉胶、纤维素衍生物、黄原胶等亲水胶体来调节^[40],但是以往的试验中为了保证果蔬打印制品的结构稳定性,通常会加入过多的亲水胶体^[41],这样就会导致产品的风味受到影响,香气和口感大大降低,如何使用未脱水的蔬菜和最少的添加剂来印刷美观可口的食物一直是研究者们所要攻克的难题。Pant 等^[42]在最近的试验中使用大白菜与不超过 2%的 HCs(黄原胶、 κ -卡拉胶和槐豆胶)混合,在保持营养和口感的前提下成功进行了 3D 打印,这一技术的突破,有利于吞咽障碍患者改变其对 3D 打印食品口味的看法,有望在医院、养老院得到很好的应用。

此外,果蔬打印制品由于受环境因素影响和自身水分含量高原因,极易腐烂变质。而冷冻是新鲜细胞食品中最常用的保鲜方法之一^[43],但果蔬解冻后,冻融汁液流失和质地损失(硬度损失)会使冻结后的产品品质恶化^[44],为此 Huang 等^[45]按一定质量比制备了大白菜泥—胡萝卜粉—黄原胶($m_{\text{大白菜泥}} : m_{\text{胡萝卜粉}} : m_{\text{黄原胶}} = 84 : 14 : 2$)食品凝胶油墨,并将打印后不同孔隙率的蔬菜样品进行冷冻再解冻。试验发现,通过提高打印的填充密度可以降低打印样品的孔隙率进而降低冻融汁液流失率,改善了 3D 打印果蔬产品冷冻贮藏后的产品品质。这项研究为果蔬打印制品的后处理和保存提供了新的方法,相对于脱水和冷冻干燥的果蔬粉,这种 3D 打印的新鲜蔬菜因含有微量的亲水胶体更适合吞咽障碍的老年人。

Severini 等^[46]从水果和蔬菜中获得的奶昔中发现了 4.28 lg(CFU/g)细菌,所以,像蔬菜和水果此类 3D 打印即食食品,在保证新鲜口感和外观、延长保证期的同时,还要对其进行消毒处理^[47]。水果和蔬菜打碎后导致的氧化问题^[48],也是阻碍其作为常用食品 3D 打印原材料因素之一。

综上所述,食品 3D 打印是一种新兴的打印方式,可以生产一些相对复杂且定制化的食物,但是仅仅有上述材料还是不够的,随着世界人口的急剧上升,粮食供应也变得越来越紧张,很多人甚至吃不上饭,开发可持续、低成本、多种类、高回报的食物迫在眉睫,所以不能仅限于

蛋白质、淀粉、水凝胶、脂肪类常见食品 3D 打印材料,还可以将以前从未或很少被列为食物选项的物质(如各种高蛋白昆虫)通过 3D 打印成新的可令人接受的食物,减轻世界粮食短缺的压力,提高食物种类的丰富多样性。开发此类食物是接下来食品 3D 打印的重要研究方向之一。材料的局限性只是暂时的,食品 3D 打印的发展是持续性的,要对食品 3D 打印这项新技术抱有信心,未来大范围推广和应用会进一步提升人们的生活质量,终有一天,食品 3D 打印会进入千家万户,为人们带来别样的美食体验。

3 展望

目前,针对食品的 3D 打印技术才刚刚起步,由于原料和设备的局限性,食品 3D 打印技术的发展存在巨大缺陷。此外,消费者对 3D 食品的安全性也持有怀疑,3D 食品过高的价格也令大多数人望而生畏,导致目前 3D 食品还无法普及。

因此,要对 3D 打印方法和设备进行进一步的优化,提高食品打印的效率,降低食品加工成本,节省时间。其次,探索更多可用于 3D 打印的食品材料和材料组合,用于生产多种多样的食物产品,满足消费者的各种需求。此外,3D 打印食品的监管力度也要继续提升,因为随着材料的混合和 3D 打印机的改进,可能会出现一些食品安全问题,如设备对材料的影响、不同材料间发生的化学反应。加强监管力度既是对消费者负责,打消消费者对 3D 食品安全和口感的怀疑,也是为了可以更好地发展食品 3D 打印技术。

近几年,4D 打印技术作为 3D 打印技术的延伸,逐渐在食品领域得到了一些应用和发展,其最大特点就是引入了时间维度,可以使打印材料的物化特性随时间的变化而发生改变,从而实现由静到动的转变,为食品打印带来了新的思路。不过,目前的食品 4D 打印技术还处于研究阶段,尤其是与欧美等发达国家相比,还是存在一些技术上的差距。所以未来对于 4D 食品的研究还是应该聚焦到新设备的研发、引入新的算法和丰富打印食品原料上,也期待 4D 打印技术可以早日应用到食品工业领域上。

