

# 蛋白质3D食品打印研究进展

李京蓉<sup>1</sup>, 邰伟伟<sup>2</sup>, 宋丽丽<sup>1,\*</sup>

- (1. 浙江农林大学, 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300;  
2. 浙江农林大学, 浙江省林业生物质化学利用重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 综述了3D食品打印(Three-dimensional food printing, 3D-FP)的应用及发展, 从不同角度探讨了用于3D-FP的蛋白质凝胶形成原理及影响要素, 进而总结了蛋白质打印油墨组分间的相互作用以及其对蛋白质凝胶理化特性、打印特性的影响, 以期为进一步应用凝胶品质调控、创新开发新型蛋白质3D-FP产品提供理论依据。

**关键词:** 蛋白质; 3D食品打印; 食品加工; 食品感官; 食品组分

## Research Progress of Protein Food Developed by 3D Food Printing

LI Jingrong<sup>1</sup>, HUAN Weiwei<sup>2</sup>, SONG Lili<sup>1,\*</sup>

- (1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China;  
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Chemical Utilization of Forestry Biomass, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** This paper reviews the application and development of three-dimensional food printing (3D-FP), and discusses the formation principle and influencing factors of protein gels for 3D-FP from different angles, and then summarizes the interaction between the components of protein printing inks and their effects on physicochemical and printing properties of protein gels, in order to provide theoretical basis for further application of gel quality control methods and innovative development of novel 3D printed protein products.

**Key words:** protein; 3D food printing; food processing; food sensory; food components

中图分类号: TS205

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2023.12.009

我国食品行业正进入以营养为导向的发展新阶段, 产品加工从满足人们的饱腹感和安全感, 转向满足人们日益增长的健康和幸福感需要; 食品供应从满足一般、大众食品消费需求转向满足个性化、定制化食品消费需求<sup>[1]</sup>。因此, 食品行业需要找到新的生产方式和产品开发技术以满足客户需求。

随着3D打印(Three-dimensional printing)技术的日益成熟, 其在工业<sup>[2]</sup>、航空航天<sup>[3]</sup>、医疗<sup>[4-5]</sup>和交通运

输<sup>[6]</sup>等制造业领域中得到普遍应用。近年来, 由于人们将更多的目光投向食品行业, 3D食品打印(Three-dimensional food printing, 3D-FP)也应运而生<sup>[7]</sup>。通过3D-FP的食品显示出许多超越传统食品的优势, 其造型复杂精美, 更具视觉吸引力, 能够深深抓住消费者的购买欲望<sup>[8]</sup>; 其不但可使营养成分配制个性化、精美造型定制化、食物资源浪费低效化、食物易吞咽化<sup>[9]</sup>, 而且还能出色地完成航天、军队等食品的供应。

基金项目: 浙江省省院合作林业科技项目(2021SY01)

作者简介: 李京蓉(1997—), 女, 蒙古族, 硕士在读, 研究方向为植物资源利用。

\*通信作者: 宋丽丽, 博士, 教授, 研究方向为经济林产品加工与利用。

这些优势促进了该技术在食品行业中的迅速发展<sup>[10]</sup>。

蛋白质是一种被公认为在提供人类膳食营养和增强人体免疫能力及抵抗力等功能中起重要作用且化学结构复杂的生物大分子。蛋白质作为膳食能量的重要来源之一,广泛应用于食品加工。近年来,植物蛋白产品、植物“肉”和高蛋白零食产业蓬勃发展。为了开发出能够更加满足当代多元化膳食需求的植物蛋白产品,以高蛋白质含量、高生物利用度、良好氨基酸结构、功能性和生物化合物为主导的食品新基质及以个性化、数字化为主导优化食品加工的模式<sup>[11]</sup>已被广泛研究。其中,新基质包括大豆蛋白<sup>[12]</sup>、豌豆蛋白<sup>[13]</sup>、玉米醇溶蛋白<sup>[14]</sup>、藜麦蛋白<sup>[15-16]</sup>、绿豆蛋白<sup>[11]</sup>、日本小米蛋白<sup>[17]</sup>、菌菇蛋白<sup>[18]</sup>、藻类蛋白<sup>[19-20]</sup>以及昆虫分离蛋白<sup>[21]</sup>。

蛋白质除能提供必需氨基酸以保证人体对营养成分摄入的需求,还具备一定的功能特性,如乳化性、发泡性、自凝胶化等<sup>[22]</sup>,这均有助于其开发为3D食品打印的可食用生物油墨。上述大多数蛋白质源已通过3D-FP加工,但蛋白质材料的性能仍有不足。例如蛋白质对温度敏感,氨基酸结构不够稳定,因此需要对其进行一定处理,如采用高压、超声波等技术改变蛋白质的结构和性质;对于蛋白质易于与其他成分发生反应这一特点,可以通过不同的检测手段和评价方式,提供进一步的优化思路。研究表明,食品3D打印加工工艺的优化和蛋白质来源的拓宽有利于个性化蛋白质类食品的开发。但目前还没有一种可适配所有类型蛋白的3D打印加工方案。本文旨在概述3D-FP技术在蛋白质食品工业中的研究进展,阐述新型蛋白质制备成打印材料的影响因素,以期促进基于食品3D打印的蛋白质类功能产品和个性化食品的开发与应用,为食品工业的创新提供新思路。

## 1 3D食品打印技术

### 1.1 新兴食品开发技术

3D打印是增材制造(Additive manufacturing, AM)的总称,是一种通过将材料分层并逐层打印来开发不同产品的技术<sup>[23]</sup>,其改变了传统工业格局,并已应用于食品生产中。3D-FP是以3D打印技术为基础发展起来的一种快速原型食品技术<sup>[24]</sup>。它提供了食品复杂形状的自由、食物纹理的新颖、营养成分的数字化、食品设计的个性化及供应链的便捷化,真正实现在低成本、无生产线的条件下满足差异化市场的需求,直接制作出传统模具不能替代的奇妙食物,提

高了经济收益,加快了食品工业迈向食品智能定制和精加工新时代的步伐<sup>[25-29]</sup>。

为实现3D打印食品的生产,目前科研人员主要针对食物材料、打印参数等多方面进行探索和研究<sup>[10,26,30-31]</sup>。食物材料的可打印性在很大程度上取决于食材自身的性能和所使用3D打印机的参数。因此,在打印开始前要充分了解打印材料的黏度、弹性、硬度、附着性、持水性等,这些特性能够影响层与层之间相互粘连,相互支撑,进而影响打印后食品的稳定性和打印配方<sup>[32-34]</sup>。形成合适的打印配方后,还需进一步对打印参数进行试验和优化。如较小的喷嘴直径可提高打印模型的精度<sup>[35]</sup>;较低的喷嘴高度可以避免挤出延迟,从而确保打印模型的层层堆叠并能降低终产品边缘毛糙或内部塌陷等的发生<sup>[36]</sup>;调试至合适的打印速度可以提高打印产品和模型的相似度,避免多余打印材料堆叠在打印轨迹而形成的重叠层,或因打印速度过快导致的出料中断<sup>[30]</sup>。

荷兰应用科学研究组(TNO)已通过3D打印得到功能特性食物,通过改变蛋白质和脂肪等营养成分的水平,为咀嚼和吞咽障碍者、老年人和运动员提供定制膳食<sup>[37,64]</sup>。数字食品加工计划(DFPI)也相继开发出相关项目,如为士兵、军队、老年人提供个性化营养餐食,保证能量、蛋白质和维生素D的充足摄入<sup>[11]</sup>。近年来,对3D-FP的研究不断取得进步,但在材料选择、混合材料的可打印性、打印产品形状的稳定性和与传统食品加工技术的兼容性、3D-FP消费与健康监管的完善性等多方面仍面临挑战<sup>[11,38]</sup>。

### 1.2 食品3D打印的深度开发

近年来,随着增材制造技术的深入研究,新的分支技术——4D、5D、6D技术也应运而生,并获得形态更加多样的产品,它们的打印材料为“智能材料”(图1)。

4D打印技术是在原有3D的基础上加入了时间轴,即打印材料随时间发生不同程度变化,从而实现打印动态3D结构的技术<sup>[39-40]</sup>。4D-FP的发展增加了用餐时的视觉享受。其打印而成的产品在一定的外部刺激(压力、pH、温度、光、化学成分等)下,形状、颜色、质地和风味随时间而发生变化(图2)。经微波脱水诱导的紫甘薯泥(PSP)3D打印产品的形状发生了改变,呈现向上弯曲状,而经空气脱水诱导的打印产品弯曲度更高(图2A)。3D打印含花青素的马铃薯淀粉凝胶或土豆泥在喷洒不同pH溶液后自发变色,呈现随pH变化的颜色梯度变化(图2B和图2C)。通过电子鼻检测分析发现,大豆分离蛋白、卡拉胶和香草混合物在微波诱导下会产生新的风味物质,这对

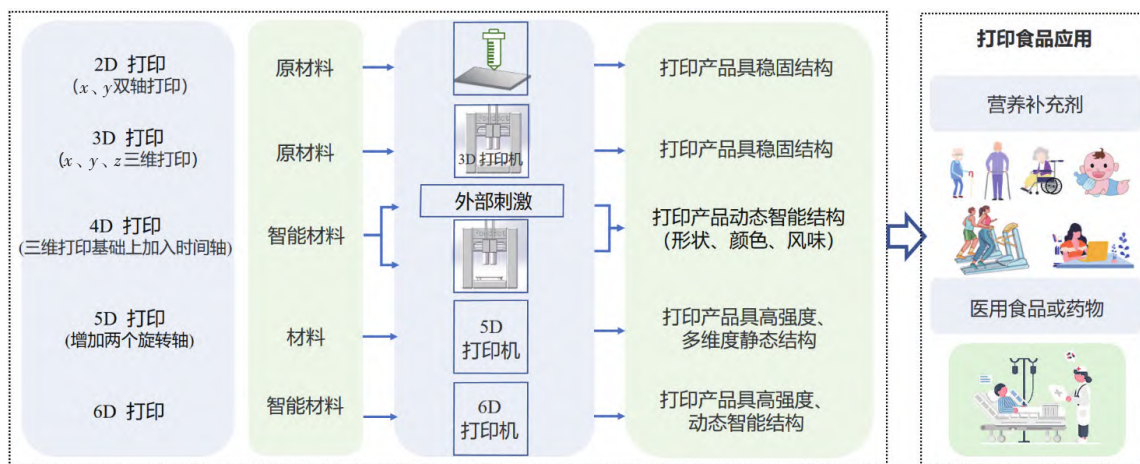
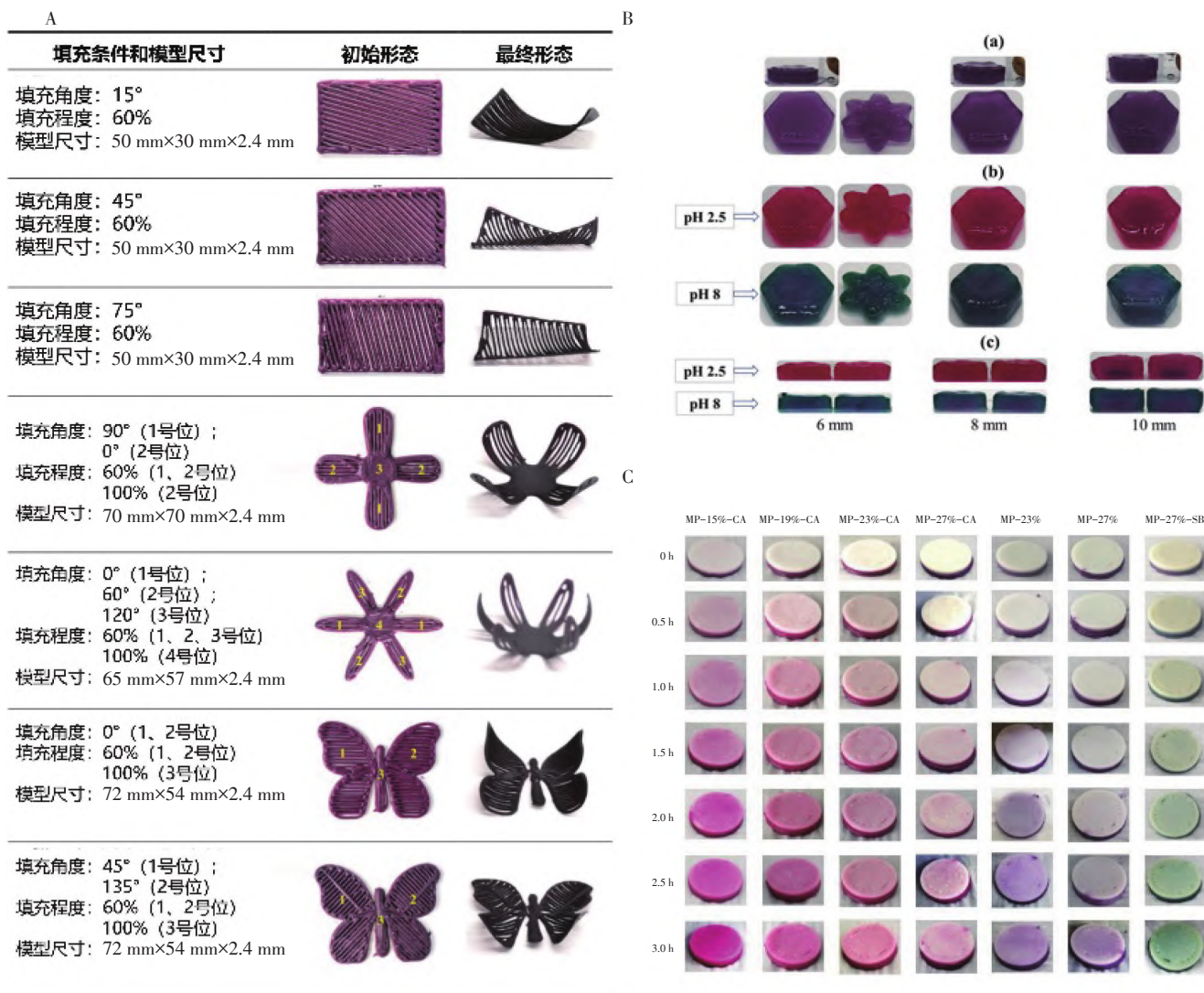


图1 2D、3D、4D、5D和6D打印的流程、区别及打印食品的适用场景

Fig.1 The 5 types of printing (2D, 3D, 4D, 5D, and 6D printing) process flow and differences as well as application scenarios of printed food



注:A.微波脱水诱导紫甘薯泥3D打印产品形状改变;B.红甘蓝汁-香兰素粉-马铃薯-果汁复合材料改变不同厚度(6、8、10 mm)的打印产品(a)和喷涂不同pH值溶液后发生的颜色变化(b)及喷涂1.5 h后(c)每个样品中的垂直截面;C.pH溶液诱导3D打印后的紫甘薯泥/土豆泥颜色变化(MP, 土豆泥;CA, 柠檬酸;SB, 碳酸氢钠)。

图2 部分4D食品打印产品效果图<sup>[41-45]</sup>

Fig.2 Some products using 4D food printing<sup>[41-45]</sup>

于食欲不振的消费者尤其重要。

5D打印的概念于2016年首次由美国大学提出并实现<sup>[46]</sup>,它在原有3轴的基础上添加了2个旋转轴,可打印任何需求的曲直线或面,实现从不同角度和方向对模型进行五轴打印<sup>[47]</sup>。与3D打印相比,5D打印实现了用更少的材料生产弯曲结构的食品,得到多维度高强度的坚固物体<sup>[48]</sup>,打印产品的稳定性和美观性得以提高,尤其是球形类或具有曲面的食品,使食物更具吸引力。最近,6D打印技术也孕育而生,其概念于2021年由Georgantzinos等<sup>[49]</sup>提出。它是4D和5D技术的结合,其产品可更高效、更可控地自弯曲,且在运输过程中形状能保持较高的稳定性<sup>[39,49]</sup>。相信在不久的将来,该技术在智能食品中会崭露头角。食品加工技术的发展也会随着科技与工业的发展更加创造化、智能化。

## 2 可用于3D-FP的蛋白质

### 2.1 动物性蛋白质

动物性蛋白质主要来源于禽畜鱼类等的肉、蛋、奶,并被作为其他来源蛋白比对的标准和期望达成的目标。其他来源蛋白通过各种技术手段使其具备与肉、蛋、奶相似的风味或口感。目前有几种新型动物蛋白值得关注,其获取难度和获取周期均优于传统动物性蛋白。其中鱼糜蛋白和昆虫蛋白因具有蛋白质含量高、营养价值高、可塑性优异的特点而用于3D-FP中。

鱼糜(其所含蛋白为鱼糜肌原纤维蛋白)可通过对鱼肉进行连续洗涤、脱水和切碎而获得,这样获得的鱼糜具有假塑性,即在非剪切过程中表现出较高的黏度,在挤出和剪切过程中黏度大大降低,因此鱼糜肌原纤维蛋白是一种很有潜力的高蛋白食品3D打印材料,同时也可以作为其他食品3D打印开发的基础材料<sup>[50]</sup>。适当增加盐浓度会降低鱼糜的黏度,使其在3D-FP过程中挤出更容易。Wang等<sup>[51]</sup>以银鲑鱼为原料,从持水性、水分分布、流变性、凝胶强度及微观结构5方面探究氯化钠的作用,发现添加1.5%的NaCl可以得到适合3D打印的材料。但流变特性会受到鱼品种和加工方式的影响。Liu等<sup>[52-53]</sup>为提高鱼糜蛋白的胶凝性能和打印精度,以金鲳鱼为原料,探究了鱼糜加工过程中水分与质构间的相关性以及流变行为、蛋白质分子结构和3D打印特性之间的相关性。微生物谷氨酰胺转氨酶(MTGase)的加入可通过改善不溶性蛋白质的溶解性,进一步增强鱼糜凝胶强度和持水性<sup>[54]</sup>。Cao等<sup>[55]</sup>探究了NaCl和MTGase的加入

对白姑鱼鱼糜凝胶的影响,筛选出3D-FP的最适添加剂浓度。

可食用昆虫蛋白是一种新的食品工业蛋白质来源。已经有团队根据黄粉虫分离蛋白(Mealworm protein isolate, MPI)的特性,开发出一种适合老年人的3D-FP新型食品,将MPI加入到鸡肉糜中既满足了高蛋白摄入需求,又能有效降低鸡肉糜的黏弹性和硬度,改善鸡肉糜的质地,使其打印成适合老年人或吞咽困难患者的食品<sup>[56]</sup>。黄粉虫幼虫碾碎的粉末中蛋白质和必需氨基酸含量都高于面粉,因此Severini等<sup>[57]</sup>尝试采用黄粉虫幼虫粉替代部分面粉制作面团,来提高面团的营养价值。同时发现,提高黄粉虫粉添加量可增加面团柔软度,抑制打印产品在后处理中的尺寸缩小,使得3D-FP产品具有更好的造型能力。Amarendar等<sup>[58]</sup>对蟋蟀科啞蟋属(*Gryllidae*)的昆虫全精磨喷雾干粉进行了测定分析及脱脂处理研究,结果表明,蟋蟀干粉的蛋白质含量为63.43%,可作为食品工业的替代蛋白质来源。除上述两种昆虫之外,双叉犀金龟(*Allomyrina dichotoma*)和白星花金龟(*Protaetia brevitarsis*)也作为可食用昆虫被研究过<sup>[21]</sup>。研究表明,以上3种可食用昆虫的蛋白质含量为49%~85%,并具有人体所需的必需氨基酸,提取出的昆虫分离蛋白具有良好的乳化和凝胶性能,可以作为一种良好的蛋白质功能增强剂。尽管目前尚未针对其3D打印能力进行验证,但已有初步迹象表明该材料具有巨大的开发潜力<sup>[21,59]</sup>。上述研究表明,昆虫蛋白可作为食品工业蛋白质来源,且部分蛋白被验证可满足3D-FP材料的要求,今后可利用3D-FP技术改变昆虫蛋白的食物形态,使人们更易于接受这类蛋白质。目前仅部分昆虫蛋白粉的营养价值、理化属性和推广发展的合理性被明确,但这并不意味着大众能够接受,同时也要配套制定相关安全规定,以保障食品安全。

### 2.2 植物蛋白质

根据近十年的文献检索发现:植物性食物对健康的积极影响已得到广泛认可,对植物蛋白材料的研究显著增多<sup>[26]</sup>,尤其是对豆科植物(大豆、鹰嘴豆、豌豆等)蛋白和谷物分离蛋白(小麦蛋白、玉米醇溶蛋白、大米蛋白、高粱醇溶蛋白、燕麦蛋白等)的研究。