研究如何高效、安全、便捷地打印出种类丰富、美味可口、针对不同人群(吞咽障碍者、儿童、老年人等)的食品一直是研究者们共同奋斗的目标,相信在不久的将来,食品 3D 打印会有重大的技术突破。未来随着 3D 打印技术在食品行业的发展,将会给传统食品带来深远的影响,并为食品工业的发展注入新鲜的血液,3D 食品打印会逐渐融入人们的生活。

参考文献

[1] 寇德正, 杨文杰, 张兴丽, 等. 3D 打印技术在食品中的应用[J]. 齐鲁工业大学学报, 2020, 34(3): 11-16.

KOU D Z, YANG W J, ZHANG X L, et al. Application of 3D printing technology in food [J]. Journal of Qilu University of Technology, 2020, 34(3): 11-16.

[2] KO H J, WEN Y, CHOI J H, et al. Meat analog production through artificial muscle fiber insertion using coaxial nozzle-assisted three-dimensional food printing [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106898.

[3] HE C, ZHANG M, FANG Z. 3D printing of food: pretreatment and post-treatment of materials[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(14): 2 379-2 392.

[4] WILMS P, DAFFNER K, KERN C, et al. Formulation engineering of food systems for 3D-printing applications: A review[J]. Food Research International, 2021, 148: 110585.

[5] 刘倩楠, 张春江, 张良, 等. 食品 3D 打印技术的发展现状[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 265-273.

LIU Q N, ZHANG C J, ZHANG L, et al. Development status of food 3D printing technology [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(16): 265-273.

[6] CAI Q, ZHONG Y, XU M, et al. 3D printed high oil custard cream: Effects of whey protein isolate, hydroxypropylated starch and carrageenan on physicochemical properties and printing performance [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 156: 113039.

[7] 王琪, 李慧, 王赛, 等. 3D 打印技术在食品行业中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(1): 16-19.

WANG Q, LI H, WANG S, et al. Research progress in the application of 3D printing technology in the food industry[J]. Grain and Oil, 2019, 32(1): 16-19.

[8] TOMAŠEVIC I, PUTNIK P, VALJAK F, et al. 3D printing as novel tool for fruit-based functional food production[J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 41: 138-145.

[9] 邵婷, 冯鑫, 吕天艺, 等. 基于蛋白质材料的 3D 打印技术研究现状及其应用[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 296-303.

SHAO T, FENG X, LU T Y, et al. Research status and application of 3D printing technology based on protein materials[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(8): 296-303.

[10] ZHANG J Y, PANDYA J K, MCCLEMENTS D J, et al. Advancements in 3D food printing: A comprehensive overview of properties and opportunities[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(17): 4 752-4 768.

[11] FAN Y, SHI T, YUE X, et al. 3D composite cell printing gelatin/sodium alginate/n-HAP bioscaffold [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1 213: 042020.

[12] CHAO C, HWANG J S, KIM I W, et al. Coaxial 3D printing of chicken surimi incorporated with mealworm protein isolate as texture-modified food for the elderly [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 333: 111151.

[13] DICK A, BHANDARI B, PRAKASH S. 3D printing of meat[J]. Meat Science, 2019, 153: 35-44.

[14] CHEN J, SUN H, MU T, et al. Effect of temperature on rheological, structural, and textural properties of soy protein