豆科植物蛋白因为极易获得而广为人知。大豆分离蛋白(Soybean protein isolate, SPI)富含人体必需氨基酸,具备相当优异的食品加工性能<sup>[60]</sup>。目前对大豆蛋白3D-FP的研究主要集中于添加亲水胶体或者将大豆蛋白作为乳化剂和稳定剂来改善大豆蛋白类

食品油墨的流变性能。已有研究表明,SPI与亲水胶体(海藻酸钠和明胶)混合可以形成理想的印刷材料<sup>[61]</sup>。在3D-FP加工研究中,随着SPI添加量的增加,虾肉糜的弹性、硬度和结构稳定性得到显著改善;添加6% SPI的虾肉糜打印精确度和打印稳定性最高<sup>[62]</sup>。此外,可通过微波诱导增强SPI的可打印性和即时固化性能<sup>[63]</sup>。SPI虽富含人体必需氨基酸,但其蛋白质消化率校正后氨基酸分数(PDCAAS)较低,为此人们开始寻找同样具备完整氨基酸结构又有较高PDCAAS的蛋白来源。其中,豌豆蛋白因富含蛋氨酸外的必需蛋白、对凝胶温度要求低、吸湿能力强而使用最多<sup>[40]</sup>。豌豆蛋白与马铃薯淀粉混合的3D打印材料中,添加1%豌豆蛋白的打印质量最好<sup>[30]</sup>。豌豆蛋白与海藻酸钠质量比为1:4的3D-FP可打印性能表现最佳<sup>[8]</sup>。有研究表明,豌豆分离蛋白的添加促进了食品蛋白质含量的增加和营养价值的提升;此外,新鲜豌豆-胡萝卜-白菜制作的蔬菜型3D-FP食品适合吞咽困难患者食用,并具备足够的营养成分和稳定的结构<sup>[64]</sup>。

谷物蛋白主要存储于植物的胚乳中,含量一般为7%~15%<sup>[65]</sup>。与大豆蛋白相比,谷物蛋白拥有不同的营养及功能特性<sup>[66]</sup>。在大豆蛋白中添加小麦面筋蛋白可更大限度地提高其所产生风味物质的多样性<sup>[67]</sup>。Guo等<sup>[68]</sup>研究证明,在大豆蛋白中添加适量的小麦面筋蛋白,有利于弥补氨基酸含量的不足,并在挤压成肉类类似物时减少挥发性风味物质的损耗。苋菜、藜麦、白藜为富含纤维素的无麸质蛋白,它们与玉米粉混合后经过挤压可得到新型无麸质零食,3种食材因膳食纤维含量(苋菜<藜麦<白藜)差异造成产品截面扩张指数和硬度不同<sup>[69]</sup>。玉米醇溶蛋白富含亮氨酸、谷氨酸和丙氨酸,可以用于制备功能性多肽。添加玉米醇溶蛋白的小麦面团可将面筋形成的连续网络改为纤维网络结构。近年来有研究证明,玉米醇溶蛋白还可作为食品原料的纤维材料,为制作肉类类似物产品提供基础<sup>[69]</sup>。谷朊粉的原料是小麦粉,主要成分是面筋蛋白,多应用在面食产品中。当前,对于谷朊粉的研究集中于其自身特性(黏弹性、吸水性等)及作为面粉中添加物在糊化、流变等方面所产生的影响<sup>[70]</sup>。随着消费者对健康和粮食安全的日益关注,植物蛋白的应用不再满足于面粉制品,于是开始探究制备口感和风味兼备的素肉制品,例如SPI复配经3D打印制备成植物肉<sup>[71]</sup>;豌豆蛋白复配处理后可制备成适合特定群体的人造牛排<sup>[72]</sup>。

上述研究表明,目前已基本掌握豆类蛋白、谷物

蛋白的材料性能及其应用于3D-FP中的打印性能和稳定性,但对于潜在植物蛋白,如坚果、植物叶片、花蕊中的蛋白质<sup>[73]</sup>的相关探究较少。有研究证明,植物叶片蛋白因其低成本、易获得、富含氨基酸,可作为食品中蛋白的补充剂<sup>[74-76]</sup>。研究发现,水葫芦叶片的蛋白质含量可达50%<sup>[77]</sup>,菠萝蜜植物叶子的蛋白质含量为65.82 g/100 g<sup>[78]</sup>,南瓜和苋菜叶片的蛋白质含量分别为11.75%和10.7%<sup>[79]</sup>。桑叶蛋白在预防和治疗溃疡式结肠炎方面具有良好功效<sup>[80]</sup>。还有研究表明,牡丹花蕊蛋白能够明显提高面团的硬度、黏着性和咀嚼性,添加量低于6%时效果优于SPI;其能有效地促进面筋蛋白网络结构的形成,提高面团的品质<sup>[81]</sup>。尽管这些新型蛋白质来源更加环保、营养丰富且具备药用功能,但未来还需要系统地研究其特性,以充分发挥其在3D打印食品领域的巨大潜力。

### 2.3 其他蛋白质

微藻被认为是最有前途的蛋白质替代植物之一,这是因为微藻含有高达50%的蛋白质,并且具有出色的氨基酸组成,在满足人们对可持续食品供应需求方面具有巨大的潜力<sup>[82-83]</sup>。小球藻是绿藻门的球形成员,因为其蛋白质含量高(51%~58%),作为食品补充剂和蛋白营养强化剂。小球藻富含多种氨基酸,其他有益营养素( $\beta$ -1,3-葡聚糖、维生素(VB复合物和抗坏血酸))、矿物质(镁、铁和钙)、 $\beta$ -胡萝卜素、叶绿素和小球藻生长因子也较为丰富<sup>[84-86]</sup>。小球藻粉的替代添加可提高面包中蛋白质、叶黄素、脂肪酸的含量,提高无麸质面包的营养品质<sup>[20]</sup>。An等<sup>[32]</sup>在研究3种形态的球藻油墨(新鲜小球藻、脱水小球藻干粉末和小球藻干粉与马铃薯淀粉混合物)打印效果时发现,重新水化的小球藻凝胶比新鲜小球藻所形成的凝胶更优质。此外,延长复水时间、加热处理和添加淀粉明显有助于提高复水小球藻粉末的三维成型性。这些研究为藻类与其他成分结合形成新型3D-FP蛋白质产品提供了可能性。然而目前藻类的培养和加工技术尚不发达,需要提高技术成熟度以改变现状。同时考虑到消费者的健康及安全,藻类加工过程中的食品安全问题也应加以更多的关注。

菌类因数量大、种类多、分布广,是另一个可利用群体。Derossi等<sup>[87]</sup>将牛肠杆菌干粉作为钙、铁和蛋白质的来源,添加到一种专为儿童设计的3D打印零食中,证明了菌类作为3D打印材料的可行性。Keerthana等<sup>[18]</sup>利用食品3D打印技术,在试验中尝试了不同比例的双孢蘑菇粉与小麦粉的组合以改善小麦面

团的理化特性、营养价值与香气,制作出理化性质优良的蘑菇饼干,这为利用3D打印技术可持续地在个性化营养方面开发食物提供了参考和依据。同时,采用连续流动发酵技术发酵链孢霉菌(*Fusarium venenatum* A3/5)得到的菌丝体发酵产物——菌类蛋白也被广泛应用<sup>[88]</sup>。纤维素含量高、脂肪含量低这两大特性决定了菌类蛋白在人造肉生产制造领域的应用

前景<sup>[89]</sup>。自然界中的微生物数量庞大,是食品蛋白资源宝库,但其开发还存在局限性。在菌类蛋白和人造肉加工生产中,具备安全性和良好加工性的可食用真菌已经展现出高利用价值和广阔的市场前景。目前,对食用菌的菌类蛋白产物探寻力度和深度不够,未来应加大挖掘食用菌的潜力。表1为对上述蛋白质分类的汇总。

表1 可用于3D食品打印的蛋白来源  
Table 1 Protein sources that can be used for 3D food printing

类别	蛋白材料	特性	打印产品	参考文献
动物蛋白	鱼糜肌原纤维蛋白	剪切变稀性,鱼糜凝胶强度高	肉糜凝胶	[50-54]
	黄粉虫分离蛋白	蛋白质含量48%~66%	零食	[56-57]
	蟋蟀干粉	蛋白质含量63.43%	待开发	[58]
植物蛋白	大豆分离蛋白	8种人体必需氨基酸,溶解性、持水性、起泡性、乳化性、凝胶性等食品加工性能优异	蛋白凝胶、人造肉	[61-63]
	豌豆蛋白	富含蛋氨酸以外的必需氨基酸,凝胶化温度低,吸湿能力强	面粉制品	[8,64,72]
	小麦蛋白	提供更多碳源,弥补大豆蛋白中谷氨酸不足	面粉制品	[67-68,71]
	玉米醇溶蛋白	改为纤维网络结构	肉类类似物	[69]
	水葫芦蛋白	蛋白质含量50%	待开发	[77]
	菠萝蜜叶片蛋白	蛋白质含量65.82 g/100 g	待开发	[78]
	南瓜叶片蛋白	蛋白质含量11.75%	待开发	[79]
	苋菜叶片蛋白	蛋白质含量10.7%	待开发	[30]
	牡丹花蕊蛋白			[80]
藻类蛋白	小球藻	富含多达18种氨基酸,其中必需氨基酸含量占总氨基酸含量的42%,还含有许多其他有益营养素	无麸质面包	[20,32]
菌类蛋白	牛肠杆菌	钙、铁和蛋白质	零食	[87]
	双孢蘑菇粉	改善小麦面团的理化特性、营养价值和香气	饼干	[18]

### 3 3D-FP中蛋白质的改性

随着功能性复合食品的出现和发展,在对3D-FP材料特性的探究中需重点关注蛋白质与各组分间的相互作用,探究蛋白质材料的流变性能和热性能,以获得满足预期的食品。

#### 3.1 多酚类物质对蛋白质3D-FP产品的改性

蛋白质与多酚的结合既能改善蛋白质的功能性质,又能提高多酚类化合物的利用度和生物利用率。自然界中存在的大多数蛋白质和植物多酚类化合物是通过非共价结合而存在的。闫馨月等<sup>[90]</sup>发现,大豆蛋白中的 $\beta$ -伴大豆蛋白(7S)和豆球蛋白(11S)分别通过氢键和疏水作用与黄芩素结合,可改善打印凝胶的热稳定性。然而,由共价键形成的复合物更适用于食品,因为它们具有更强和更持久的高稳定性。不同蛋白质与多酚结合的能力不同。王晨等<sup>[91]</sup>利用荧光光谱法和傅里叶变换红外光谱法分析,发现花青素与小麦醇溶蛋白、麦谷蛋白的结合作用不同,前

者是疏水作用,后者是范德华力和氢键。白藜芦醇和小麦醇溶蛋白的结合作用和花青素相同,但与玉米醇溶蛋白主要通过氢键作用结合。总酚含量是影响蛋白质质构特性的重要因素。胡莹等<sup>[92]</sup>研究发现,茶多酚添加量对大豆蛋白素肉的质构、色泽和微观结构等方面均有影响。增加茶多酚添加量,食物的硬度、胶着性、咀嚼性及拉伸强度均呈现先降低后升高的趋势(图3A)。然而,蛋白质与多酚类物质发生哪种相互作用取决于两者浓度,可通过不同的检测手段探究相互力的转变机制,以达到使打印材料具备更好塑性效果的目的。

#### 3.2 多糖类物质对蛋白质3D-FP产品的改性

蛋白质与多糖类物质(简称多糖)之间的作用以非共价结合为主,如多糖与蛋白质的物理交联促进疏水作用,淀粉中大量的-OH决定了氢键是淀粉和蛋白之间的亲水作用力,多糖的阴离子基团和蛋白质上的带正电基团会产生静电相互作用力。在蛋白质3D打印原料中添加多糖类化合物能够改善材料的流

动性、黏度及硬度。Ji等<sup>[7]</sup>探究了酪蛋白与木薯淀粉凝胶3D打印性能的潜在机制,结果表明,随着酪蛋白含量的增加,3D打印产品的精度得以提高。这是由于随着酪蛋白含量增加,在热处理后降低了淀粉短程有序结构,从而增加了凝胶的弹性和刚性(图3B)。Liu等<sup>[93]</sup>利用低场核磁共振研究了不同种类以及不同添加量的淀粉对于鱼糜蛋白持水性、流变特性以及3D打印能力的影响(图3C)。Pan等<sup>[94]</sup>通过添加金针菇多糖解决了大豆分离蛋白水凝胶重塑中存在的问题,这是因为大豆蛋白从金针菇多糖中引入-OH后增强了 $\beta$ -片状物结构的生成,降低了凝胶黏性和强度,使水凝胶可以更轻易地挤出,微观结构上更加均匀和致密(图3D)。金针菇多糖的添加成功地改善了水凝胶的特性,从而使其具备3D打印特性。这也成功证实了天然多糖具有改善蛋白质3D打印性质的作用。

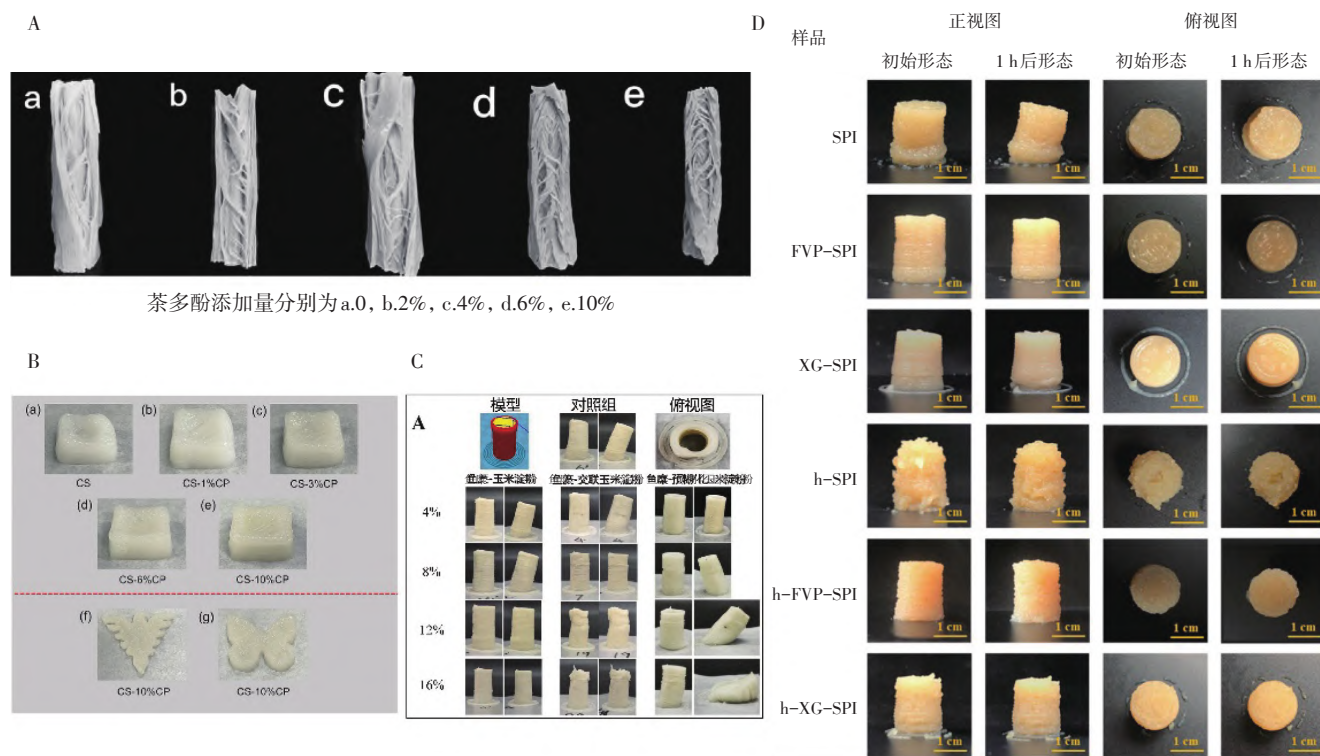
### 3.3 油脂对蛋白质3D-FP产品的改性

脂类物质有助于多方位改善蛋白类食物的感官,提高产品硬度、润滑度。在鱼糜加工处理中难免发生脂质的损失,因此通常添加植物油、起酥油等外源性油脂来弥补,以改善鱼糜制品的质地和风味。油脂的添加占据了蛋白质基质的孔隙,改变了蛋白质的二级结构和微环境,保护了凝胶网络结构的完

整性,使产品风味和口感得以改良,保水性和多汁性得以提高,弹性和色泽得以改善,凝胶强度和白度得以提高。Zhou等<sup>[95]</sup>研究发现,油茶籽油浓度对鱼糜质地和蛋白质二级结构有着积极作用,与鱼糜凝胶的凝胶强度、乳液稳定性和保水能力呈正相关,离子键和疏水相互作用力指数随油脂浓度的升高而增加。冷冻扫描电镜和拉曼光谱结果显示,油脂的添加能够增加蛋白质二级结构含量,增强凝胶三维网络的稳定性。在蛋白质凝胶形成过程中,油脂和蛋白质的互作关系首先表现在界面蛋白膜形成过程中所需蛋白质间的相互作用,其次是油脂与界面蛋白膜间的相互作用<sup>[90]</sup>。油脂和蛋白质间最终形成油脂-界面蛋白膜-蛋白质基质乳化体系。Shao等<sup>[96]</sup>研究结果显示,加热导致 $\beta$ -折叠结构的增加和其疏水作用的增强,表明油脂可以改变鱼糜蛋白质的微环境,提高蛋白凝胶性能。目前为了降低饱和脂肪酸含量,逐渐用植物油脂代替动物油脂。但油脂的种类和pH值都会影响油脂与蛋白质间的作用力,因此在选用脂类添加剂提高蛋白质凝胶性能时要对环境参数多加注意。

### 3.4 外源蛋白对蛋白质3D-FP产品的改性

在加工处理过程中,外源蛋白一般扮演抑制剂或交联剂的角色。外源蛋白的添加会改变蛋白质浓



注:A.不同茶多酚添加量的大豆蛋白素肉;B.不同含量酪蛋白-木薯淀粉打印产品(CP表示酪蛋白,CS表示木薯淀粉);C.淀粉种类和含量对鱼糜蛋白3D打印性能的影响;D.金针菇多糖(FVP)-大豆分离蛋白(SPI)复合水凝胶3D打印性能(h表示加热,XG表示黄原胶)。

图3 部分食品3D打印中蛋白质改性后的打印产品图<sup>[7,92-94]</sup>

Fig.3 Some printed products using 3D food printing with modified protein<sup>[7,92-94]</sup>

度,对体系分散性和组织化改性,影响蛋白质间相互作用。一般豆类蛋白均含有蛋白酶抑制剂,其可起到改善凝胶性能、抑制凝胶自溶的作用。Kudre等<sup>[97]</sup>探究发现,黑豆分离蛋白和绿豆分离蛋白具有明显抑制沙丁鱼鱼糜蛋白水解酶的效果,对肉糜凝胶化、持水性有促进作用。研究发现,大豆分离蛋白、花生分离蛋白或大豆分离蛋白、大米分离蛋白这两种混合外源蛋白的添加有利于增强凝胶密度,促进肌原纤维蛋白(MP)自凝胶化。动物性蛋白的添加对蛋白质基质的效果相似,但作用机制略有不同<sup>[98]</sup>。Rawdkuen等<sup>[99]</sup>研究发现,乳清浓缩蛋白表现为外源抑制鱼糜自溶剂,同时乳清浓缩蛋白的添加浓度与鱼糜凝胶强度、保水性呈正相关。外源蛋白的交联剂作用则可表现在与MP相互作用、相互交联、氢键和疏水相互作用力促进凝胶网络的形成上。Wang等<sup>[100]</sup>通过向未漂洗鱼糜中加入不同添加量的鸡胸肉后,显

著提升了肌动蛋白含量和凝胶性能,产品表面更加光滑,凝胶网络更致密。这说明在混合过程中其可促进蛋白质间的交联,改善网络结构。综上可知,不同种类外源蛋白的添加能够对蛋白凝胶特性和品质起到积极影响。