- isolate pastes for 3D food printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 323: 110917.
- [15] 杨耿涵, 韩瑜, 陶阳, 等. 明胶对鸡肉糜 3D 打印成型稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 51-57.
- YANG G H, HAN Y, TAO Y, et al. Effect of gelatin on 3D printing stability of chicken surimi[J]. *Food Science*, 2022, 43(12): 51-57.
- [16] LIU Y, SUN Q, PAN Y, et al. Investigation on the correlation between changes in water and texture properties during the processing of surimi from golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(2): 376-384.
- [17] DU J, DAI H, WANG H, et al. Preparation of high thermal stability gelatin emulsion and its application in 3D printing [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106536.
- [18] CHI C, LI X, HUANG S, et al. Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 154-168.
- [19] CHEN Y, MCCLEMENTS D J, PENG X, et al. Starch as edible ink in 3D printing for food applications: A review [J/OL]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. (2022-08-23) [2022-12-06]. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2106546>.
- [20] ZENG X, CHEN H, CHEN L, et al. Insights into the relationship between structure and rheological properties of starch gels in hot-extrusion 3D printing[J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128362.
- [21] ZHANG J, LI Y, CAI Y, et al. Hot extrusion 3D printing technologies based on starchy food: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 294: 119763.
- [22] MA S, LIU J, ZHANG Q, et al. 3D printing performance using radio frequency electromagnetic wave modified potato starch[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 80: 103064.
- [23] JI S, XU T, LIU Y, et al. Investigation of the mechanism of casein protein to enhance 3D printing accuracy of cassava starch gel[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 295: 119827.
- [24] OYINLOYE T M, YOON W B. Application of computational fluid dynamics (CFD) in the deposition process and printability assessment of 3D printing using rice paste[J]. *Processes*. (2021-12-27) [2022-12-06]. <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/1/68>.
- [25] CHEN H, XIE F, CHEN L, et al. Effect of rheological properties of potato, rice and corn starches on their hot-extrusion 3D printing behaviors[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 244: 150-158.
- [26] 郑雅露, 朱圣羽, 熊晓辉, 等. 抗菌水凝胶在食品领域的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(9): 446-454.
- ZHENG Y L, ZHU S Y, XIONG X H, et al. Research progress of antibacterial hydrogel in food field[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(9): 446-454.
- [27] 曲剑波, 车焕洁, 李静, 等. 自修复天然高分子水凝胶的研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(10): 158-167.
- QU J B, CHE H J, LI J, et al. Research progress of self-healing natural polymer hydrogels [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38(10): 158-167.
- [28] KIM S M, WEN Y, KIM H W, et al. Textural and sensory qualities of low-calorie surimi with carrageenan inserted as a protein substitute using coaxial extrusion 3D food printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 333: 111141.
- [29] PAN H, PEI F, MA G, et al. 3D printing properties of Flammulina velutipes polysaccharide-soy protein complex hydrogels[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 334: 111170.
- [30] 杨耿涵, 黄明远, 徐幸莲. 食品 3D 打印技术及其在肉类加工中应用的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(21): 308-314.
- YANG G H, HUANG M Y, XU X L. Research progress of food 3D printing technology and its application in meat processing[J]. *Food Science*, 2021, 42(21): 308-314.
- [31] RANDO P, RAMAIOLI M. Food 3D printing: Effect of heat transfer on print stability of chocolate [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 294: 110415.
- [32] WANG S, LIU S. 3D Printing of soy protein- and gluten-based gels facilitated by thermosensitive cocoa butter in a model study [J]. *ACS Food Science & Technology*, 2021, 1(10): 1990-1996.
- [33] JIANG H, ZHENG L, ZOU Y, et al. 3D food printing: Main components selection by considering rheological properties [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(14): 2335-2347.
- [34] GLICERINA V, BALESTRA F, ROSA M D, et al. Rheological, textural and calorimetric modifications of dark chocolate during process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(1): 173-179.
- [35] GLICERINA V, BALESTRA F, DALLA ROSA M, et al. Microstructural and rheological characteristics of dark, milk and white chocolate: A comparative study [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 169: 165-171.
- [36] FERNANDES V A, MÜLLER A J, SANDOVAL A J. Thermal, structural and rheological characteristics of dark chocolate with different compositions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(1): 97-108.
- [37] 曹沐曦, 詹倩怡, 沈晓琦, 等. 3D 打印技术在食品工业中的应用概述[J]. *农产品加工*, 2021(1): 78-82.
- CAO M X, ZHAN Q Y, SHEN X Q, et al. Overview of the application of 3D printing technology in the food industry[J]. *The Processing of Agricultural Products*, 2021(1): 78-82.
- [38] 巧克力 3D 打印机—自动售货机—创业好项目加盟—杭州盼打科技有限公司 [EB/OL]. [2022-12-06]. <http://www.panda-3d.com/>.
- Chocolate 3D printer-vending machine-joining in a good entrepreneurial project-Hangzhou Panda Technology Co., Ltd.[EB/OL]. [2022-12-06]. <http://www.panda-3d.com/>.
- [39] GODOI F C, PRAKASH S, BHANDARI B R. 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 179: 44-54.
- [40] WAGHMARE R, SURYAWANSHI D, KARADBHAJNE S. Designing 3D printable food based on fruit and vegetable products: Opportunities and challenges[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 60(5): 1-14.