酶类蛋白中主要以谷氨酰胺转氨酶(Transglutaminase, TGase)作为外源蛋白添加剂。TGase酶能够催化蛋白质中赖氨酸残基上的 $\epsilon$ -氨基和谷氨酸残基上的 $\gamma$ -酰胺基发生转酰基反应,诱导蛋白质分子内和分子间生成 $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷酰胺)-赖氨酸共价键,促进鱼糜蛋白凝胶网络结构的形成<sup>[50,54]</sup>,从而改善产品的口感、风味及质地等。此外,蛋白质易受到生存、加工环境的影响,需要注意pH值对蛋白质表面电荷和溶解度的促进(或抑制)效果,不利的环境会使蛋白质变性而无法达到改善凝胶结构、提高打印效果的目的。综上所述,不同类别外源添加物对蛋白质3D-FP产品的改性不同(表2)。

表2 3D食品打印中蛋白质的改性  
Table 2 Modification of proteins in 3D food printing

外源添加物		蛋白来源	相互作用力	产品特性	参考文献
分类	名称				
多酚类	黄芩素	大豆蛋白	氢键和疏水相互作用	降低表面疏水性,提高打印凝胶热稳定性	[90]
	花青素	小麦醇溶蛋白	疏水相互作用		[91]
		麦谷蛋白	范德华力和氢键		
	白藜芦醇	小麦醇溶蛋白	疏水相互作用		
多糖类	茶多酚	大豆蛋白	待研究	提高产品硬度、咀嚼性,茶多酚含量与大豆蛋白瘦肉颜色呈正相关	[92]
	木薯淀粉	酪蛋白	淀粉和蛋白质竞争水,减少糊化过程中淀粉链浸出	增加凝胶弹性和刚性,提高3D打印精度	[7]
	淀粉	鱼糜蛋白	淀粉-肌原纤维蛋白相互作用	淀粉含量和种类在不同程度上影响鱼糜蛋白3D打印性能,如黏弹性等	[93]
	金针菇多糖	大豆分离蛋白	氢键	降低凝胶黏性和强度,更易挤出,更稳定	[94]
油脂类	茶油	鱼糜蛋白	脂质引起疏水基团暴露,疏水性侧链嵌入到油滴中,形成更强的脂质-蛋白相互作用	提高鱼糜凝胶硬度、持水性、离子键和疏水相互作用。改变鱼糜蛋白的二级结构, $\beta$ -折叠含量增加,从而形成较坚固的结构	[95]
外源蛋白	黑豆分离蛋白和绿豆分离蛋白	鱼糜蛋白	待研究	抑制蛋白凝胶自溶现象,提高鱼糜凝胶强度和保水性	[97]
	大豆分离蛋白、花生分离蛋白、大米分离蛋白或混合蛋白	肌原纤维蛋白	疏水作用和二硫键	促进鱼糜蛋白自凝胶化,提高凝胶质量	[98]
	鸡胸肉	鱼糜蛋白	氢键和疏水作用提高凝胶网络形成能力	鱼糜凝胶网络结构更加均匀和致密,凝胶的持水性和含水率显著提高	[100]
	谷氨酰胺转移酶	鱼糜蛋白	催化蛋白质中赖氨酸残基上的 $\epsilon$ 氨基和谷氨酸残基上的 $\gamma$ -酰胺基发生转酰基反应,诱导蛋白质分子内和分子间生成 $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷酰胺)-赖氨酸共价键,发生交联反应	促进鱼糜蛋白凝胶网络结构的形成,改善口味、质地等	[50]

#### 4 预处理及后加工对蛋白质3D-FP的影响

打印精度和形状稳定性是3D-FP目前面临的巨大挑战。为了开发出性能更好的材料,借助热处理、微波、超声波、高压等方法对材料进行预处理或加工后处理,可提高打印精度和材料的稳定性<sup>[26,101]</sup>。

水浴加热是最常用的热处理方法,依据食品材料对温度的热敏性而应用于3D-FP中。许多研究利用这种机制对蛋白质或其复配原料进行打印前处理。Liu等<sup>[102]</sup>将蛋清蛋白溶液与明胶、玉米淀粉和蔗糖的混合物在55℃水浴下制备成具有可打印性的复合打印材料。Lille等<sup>[103]</sup>将30%黑麦麸皮、35%燕麦浓缩蛋白或45%蚕豆浓缩蛋白混合,经水浴加热后形成用于3D打印的凝胶,打印后产品的稳定性高。将乳清蛋白分离物和乳蛋白浓缩物以质量比2:5的比例混合并添加一定量的甘油和黄原胶,也可以成功地进行3D打印<sup>[33]</sup>。

3D-FP蛋白产品大多处于液态或半固态,在包装和运输过程中易发生形变,微波协同3D-FP热处理方式能有效解决这一问题。Yang等<sup>[104]</sup>研究微波真空干燥后处理方式对芒果汁凝胶的影响,比较不同干燥时间下打印产品的风味、质地、水分分布和介电性能,发现经过4 min微波真空干燥处理后得到的产品表现出最佳的形状稳定性和准确性。赵子龙<sup>[105]</sup>采用微波3D打印协同方法完成了打印过程中鱼糜的液固转变。Yu等<sup>[63]</sup>将大豆蛋白与半胱氨酸微波加热不同时间(20、25、30 min)以提高其打印性和自凝胶化,转谷氨酰胺酶与微波协同作用形成的 $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷氨酰胺)共价键作用有助于形成稳定的凝胶网络结构,从而实现大豆蛋白凝胶的液固转变。Fan等<sup>[101]</sup>研究了微波-盐协同预处理对大豆分离蛋白-草莓油墨3D打印性能和自支撑性能的影响,结果表明,盐和微波处理可以显著提高这类油墨的打印精度和自支撑性能。微波干燥方式能更好地保留营养成分,同时确保颜色和质地特性的最小变化,甚至引起风味变化。但并不是所有的材料都能通过微波处理得到改善。

超声波技术被认为是一种具有应用前景的环保技术。因蛋白质易受高压均质过程中的空穴效应影响,使蛋白乳化性质等发生改变,因此超声波通常在蛋白质最终产品生产前应用。超声波主要通过促进不同蛋白质类食物基质中蛋白质与其他膳食成分相互作用,从而提高打印材料的稳定性<sup>[106]</sup>。Ma等<sup>[107]</sup>研究了超声波处理后蛋白质基质中发生的静电相互作用,

表明450 W、70℃的超声波处理能显著加快大豆分离蛋白与多糖(柑橘果胶/苹果果胶)的结合。Chen等<sup>[108]</sup>在探究超声波处理对鲢鱼鱼糜3D打印特性的影响中发现:频率100 kHz、功率300 W、持续时间45 min的超声波处理可减少对蛋白质结构特征的损伤,并增加其与水的相互作用。Chen等<sup>[109]</sup>使用超声波(20/23 kHz,400 W,10 min,10℃)加强鸡肉糜和黄芩素之间的氢键和疏水性作用,从而减少对油的需求,增强凝胶的抗氧化能力。此外,采用超声波和植物半胱氨酸蛋白酶可制成适合老年人的嫩化人造肉<sup>[110]</sup>。

超高压技术是一种非热处理加工技术,以水或流体作为介质传导压力,可瞬时破坏共价键,不同程度改变肽链折叠层度和蛋白质分子结构<sup>[111]</sup>。超高压的作用体现在以下几方面:①加强蛋白质打印凝胶强度。王炳智<sup>[112]</sup>研究了不同高压对小麦面筋蛋白的影响,发现随着压力的增强,打印凝胶强度增大。这表明超高压技术对蛋白质分子结构的展开、疏水相互作用力、三维网络结构的形成起到了积极作用。②提高蛋白质的乳化性和起泡性。周一鸣等<sup>[113]</sup>在研究高静水压对荞麦蛋白功能性质的影响中对此予以了证明。此外,研究证明,超高压对蛋白质结构和其水合特性也有一定的影响。超高压处理对共价键的瞬时破坏,导致二硫键、疏水基团和其他官能团暴露,蛋白质分子受到拉伸,影响蛋白质的溶解性和持水性。压力为0~600 MPa时,溶解性随压力的增加表现为先下降后上升<sup>[114]</sup>。黄薇<sup>[115]</sup>的研究结果表明:同样进行超高压处理,面筋蛋白和小麦醇溶蛋白的溶解性变化趋势与麦谷蛋白相反;超高压处理下蛋白的持水性和蛋白种类相关。戴彩霞等<sup>[116]</sup>研究超高压对菜籽蛋白功能性质和结构的影响时,发现超高压处理菜籽蛋白质时,其溶解性受蛋白所处环境的酸碱度影响。高压作用力、蛋白种类和反应环境条件(温度、pH等)因素不同程度上共同影响着蛋白质的水合特性。根据上述提到的处理方式按其对应蛋白质3D-FP的影响进行了归纳(见表3)。

#### 5 蛋白质3D-FP性能检测技术

黏弹性、剪切变稀性的流变特性和快速恢复性能是3D打印成功的关键。研究人员利用低场核磁共振(Low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)分析水分迁移变化时发现,弛豫时间和相应的峰面积等参数与食品油墨的剪切稀释和黏弹性具有很强的相关性<sup>[117-118]</sup>。LF-NMR是一种可以观察到物质质量

表3 预处理及后加工对蛋白质3D-FP的影响  
Table 3 Effect of pretreatment and post-processing on protein products prepared by 3D-FP

处理方法	原理	原料	产品特性	参考文献
水浴加热	食品材料的热敏性	30% 黑麦麸皮、35% 燕麦浓缩蛋白或 45% 蚕豆浓缩蛋白混合	打印后产品的稳定性高	[103]
微波加热	转换效率高、速度快、加热均匀且易控制	大豆蛋白与半胱氨酸	提高材料的打印性和自凝胶化	[63]
微波-盐协同	用相同微波功率预处理的含盐油墨的印刷性和稳定性显著提高	大豆分离蛋白和冻干草莓粉	显著提高这类油墨的打印精度和自支撑性能	[101]
超声波	促进不同蛋白质类食物基质中蛋白质与其他膳食成分相互作用	鸡肉糜和黄芩素	加强鸡肉糜和黄芩素之间的氢键和疏水性接触,增强凝胶的抗氧化能力	[109]
超高压	加强蛋白质打印凝胶强度,提高蛋白质的乳化性和起泡性	小麦面筋蛋白	超高压处理使蛋白质分子结构展开,分子间疏水相互作用增强,形成三维网络结构	[112]

变化、水相和水分子结合状态的检测手段。该技术的使用证明了淀粉改善肉糜流变性和打印性时,水分分布也会随之改变<sup>[119]</sup>。Liu等<sup>[93]</sup>的聚类分析结果发现,淀粉种类、淀粉添加量、水分和流变性能与鱼糜3D打印性能密切相关。以上研究均为LF-NMR可作为预测食材的流变性能并评价其3D打印性能的手段提供了理论依据。

近红外光谱法(Near infrared spectrometry, NIR)是数字化分析仪器和化学计量学方法的结合形成的研究方法,可用于分析食品中脂肪、蛋白质、氨基酸等含量,并据此评定食品品质。食品中胶体颗粒的大小对乳制品的理化、功能和感官特性有相当大的影响。利用NIR可以对牛奶样品中的脂肪球大小进行定量分析<sup>[120]</sup>。NIR在食品行业中作为检测工具体系还需进一步完善,但利用该技术对食品类成分与功能进行预测或测量无疑是食品加工和3D-FP中一个不错的检测与评价方法。

傅立叶红外光谱(FTIR)和拉曼光谱所呈现的图谱已经成为蛋白质二级构象信息的可靠数据分析来源<sup>[121]</sup>。康怀彬等<sup>[122]</sup>采用FTIR研究高温对蛋白结构的影响,发现温度升高时, $\alpha$ -螺旋结构会向无规卷曲结构转变,对蛋白凝胶性和持水性有负面影响。Zheng等<sup>[123]</sup>采用FTIR研究发现,肉糜加工制备中,盐可改变水分分布和蛋白质二级结构含量,改善肉制品品质。

上述方法均能用来检测蛋白质材料的打印特性和评估打印产品的恢复性及稳定性。但对其单独使用仅能从水分分布或蛋白质结构上对产品进行评价。因此,在探究新型蛋白质打印材料时应以上方法进行复合使用,这有利于更全面、更透彻地分析产品特性。如Yang等<sup>[124]</sup>采用LF-NMR和拉曼光谱法相结合的研究方法,从低场磁场和pH两

个角度对提高猪肉糜凝胶特性的机理进行更全面地探究。

## 6 展望

本文对3D打印技术应用于食品行业的优势及发展趋势进行了概述,总结了不同种类蛋白质及其3D打印产品特性的改变,并分析了蛋白质与各食物组分间的相互作用力对3D-FP产品的影响,这将有助于开发新型的多组分蛋白质3D-FP食品,提高蛋白质应用的广度或深度。但是,目前蛋白质3D-FP食品主要面临两方面的挑战:一方面是如何发掘更多可以应用于3D-FP的蛋白质材料。由于打印特性与食品材料自身的理化性质相关,有些材料难以直接进行打印。为解决这一问题,可以优化蛋白质与不同食品组分间的作用力或通过预处理方式改善自凝胶性、假塑性,使其具备可打印的能力。参照鱼糜蛋白、大豆分离蛋白、小麦醇溶蛋白成熟的体系研究,加深藻类蛋白、昆虫分离蛋白、植物叶片蛋白、农林副产品蛋白、坚果蛋白等潜在蛋白质来源的探究。另一方面,蛋白质复合组分3D-FP食品如何以更好的风味、造型呈现,以适应当前消费者市场和个性化营养市场。应该宏观把握前沿技术发展和市场需求动向,进一步推敲细化多元组分相互作用对蛋白凝胶的影响,完善复合凝胶理论体系,拓宽3D-FP食品加工来源和增强食物成品效果。同时,多种技术的结合是未来食品加工发展趋势,如人工智能与3D-FP有效结合等。综上所述,3D-FP具有广阔的应用前景,有必要进一步加强3D-FP和蛋白质结合的探究。当然,3D-FP技术还有很长的探索之路,本综述抛砖引玉,以期对新蛋白来源的开发、活性成分的添加、食品感官的丰富性加以更多关注,共同面对3D-FP新的挑战。

## 参考文献:

- [1] 周小理, 马思佳, 欧阳博雅, 等. 膳食结构新需求下营养主导型农业的对策研究[J]. 食品工业, 2021, 42(7): 212-215.
- [2] MIKULA K, SKRZYPCZAK D, IZYDORCZYK G, et al. 3D printing filament as a second life of waste plastics—A review [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(10): 12321-12333. DOI:10.1007/s11356-020-10657-8.
- [3] CHUNG K C, SHU M H, WANG Y C, et al. 3D printing technologies applied to the manufacturing of aircraft components [J/OL]. Modern Physics Letters B, 2020, 34[2022-12-07]. <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S021798-4920400187>. DOI:10.1142/S0217984920400187.
- [4] JIANG W, MEI H Y, ZHAO S Y. Applications of 3D bio-printing in tissue engineering and biomedicine[J]. Journal of Biomedical Nanotechnology, 2021, 17(6): 989-1006. DOI: 10.1166/jbn.2021.3078.
- [5] SOMMER A C, BLUMENTHAL E Z. Implementations of 3D printing in ophthalmology[J]. Graefe's Archive for Clinical Experimental Ophthalmology, 2019, 257(9): 1815-1822. DOI: 10.1007/s00417-019-04312-3.
- [6] DEMEI K, ZHANG M, PHUHONGSUNG P, et al. 3D food printing: Controlling characteristics and improving technological effect during food processing[J/OL]. Food Research International, 2022, 156[2022-12-07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35651001/>. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111120.
- [7] JI S Y, XU T, LIU Y, et al. Investigation of the mechanism of casein protein to enhance 3D printing accuracy of cassava starch gel[J/OL]. Carbohydrate Polymers, 2022, 295[2022-12-07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35988994/>. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119827.
- [8] OYINLOYE T M, YOON W B. Stability of 3D printing using a mixture of pea protein and alginate: Precision and application of additive layer manufacturing simulation approach for stress distribution[J/OL]. Journal of Food Engineering, 2021, 288[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877420302259?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110127.
- [9] ZHU X, LI H J, HUANG L F, et al. 3D printing promotes the development of drugs[J/OL]. Biomed Pharmacother, 2020, 131[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0753332220308374>. DOI:10.1016/j.biopha.2020.110644.
- [10] PÉREZ B, NYKVIST H, BRØGGER A F, et al. Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review[J]. Food Chemistry, 2019, 287: 249-257. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.02.090.
- [11] BEDOYA M G, MONTOYA D R, TABILO-MUNIZAGA G, et al. Promising perspectives on novel protein food sources combining artificial intelligence and 3D food printing for food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 128: 38-52. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.05.013.
- [12] PHUHONGSUNG P, ZHANG M, BHANDARI B. 4D printing of products based on soy protein isolate via microwave heating for flavor development[J/OL]. Food Research International, 2020, 137[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096399692030630X>. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109605.
- [13] HUSSAIN S, ARORA V K, MALAKAR S. Formulation of protein-enriched 3D printable food matrix and evaluation of textural, rheological characteristics, and printing stability[J/OL]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(2)[2022-12-07]. <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf-direct/10.1111/jfpp.15182>. DOI: 10.1111/jfpp.15182.
- [14] TAVARES-NEGRETE J A, ACEVES-COLIN A E, RIVERA-FLORES D C, et al. Three-dimensional printing using a maize protein: Zein-based inks in biomedical applications [J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2021, 7(8): 3964-3979. DOI: 10.1021/acsbomaterials.1c00544.
- [15] ROA-ACOSTA D F, BRAVO-GÓMEZ J E, GARCÍA-PARRA M A, et al. Hyper-protein quinoa flour (*Chenopodium Quinoa* Wild): Monitoring and study of structural and rheological properties[J/OL]. LWT—Food Science and Technology, 2020, 121 [2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643819312940>. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108952.
- [16] RAMOS DIAZ J M, KIRJORANTA S, TENITZ S, et al. Use of amaranth, quinoa and kañiwa in extruded corn-based snacks[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(1): 59-67. DOI:10.1016/j.jcs.2013.04.003.
- [17] KRISHNARAJ P, ANUKIRUTHIKA T, CHOUDHARY P, et al. 3D extrusion printing and post-processing of fibre-rich snack from indigenous composite flour[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(10): 1776-1786. DOI: 10.1007/s11947-019-02336-5.
- [18] KEERTHANA K, ANUKIRUTHIKA T, MOSES J A, et al. Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: A study on button mushroom[J/OL]. Journal of Food Engineering, 2020, 287[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877420302144>. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110116.
- [19] CAPORGNO M P, MATHYS A. Trends in microalgae incorporation into innovative food products with potential health benefits[J/OL]. Frontiers in Nutrition, 2018, 5[2022-12-07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30109233/>. DOI: 10.3389/fnut.2018.00058.
- [20] DIPRAT A B, SILVEIRA THYS R C, RODRIGUES E, et al. Chlorella sorokiniana: A new alternative source of carot-