- [10] 陈明威, 魏明, 陶良凡, 等. 大孔树脂分离纯化霍山石斛多酚及其抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 148-153.
- CHEN M W, WEI M, TAO L F, et al. Purification of polyphenols from *Dendrobium huoshanense* by macroporous resin and its antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 148-153.
- [11] CONIDI C, CASSANO A. Recovery of phenolic compounds from bergamot juice by nanofiltration membranes[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 56(13): 3 510-3 518.
- [12] LI Y Y, LI L X, CUI Y, et al. Separation and purification of polyphenols from red wine extracts using high speed counter current chromatography[J]. Journal of Chromatography B, 2017, 1 054: 105-113.
- [13] 刘永玲, 赵治兵, 马凤伟, 等. 基于大孔树脂与制备液相色谱技术快速分离野地瓜茎中的绿原酸[J]. 分析试验室, 2021, 40(6): 692-696.
- LIU Y L, ZHAO Z B, MA F W, et al. Rapid separation of chlorogenic acid from the stems of *Ficus tikoua* Bur. by macroporous resin and preparative liquid chromatography [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2021, 40(6): 692-696.
- [14] GUO C X, QIAO J P, ZHANG S W, et al. Purification of polyphenols from kiwi fruit peel extracts using macroporous resins and high-performance liquid chromatography analysis [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(6): 1 486-1 493.
- [15] YANG D, LI M M, WANG W J, et al. Separation and purification of anthocyanins from Roselle by macroporous resins[J]. LWT- Food Science and Technology, 2022, 161: 113371.
- [16] HU Z, ZHOU H, LI Y, et al. Optimized purification process of polysaccharides from *Carex meyeriana* Kunth by macroporous resin, its characterization and immunomodulatory activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 76-86.
- [17] LUENGO E, ÁLVAREZ I, RASO J. Improving the pressing extraction of polyphenols of orange peel by pulsed electric fields [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 17: 79-84.
- [18] GHANI U, NUR-E-AALAM M, YOUSAT M, et al. Natural flavonoid α -glucosidase inhibitors from *Retama raetam*: Enzyme inhibition and molecular docking reveal important interactions with the enzyme active site[J]. Bioorganic Chemistry, 2019, 87: 736-742.
- [19] 周莹婷, 张涛俊, 刘楚瑶, 等. 比较两种大孔树脂动态分离多种甜菊糖苷的研究[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(5): 13-19.
- ZHOU Y T, ZHANG J T, LIU C Y, et al. A comparison of two macroporous resins in dynamic separation of multiple stevia glycosides[J]. China Food Additives, 2021, 32(5): 13-19.
- [20] 曾桥, 韦承伯, 夏飞, 等. 响应面法优化超声波辅助提取杜仲叶茯砖茶绿原酸及其体外降血糖抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 204-211.
- ZENG Q, WEI C B, XIA F, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of *eucommia ulmoides* leaves *Fu brick tea* chlorogenic acid via response surface analysis and its hypoglycemic and antioxidant activities in vitro [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(9): 204-211.
- [21] WANG L, WANG L, WANG T, et al. Comparison of quercetin and rutin inhibitory influence on Tartary buckwheat starch digestion in vitro and their differences in binding sites with the digestive enzyme[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130762.
- [22] YAN J, ZHANG G W, PAN J H, et al. α -Glucosidase inhibition by luteolin: Kinetics, interaction and molecular docking [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 64: 213-223.
- [23] 王斯慧, 黄琬凌, 陈庆松, 等. 芦丁、槲皮素对 α -葡萄糖苷酶活性抑制研究[J]. 中国酿造, 2012, 31(1): 133-135.
- WANG S H, HUANG W L, CHEN Q S, et al. Inhibition of rutin and quercetin on α -glycosidase[J]. China Brewing, 2012, 31(1): 133-135.
- [45] HUANG Y, ZHANG M, PATTARAPON P. Reducing freeze-thaw drip loss of mixed vegetable gel by 3D printing porosity[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102893.
- [46] SEVERINI C, DEROSI A, RICCI I, et al. Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 220: 89-100.
- [47] 韩野, 刘艳秋, 孙广仁, 等. 3D食品打印技术及影响因素的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 338-343, 348.
- HAN Y, LIU Y Q, SUN G R, et al. Research progress of 3D food printing technology and influencing factors [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(24): 338-343, 348.
- [48] ZAINAB T, MUHAMMAD A, SUNBAL K C. Redox protective potential of fruits and vegetables: A review[J]. Journal of Coastal Life Medicine, 2015, 3(8): 663-668.

(上接第5页)

- [41] KIM H W, LEE J H, PARK S M, et al. Effect of hydrocolloids on rheological properties and printability of vegetable inks for 3D food printing[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(12): 2 923-2 932.
- [42] 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.
- [43] LI D, ZHU Z, SUN D W. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 46-55.
- [44] SCHUDEL S, PRAWIRANTO K, DEFRAEYE T. Comparison of freezing and convective dehydrofreezing of vegetables for reducing cell damage [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 293: 110376.