- enoids and proteins for gluten-free bread[J/OL]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 134 [2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S00236438203-09634>. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109974.
- [21] KIM T K, YONG H I, CHUN H H, et al. Changes of amino acid composition and protein technical functionality of edible insects by extracting steps[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2020, 23(2): 298-305. DOI: 10.1016/j.aspen.2019.12.017.
- [22] 陈臣, 周琪琪, 于海燕, 等. 蛋白质-香气化合物结合作用的研究方法及其影响因素研究进展[J/OL]. *食品科学*, 2022 [2022-12-07]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD65GW-j5UxcG6fi5v9\\_5nJoHRW17lppKxJupoSQZBu0KNJGX8hlsQ-xwqD&uniplatform=NZKPT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD65GW-j5UxcG6fi5v9_5nJoHRW17lppKxJupoSQZBu0KNJGX8hlsQ-xwqD&uniplatform=NZKPT).
- [23] MA T, LÜ L X, OUYANG C Z, et al. Rheological behavior and particle alignment of cellulose nanocrystal and its composite hydrogels during 3D printing[J/OL]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 253 [2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861720313904>. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117217.
- [24] KANG D H, LOUIS F, LIU H, et al. Engineered whole cut meat-like tissue by the assembly of cell fibers using tendon-gel integrated bioprinting[J/OL]. *Nature Communications*, 2021, 12(1) [2022-12-07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34429413/>. DOI: 10.1038/s41467-021-25236-9.
- [25] 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/OL]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112 [2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X20316131>. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.106358.
- [26] WANG M S, LI D N, ZANG Z H, et al. 3D food printing: Applications of plant-based materials in extrusion-based food printing[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 62(26): 7184-7198. DOI: 10.1080/10408398.2021.1911929.
- [27] DANKAR I, HADDARAH A, OMAR F E L, et al. 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75: 231-242. DOI: 10.1016/j.tifs.2018.03.018.
- [28] WANG H X, HU L D, PENG L, et al. Dual encapsulation of  $\beta$ -carotene by  $\beta$ -cyclodextrin and chitosan for 3D printing application[J/OL]. *Food Chemistry*, 2022, 378 [2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814622000498>. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132088.
- [29] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [30] 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*, 2018, 59(19): 3074-3081. DOI: 10.1080/10408398.2018.1481823.
- [31] CHENG Y, FU Y, MA L, et al. Rheology of edible food inks from 2D/3D/4D printing, and its role in future 5D/6D printing[J/OL]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 132 [2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005-X22003757>. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107855.
- [32] AN Y J, GUO C F, ZHANG M, et al. Investigation on characteristics of 3D printing using *Nostoc sphaeroides* biomass[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(2): 639-646. DOI: 10.1002/jsfa.9226.
- [33] LIU Y W, LIU D S, WEI G M, et al. 3D printed milk protein food simulant: Improving the printing performance of milk protein concentration by incorporating whey protein isolate[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 49: 116-126. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.07.018.
- [34] 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(上半月)*, 2021(1): 78-82. DOI: 10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2021.01.021.
- [35] LIU Z B, ZHANG M, BHANDARI B, et al. 3D printing: Printing precision and application in food sector[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 69: 83-94. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.08.018.
- [36] YANG F L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 67-76. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.08.054.
- [37] 杜姗姗, 周爱军, 陈洪, 等. 3D打印技术在食品中的应用进展[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(3): 87-93. DOI: 10.13304/j.nykJdb.2017.0214.
- [38] ZHENG L Y, LIU J B, LIU R, et al. 3D printing performance of gels from wheat starch, flour and whole meal[J/OL]. *Food Chemistry*, 2021, 356 [2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814621005525>. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129546.
- [39] GHAZAL A F, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Progress in 4D/5D/6D printing of foods: applications and R&D opportunities[J/OL]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022 [2022-12-07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35225117/>. DOI: 10.1080/10408398.2022.2045896.
- [40] ZHAO L, ZHANG M, CHITRAKAR B, et al. Recent advances in functional 3D printing of foods: A review of functions of ingredients and internal structures[J]. *Critical Reviews in*

- Food Science and Nutrition, 2020, 61(21): 3489–3503. DOI: 10.1080/10408398.2020.1799327.
- [41] 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): 37896–37905. DOI:10.1021/acsami.0c10899.
- [42] LIU Z B, HE C, GUO C F, et al. Dehydration-triggered shape transformation of 4D printed edible gel structure affected by material property and heating mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X21000242>. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.106608.
- [43] CORTEZ R, LUNA-VITAL D A, MARGULIS D, et al. Natural pigments: Stabilization methods of anthocyanins for food applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 16(1): 180–198. DOI:10.1111/1541-4337.12244.
- [44] GHAZAL A F, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Investigation on spontaneous 4D changes in color and flavor of healthy 3D printed food materials over time in response to external or internal pH stimulus[J/OL]. Food Research International, 2021, 142[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996921001149>. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110215.
- [45] HE C, ZHANG M, GUO C F. 4D printing of mashed potato/purple sweet potato puree with spontaneous color change[J/OL]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 59[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856419309348>. DOI:10.1016/j.ifset.2019.102250.
- [46] MICHAEL M H. 3D Printing+five axes=5D printing? [EB/OL]. (2016–06–24)[2022–12–07]. <https://www.engineering.com/story/3d-printing-five-axes-5d-printing>.
- [47] REDDY P R, DEVI P A. Review on the advancements to additive manufacturing–4D and 5D printing[J]. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 2018, 8(4): 397–402. DOI:10.24247/ijmperdaug201841.
- [48] ZEIJDERVELD J. 5D Printing: A new branch of additive manufacturing[EB/OL]. (2018–05–07)[2022–12–07]. <https://www.sculpteo.com/blog/2018/05/07/5d-printing-a-new-branch-of-additive-manufacturing/>.
- [49] GEORGANTZINOS S K, GIANOPOULOS G I, BAKALIS P A. Additive manufacturing for effective smart structures: The idea of 6D printing[J/OL]. Journal of Composites Science, 2021, 5(5)[2022–12–07]. <https://www.mdpi.com/2504-477X/5/5/119>. DOI:10.3390/jcs5050119.
- [50] DONG X P, PAN Y X, ZHAO W Y, et al. Impact of microbial transglutaminase on 3D printing quality of *Scorpaenopsis nipponius* surimi[J/OL]. LWT–Food Science and Technology, 2020, 124[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S00236438-20301110>. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109123.
- [51] WANG L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 220: 101–108. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.02.029.
- [52] LIU Y, SUN Q X, PAN Y M, 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. DOI:10.1111/1750-3841.15581.
- [53] LIU Y, SUN Q X, WEI S, et al. Insight into the correlations among rheological behaviour, protein molecular structure and 3D printability during the processing of surimi from golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J/OL]. Food Chemistry, 2022, 371[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814621020525>. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131046.
- [54] GASPAR A L C, DE GÓES-FAVONI S P. Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: A review[J]. Food Chemistry, 2015, 171: 315–322. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.09.019.
- [55] CAO F F, CHEN R Y, LI Y, et al. Effects of NaCl and MTGase on printability and gelling properties of extrusion-based 3D printed white croaker (*Argyrosomus argentatus*) surimi[J/OL]. LWT–Food Science and Technology, 2022, 164[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643822005813>. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113646.
- [56] 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/OL]. Journal of Food Engineering, 2022, 333[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877422002059>. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2022.111151.
- [57] SEVERINI C, AZZOLLINI D, ALBENZIO M, et al. On printability, quality and nutritional properties of 3D printed cereal based snacks enriched with edible insects[J]. Food Research International, 2018, 106: 666–676. DOI:10.1016/j.foodres.2018.01.034.
- [58] AMARENDER R V, BHARGAVA K, DOSSEY A T, et al. Lipid and protein extraction from edible insects–Crickets (*Gryllidae*) [J/OL]. LWT–Food Science and Technology, 2020, 125[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643820302103>. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109222.
- [59] YANG F, ZHANG M, BHANDARI B. Recent development

- in 3D food printing[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 57(14): 3145–3153. DOI:10.1080/10408398.2015.1094732.
- [60] 张麒,吴海波,颜文文,等. 大豆7S与11S球蛋白理化特性及其改性修饰的研究进展[J]. *食品与发酵工业*,2022,48(9):324–335. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030359.
- [61] CHEN J W, MU T H, GOFFIN D, et al. Application of soy protein isolate and hydrocolloids based mixtures as promising food material in 3D food printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261: 76–86. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2019.03.016.
- [62] 潘燕墨,黄煜钦,刘阳,等. 蛋白粉对虾肉糜3D打印成型效果的影响[J]. *广东海洋大学学报*,2022,42(4):129–137. DOI:10.3969/j.issn.1673-9159.2022.04.015.
- [63] YU X F, ZHAO Z L, ZHANG N N, et al. Effects of preheating-induced denaturation treatments on the printability and instant curing property of soy protein during microwave 3D printing[J/OL]. *Food Chemistry*, 2022, 397[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S03-08814622016442>. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133682.
- [64] PANT A, LEE A Y, KARYAPPA R, et al. 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients[J/OL]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 114[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268-005X2032920>. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106546.
- [65] 王章存,康艳玲. 国内外谷物蛋白发展概况[J]. *中国食品添加剂*,2006(5):110–113. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2006.05.030.
- [66] 唐文娟,赵红清,许宙,等. 谷物蛋白分离纯化方法的研究进展[J]. *食品与机械*,2016,32(2):178–182. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2016.02.043
- [67] 石陆娥,唐振兴,俞志明. 谷朊粉的开发与利用[J]. *现代食品科技*,2005,21(1):170–173. DOI:10.3969/j.issn.1673-9078.2005.01.055.
- [68] GUO Z W, TENG F, HUANG Z X, et al. Effects of material characteristics on the structural characteristics and flavor substances retention of meat analogs[J/OL]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X19320715>. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.105752.
- [69] MATTICE K D, MARANGONI A G. Comparing methods to produce fibrous material from zein[J/OL]. *Food Research International*, 2020, 128[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996919306908>. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108804.
- [70] 汪磊,陈洁,吕莹果,等. 谷朊粉对烩面面团流变学性质及烩面品质的影响研究[J]. *食品科技*,2015(6):182–185. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2015.06.043.
- [71] 寻崇荣,薛洪飞,刘宝华,等. 高湿挤压技术制备持香型仿肉制品工艺[J]. *食品科学*,2019,40(4):292–298. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180119-273.
- [72] TSAI C R, LIN Y K. Artificial steak: A 3D printable hydrogel composed of egg albumen, pea protein, gellan gum, sodium alginate and rice mill by-products[J/OL]. *Future Foods*, 2022, 5[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666833522000090>. DOI:10.1016/j.fufo.2022.100121.
- [73] SANTAMARÍA-FERNÁNDEZ M, LÜBECK M. Production of leaf protein concentrates in green biorefineries as alternative feed for monogastric animals[J/OL]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 268[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840120305095>. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2020.114605.
- [74] TAMAYO-TENORIO A. Sugar beet leaves for functional ingredients[D]. Wageningen: Wageningen University, 2017.
- [75] NYNÄS A L. White proteins from green leaves in food applications[R]. The Faculty of Landscape Architecture, Horticulture and Crop Production Science, 2018.
- [76] AGBEDE J O, ALETOR V A. Chemical characterization and protein quality evaluation of leaf protein concentrates from *Glyricidia sepium* and *Leucaena leucocephala*[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2004, 39(3): 253–261. DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.00779.x.
- [77] ADEYEMI O, OSUBOR C C. Assessment of nutritional quality of water hyacinth leaf protein concentrate[J]. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2016, 42(3): 269–272. DOI:10.1016/j.ejar.2016.08.002.
- [78] CALDERÓN-CHIU C, CALDERÓN-SANTOYO M, HERMAN-LARA E, et al. Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam) leaf as a new source to obtain protein hydrolysates: Physicochemical characterization, techno-functional properties and antioxidant capacity[J/OL]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X20316052>. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106319.
- [79] GHALY A E, ALKOAİK F N. Extraction of protein from common plant leaves for use as human food[J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, 7(3): 331–342. DOI:10.3844/ajassp.2010.331.342.
- [80] SUN C Z, TANG X, SHAO X, et al. Mulberry (*Morus atropurpurea* Roxb.) leaf protein hydrolysates ameliorate dextran sodium sulfate-induced colitis via integrated modulation of gut microbiota and immunity[J/OL]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 84[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464621002243>. DOI:10.1016/j.jff.2021.104575.
- [81] 罗磊,夏迎利,杨浩昆,等. 牡丹花蕊蛋白对面团和面筋蛋白特性的影响[J]. *食品科学*,2023,44(4):42–47. DOI:10.

- 7506/spkx1002-6630-20220314-155.
- [82] SCHWENZFEIER A, WIERENGA P A, GRUPPEN H. Isolation and characterization of soluble protein from the green microalgae *Tetraselmis* sp[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(19): 9121-9127. DOI:10.1016/j.biortech.2011.07.046.
- [83] ZHU Q S, CHEN X J, WU J J, et al. Dipeptidyl peptidase IV inhibitory peptides from *Chlorella vulgaris*: In silico gastrointestinal hydrolysis and molecular mechanism[J]. *European Food Research and Technology*, 2017, 243(10): 1739-1748. DOI:10.1007/s00217-017-2879-1.
- [84] 杨鹭生,李国平,陈林水. 蛋白核小球藻粉的蛋白质、氨基酸含量及营养价值评价[J]. *亚热带植物科学*, 2003, 32(1): 36-38. DOI:10.3969/j.issn.1009-7791.2003.01.012.
- [85] 孔维宝,李龙囡,张继,等. 小球藻的营养保健功能及其在食品工业中的应用[J]. *食品科学*, 2010, 31(9): 323-328. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201009072.
- [86] BLEAKLEY S, HAYES M. Algal proteins: extraction, application, and challenges concerning production[J]. *Foods*, 2017, 6(5)[2022-12-07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28445408/>. DOI:10.3390/foods6050033.
- [87] DEROSI A, CAPORIZZI R, AZZOLLINI D, et al. Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 65-75. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.05.015.
- [88] NEVALAINEN H. Grand challenges in fungal biotechnology [M]. Cham: Springer, International Publishing, 2020.
- [89] COELHO M O C, MONTEYNE A J, DUNLOP M V, et al. Mycoprotein as a possible alternative source of dietary protein to support muscle and metabolic health[J]. *Nutrition Reviews*, 2019, 78(6): 486-497. DOI:10.1093/nutrit/nuz077.
- [90] 闫馨月,贾亦佳,孙诗艳,等. 大豆蛋白-黄芩素的结合机制及蛋白构象和功能变化[J]. *食品科学*, 2023, 44(4): 91-98. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220519-255.
- [91] 王晨,谢岩黎,范亭亭. 花青素与小麦蛋白相互作用及对蛋白质结构的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 60-66. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20180725-308.
- [92] 胡莹,江睿生,霍金杰,等. 茶多酚对大豆蛋白肉质构性质和结构特性的影响[J]. *农产品加工(上半月)*, 2022(4): 1-3, 9. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2022.04.001.
- [93] LIU Y, SUN Q X, WEI S, et al. LF-NMR as a tool for predicting the 3D printability of surimi-starch systems[J/OL]. *Food Chemistry*, 2022, 374[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814621027333>. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131727.
- [94] PAN H S, PEI F, MA G X, et al. 3D printing properties of *Flammulina velutipes* polysaccharide-soy protein complex hydrogels[J/OL]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 334 [2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877422002242>. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2022.111170.
- [95] ZHOU X X, JIANG S, ZHAO D D, et al. Changes in physicochemical properties and protein structure of surimi enhanced with camellia tea oil[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 84: 562-571. DOI:10.1016/j.lwt.2017.03.026.
- [96] SHAO J H, ZOU Y F, XU X L, et al. Evaluation of structural changes in raw and heated meat batters prepared with different lipids using Raman spectroscopy[J]. *Food Research International*, 2011, 44(9): 2955-2961. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.07.003.
- [97] KUDRE T, BENJAKUL S, KISHIMURA H. Effects of protein isolates from black bean and mungbean on proteolysis and gel properties of surimi from sardine (*Sardinella albella*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(2): 511-518. DOI:10.1016/j.lwt.2012.08.018.
- [98] LIN D Q, ZHANG L T, LI R J, et al. Effect of plant protein mixtures on the microstructure and rheological properties of myofibrillar protein gel derived from red sea bream (*Pagrosomus major*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 537-545. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.05.043.
- [99] RAWDKUEN S, BENJAKUL S. Whey protein concentrate: Autolysis inhibition and effects on the gel properties of surimi prepared from tropical fish[J]. *Food Chemistry*, 2008, 106(3): 1077-1084. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.07.028.
- [100] WANG R H, GAO R C, XIAO F, et al. Effect of chicken breast on the physicochemical properties of unwashed sturgeon surimi gels[J/OL]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 113[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643819306462>. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108306.
- [101] FAN H Z, ZHANG M, LIU Z B, et al. Effect of microwave-salt synergetic pre-treatment on the 3D printing performance of SPI-strawberry ink system[J/OL]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 122[2022-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S00236438193-13465>. DOI:10.1016/j.lwt.2019.109004.
- [102] LIU L L, MENG Y Y, DAI X N, et al. 3D printing complex egg white protein objects: Properties and optimization[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(2): 267-279. DOI:10.1007/s11947-018-2209-z.
- [103] LILLE M, NURMELA A, NORDLUND E, et al. Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 20-27. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.04.034.
- [104] YANG F, ZHANG M, LIU Y P. Effect of post-treatment microwave vacuum drying on the quality of 3D-printed mango juice gel[J]. *Drying Technology*, 2019, 37(14): 1757-1765. DOI: 10.1080/07373937.2018.1536884.

- [105] 赵子龙. 微波3D打印固化单元设计及打印鱼糜制品品质研究[D]. 无锡:江南大学, 2021.
- [106] CHEN J H, CHEN X, ZHOU G H, et al. Ultrasound: A reliable method for regulating food component interactions in protein-based food matrices[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 128: 316–330. DOI:10.1016/j.tifs.2022.08.014.
- [107] MA X B, HOU F R, ZHAO H H, et al. Conjugation of soy protein isolate (SPI) with pectin by ultrasound treatment[J/OL]. Food Hydrocolloids, 2020, 108[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S02680-05X20300345>. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106056.
- [108] CHEN H Z, ZHANG M, RAO Z B. Effect of ultrasound-assisted thawing on gelling and 3D printing properties of silver carp surimi[J/OL]. Food Research International, 2021, 145[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996921003045>. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110405.
- [109] CHEN J H, XU Y J, PIUS B A, et al. Changes of myofibrillar protein structure improved the stability and distribution of baicalein in emulsion[J/OL]. LWT–Food Science and Technology, 2021, 137[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643820313931>. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110404.
- [110] GAGAOUA M, DIB A L, LAKHDARA N, et al. Artificial meat tenderization using plant cysteine proteases[J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 38: 177–188. DOI:10.1016/j.cofs.2020.12.002.
- [111] 陈梦婷, 郑昌亮, 汪兰, 等. 超高压在蛋白质和活性肽中的研究进展[J/OL]. 食品科学, 2022[2022–12–07]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220613.0905.004.html>.
- [112] 王炳智. 高压与TG酶处理对小麦面筋蛋白的凝胶性影响研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
- [113] 周一鸣, 杜丽娜, 李云龙, 等. 高静水压和热处理对荞麦蛋白功能性质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(5):77–83. DOI: 10.7506/spkx1002–6630–20200210–084.
- [114] SPERONI F, BEAUMAL V, DE LAMBALLERIE M, et al. Gelation of soybean proteins induced by sequential high-pressure and thermal treatments[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(5):1433–1442. DOI:10.1016/j.foodhyd.2008.11.008.
- [115] 黄薇. 超高压对小麦面筋蛋白改性及应用的研究[D]. 天津:天津科技大学, 2016.
- [116] 戴彩霞, 何荣. 超高压和加热处理对菜籽蛋白功能性质和结构的影响研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(7):68–74. DOI: 10.3969/j.issn.1003–7969.2019.07.015.
- [117] CHEN H Z, ZHANG M, YANG C H. Comparative analysis of 3D printability and rheological properties of surimi gels via LF–NMR and dielectric characteristics[J/OL]. Journal of Food Engineering, 2021, 292[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026087742-030368X>. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2020.110278.
- [118] PHUHONGSUNG P, ZHANG M, DEVAHASTIN S. Investigation on 3D printing ability of soybean protein isolate gels and correlations with their rheological and textural properties via LF–NMR spectroscopic characteristics[J/OL]. LWT–Food Science and Technology, 2020, 122[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002-3643820300074>. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109019.
- [119] 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): 2985–2999. DOI:10.1002/fsn3.2257.
- [120] COZZOLINO D. The ability of near infrared (NIR) spectroscopy to predict functional properties in foods: Challenges and Opportunities[J/OL]. Molecules, 2021, 26(22)[2022–12–07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34834073/>. DOI: 10.3390/molecules26226981.
- [121] 刘镡琳, 何悦珊, 王钊, 等. 傅里叶红外与拉曼光谱法测定蛋白质二级结构研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业, 2022[2022–12–07]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoq1hG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCd-PD66G4BttxyZQe05XeYLkGedZscxeiZrYa7-a6qxHfs5\\_Mq-k2Q0qiw5HT&uniplatform=NZKPT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoq1hG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCd-PD66G4BttxyZQe05XeYLkGedZscxeiZrYa7-a6qxHfs5_Mq-k2Q0qiw5HT&uniplatform=NZKPT). DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.031883.
- [122] 康怀彬, 邹良亮, 张慧芸, 等. 高温处理对牛肉蛋白质化学作用力及肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(23):80–86. DOI:10.7506/spkx1002–6630–201823013.
- [123] ZHENG J, SUN D, LIU D, et al. Low-field NMR and FTIR determination relationship between water migration and protein conformation of the preparation of minced meat[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 57(1): 235–241. DOI:10.1111/ijfs.15247.
- [124] YANG K, ZHOU Y H, GUO J J, et al. Low frequency magnetic field plus high pH promote the quality of pork myofibrillar protein gel: A novel study combined with low field NMR and Raman spectroscopy[J/OL]. Food Chemistry, 2020, 326[2022–12–07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814620307585>. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126896.

收稿日期:2023–03–22